Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

Doctorado en Ingeniería

"Paneles prefabricados termo-acústicos para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada"

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

"Doctor en Ingeniería"

Presenta:

"Carlos Cobreros Rodríguez"

Dirigido por:

"Dr. José Luis Reyes Araiza"

Dr. José Luis Reyes Araiza
Presidente _____ Firma

Dr. Alejandro Manzano Ramírez
Secretario _____ Firma

Dr. Rufino Nava Mendoza
Vocal _____ Firma

Dr. Ramón Guevara Hernández
Suplente _____ Firma

Dr. Jaume Avellaneda Díaz-Grande
Suplente _____ Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dr. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo 2015
México

REPOSITORIO INSTITUCIONAL DGBSDI-UAQ

La presente obra está bajo la licencia:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

El proyecto parte de la caracterización del suelo arcilloso, base del compuesto, y de la paja de cereal como refuerzo fibroso, y se plantea el desarrollo tecnológico de un nuevo panel termoacústico y prefabricado a partir de la estabilización del suelo arcilloso por medio del uso de puzolanas combinadas con cal.

Parte del trabajo consiste en la caracterización de la paja de cebada, la ceniza de la paja de cebada y otras puzolanas naturales y artificiales provenientes de México como la ceniza de la paja de trigo, la ceniza volcánica, el polvo de ladrillo cocido y la ceniza volante. Se estudia y compara la actividad puzolánica de los diferentes materiales puzolánicos. Para determinar la actividad puzolánica se estudia la fracción soluble, el grado de finitud, el desarrollo de la resistencia a compresión en compuestos con base cal-puzolana curados en condiciones especiales, se evalúa el consumo de la cal (usando el método del conductivímetro). Además, se realiza el análisis de la evolución de las fases cristalinas durante la reacción puzolánica usando difracción de rayos x (DRX), y se analiza también la evolución de la morfología microestructural durante esta reacción puzolánica por medio de microescopía de barrido electrónico (SEM).

Posteriormente proyecto definirá y caracterizará el compuesto y sus diferentes dosificaciones a ensayar, teniendo en cuenta las diferentes relaciones aglomerantes/estabilizantes/arena y fibras/aglomerantes. A partir de aquí se experimentará una serie de combinaciones propuestas de compósitos a partir de la primera caracterización del mismo y sus diferentes dosificaciones como para obtener unas conclusiones sobre las características de este y así poder proponer una tipología de panel.

Finalmente se planteará la propuesta de una tipología de panel prefabricado a partir de un compuesto arcilloso estabilizado y paja de cereal como refuerzo fibroso, y se probarán sus prestaciones termo-acústicas, mecánicas y de durabilidad como para aplicarlo dentro de un sistema constructivo industrializado en vivienda, llegando a conclusiones sobre esta aplicación y sobre su aportación.

Palabras Clave: panel prefabricado, compuesto arcilloso, paja de cereal, puzolanas.

SUMMARY

The project consist on the characterization of stabilized clay soil composite with cereal straw as a fibrous reinforcement, and the technological development of a new thermos-acoustic prefabricated panel. The clay soil stabilization is based on the use of pozzolan combined with lime.

In this work, barley straw, barley straw ash, and other natural and artificial pozzolans from Mexico, such as wheat straw ash, volcanic ash, fired clay brick, and fly ash, were characterized. The pozzolanic activity and properties of the different pozzolans was compared. To determine this pozzolanic activity, the water-soluble fraction, fineness, lime-pozzolana compressive strength development, and lime consumption (using a conductometric method) were also evaluated. In addition, analysis of the evolution of crystalline phases during the pozzolanic reaction was performed using X-ray diffraction (XRD), and the evolution of micro-morphology during the pozzolanic reaction was evaluated using a scanning electron microscope (SEM).

The project define and characterize the composite in different dosifications, taking into account the different relations binders/stabilizers/sand and fiber/binder/water. From here a number of proposals composites are combined and tested to get a conclusion on the characteristics of this and be able to propose a typology of panel.

Finally, it is proposed a prefabricated panel analyzing the durability and the thermo-acoustic and mechanical behavior to apply within an industrialized housing construction system, reaching conclusions about this application and their level of contribution.

Key words: prefabricated panel, clay composite, cereal straw, pozzolans.

LE EXPLICABA A YUMKAAX COMO SE ALIMENTAN LAS PLANTAS,

SENCILLO: AGUA, TIERRA Y SOL.

A MI HIJO YUMKAAX,

A MI ESPOSA ALEXANDRA,

A MI MADRE, MI PADRE Y MIS HERMANOS

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Reyes, por la dirección de este trabajo de investigación y el acompañamiento en la adaptación y superación de las diferentes dificultades que se fueron planteando en su etapa en Querétaro; Al Dr. Manzano, por todo su apoyo logístico, de conocimiento, de contactos y de experiencia para el buen desempeño del proyecto, con la posibilidad de haber podido utilizar sus instalaciones, laboratorio y equipos, fundamentales para el buen desarrollo de este trabajo; Al Dr. Rufino Nava y Dr. Ramón Guevara, por sus apoyos como sinodales dentro del comité doctoral, sus comentarios y asesorías; Al Dr. Jauregui, por la estupenda coordinación del programa de doctorado dentro del cual se ha desarrollado este trabajo y su continuo ánimo y energía, fundamental la motivación necesaria para su conclusión; Al Dr. Jaume Avellaneda, por estar desde el principio, desde su etapa de Barcelona, presente y dirigiendo a la distancia luego, y pudiendo contar con tu conocimiento y experiencia fundamental para una motivación extra necesaria para este tipo de difíciles empresas.

Se agradece el apoyo por parte de CONACYT, de la Universidad Autónoma de Querétaro y el apoyo técnico del laboratorio LITRA del CINVESTAV, con la colaboración de Adair Jiménez y Eleazar Urbina, del laboratorio de Difracción de Rayos X del CFATA-UNAM, con el gran apoyo del Dr. Erick Rivera y Carmen Peza, del laboratorio de Nanotecnología de la UAQ con la participación del Dr. Rodrigo Velázquez, y el apoyo logístico del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl y el INIFAP-Campo Experimental Bajío.

Y se agradece infinitamente el apoyo y motivación de la familia, tanto por parte de mi esposa Alexandra y la fundamental de mi hijo Yumkaax, como el apoyo incondicional de mi madre y mi padre, así como de mis hermanos y sobrinas, que de una manera u otra son la excusa y motor primero para meterse uno en este tipo de aventuras académicas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN i

SUMMARY ii

AGRADECIMIENTOS. iv

ÍNDICE DE CONTENIDO v

ÍNDICE DE TABLAS ix

ÍNDICE DE FIGURAS xiii

1 INTRODUCCIÓN v

1.1 Planteamiento del problema 7

1.1.1 Déficit de vivienda y calidad de hábitat construido en México y Latinoamérica 7

1.1.2 Impacto ambiental del sector de la construcción 9

1.1.3 Compuestos arcillosos estabilizados por medio del uso de puzolanas provenientes de residuos agrícolas combinadas con cal 9

1.1.4 Paja de cereal como fibra vegetal lignocelulósica subproducto agrícola 10

1.2 Justificación 12

1.2.1 Mejora de la calidad del hábitat construido y solución del déficit de vivienda 12

1.2.2 Necesidad de lograr una reducción del impacto ambiental del sector de la construcción 12

1.2.3 Necesidad de investigación sobre la estabilización de un compuesto arcilloso por nuevos métodos de combinación de puzolanas, a partir de residuos agrícolas, con cal 13

1.2.4 Necesidad de análisis de la paja de cereal como material de construcción . 15

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS 15

2.1 Hipótesis 15

2.2 Objetivo general 15

2.3 Objetivos específicos……15

3. REVISIÓN DE LITERATURA 17

3.1 Vivienda y hábitat construido……17

3.2 Diagnóstico sobre la vivienda en México 19

3.3 Construcción sustentable……27

3.3.1 Contexto ambiental……27

3.3.2 Ecología Industrial……29

3.3.3 Impacto ambiental de la industria de la construcción……33

3.3.4 Ecología industrial y el cierre de los ciclos de los flujos materiales en la construcción sostenible……36

3.4 Construcción industrializada para una vivienda sostenible y ecológica……..40

3.4.1 Construcción industrializada……40

3.4.2 Vivienda industrializada y sostenible……59

3.5 Materiales de construcción para una construcción sostenible 64

3.5.1 Materiales de construcción sostenibles……64

3.5.2 Construcción con tierra o suelos arcillosos……65

3.5.2.1 Construcción con tierra o suelos arcillosos. Antecedentes y ejemplos……68

3.5.2.2 Construcción con tierra e innovación tecnológica……126

3.5.2.3 Construcción con tierra e innovación tecnológica……139

3.5.2.4 Características, ventajas y desventajas de la construcción con compuestos de tierra y arcillosos……157

3.5.2.5 Caracterización de la tierra o suelo arcilloso……161

3.5.3 Estabilización de un compuesto arcilloso……164

3.5.3.1 Estabilización de un compuesto arcilloso……164

3.5.3.2 Estabilización de compuestos arcillosos a partir de materiales puzolánicos……169

3.5.3.3 Puzolanas cenizas a partir de residuos agro-industriales……173

3.5.3.4 Puzolanas como ceniza a partir de la calcinación de paja de cereal……177

3.5.4 Refuerzo fibroso del compuesto arcilloso……180

3.5.4.1 Refuerzo fibroso……180

3.5.4.2 Refuerzo fibroso por medio de fibras vegetales……181

3.5.4.3 Tipos y especies de fibras vegetales con aplicación en la construcción...192

3.5.4.4 Paja de cereal, fibra lignocelulósica subproducto agrícola ……200

3.5.4.5 Uso de la fibra vegetal como refuerzo fibroso en la construcción……206

4 METODOLOGÍA 216

4.1 Conclusiones sobre el estado del arte……216

4.2 Análisis de cultivos de paja de cereal potenciales y existentes……216

4.3 Definición y caracterización de los materiales……219

4.3.1 Definición y caracterización del refuerzo fibroso……219

4.3.2 Caracterización de la matriz del compósito: suelo arcilloso……225

4.3.3 Caracterización de la matriz del compósito: puzolana……229

4.4 Caracterización del compósito……..235

4.4.1 Definición, diseño definitivo y preparación de la campaña experimental….235

4.4.2 Desarrollo de la campaña experimental para la caracterización del compósito……..237

4.5 Definición y caracterización del panel……242

4.5.1 Preparación del compuesto……242

4.5.2 Desarrollo de la campaña experimental para la caracterización del panel..246

4.5.2.1 Caracterización mecánica……246

4.5.2.2 Caracterización térmica……252

4.5.2.3 Caracterización acústica……258

4.6 Discusión de los resultados……259

4.7 Conclusiones finales y redacción final……259

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 260

5.1 Análisis de cultivos de paja de cereal potenciales y existentes……260

5.2 Definición y caracterización de los materiales……263

5.2.1 Definición y caracterización del refuerzo fibroso……263

5.2.2 Caracterización de la matriz del compósito: suelo arcilloso……269

5.2.3 Caracterización de la matriz del compósito: puzolana……281

5.3 Caracterización del compósito……297

5.3.1 Definición, diseño definitivo y preparación de la campaña experimental ….....297

5.3.2 Desarrollo de la campaña experimental para la caracterización del compósito…....299

5.4 Definición y caracterización del panel……314

5.4.1 Desarrollo de la campaña experimental para la caracterización del panel……..315

5.4.1.1 Caracterización mecánica……315

5.4.1.2 Caracterización térmica……336

5.4.1.3 Caracterización acústica……348

6 CONCLUSIONES FINALES……352

7 REFERENCIAS……381

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.4.1.1. Sistemas y elementos prefabricados para muros…….....46

Tabla 3.4.1.2. Sistemas y elementos prefabricados para cubiertas y entrepisos.....49

Tabla 3.4.1.3. Sistemas y elementos prefabricados para cubiertas…….....50

Tabla 3.4.1.4. Sistemas y elementos prefabricados para sistemas complejos….....51

Tabla 3.4.1.5. Sistemas y elementos prefabricados para sistemas estructurales - soportes….....53

Tabla 3.4.1.6. Sistemas y elementos prefabricados para sistemas estructurales - vigas y traves….....53

Tabla 3.4.1.7. Sistemas y elementos prefabricados para fachadas……..54

Tabla 4.3.3.1. Materiales puzolánicos caracterizados……...230

Tabla 4.4.1.1. Relación de los materiales componentes del compuesto arcilloso estudiado……...235

Tabla 4.4.1.2. Relación de los materiales puzolánicos estudiados en la fase preliminar ……236

Tabla 4.4.1.3. Relación dosificaciones utilizadas en pruebas de caracterización mecánica de los compuestos en su fase final……236

Tabla 4.5.1.1. Relación dosificaciones utilizadas en pruebas de caracterización del panel……...246

Tabla 5.1.1. Producción de paja de cereal (cebada) en la región de El Bajío……...262

Tabla 5.2.1.8. Análisis de Química Proximal de la Paja de Cebada……267

Tabla 5.2.2.1. Resumen de porcentaje de finos, arena y grava……...273

Tabla 5.2.2.2. Condiciones antes del secado del suelo arcilloso “La Solana”……..273

Tabla 5.2.2.3. Condiciones después del secado del suelo arcilloso “La Solana”……..273

Tabla 5.2.2.4. Relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “La Solana”……..274

Tabla 5.2.2.5. Resumen ordenado de la relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “La Solana”……274

Tabla 5.2.2.6. Condiciones antes del secado del suelo arcilloso “San Nicolás A”……275

Tabla 5.2.2.7. Condiciones después del secado del suelo arcilloso “San Nicolás A”..275

Tabla 5.2.2.8. Relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “San Nicolás A”……..275

Tabla 5.2.2.9. Resumen relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “San Nicolás A”……276

Tabla 5.2.2.10. Condiciones antes del secado del suelo arcilloso “San Nicolás B”…..276

Tabla 5.2.2.11. Condiciones después del secado del suelo arcilloso “San Nicolás B”277

Tabla 5.2.2.12. Relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “San Nicolás B”……..277

Tabla 5.2.2.13. Resumen, relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “San Nicolás B”……277

Tabla 5.2.2.14. Condiciones antes del secado del suelo arcilloso “Amealco”……...278

Tabla 5.2.2.15. Condiciones después del secado del suelo arcilloso “Amealco”……..278

Tabla 5.2.2.16. Relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “Amealco”……..278

Tabla 5.2.2.17. Resumen, relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “Amealco”……..279

Tabla 5.2.2.18. Índice de contracción lineal (CL)……280

Tabla 5.2.2.19. Límite de contracción (LC)……..280

Tabla. 5.2.3.1. Resumen de las puzolanas analizadas y su procedencia……281

Tabla. 5.2.3.2. Composición química, por análisis elemental por trazas con micro fluorescencias de rayos X (XRF)……...282

Tabla. 5.2.3.3. Composición química a partir del análisis EDS sobre los puntos 1, 2 y3 de la muestra BSA……...284

Tabla. 5.2.3.4. Fracción soluble en agua (WSF)……287

Tabla. 5.2.3.5. Tamaño de partícula (PS), por retención acumulativa al pasar por las mallas 30 y 200……287

Tabla 5.3.1.1. Relación de los materiales componentes del compuesto arcilloso estudiado……...298

Tabla 5.3.1.2. Relación de las dosificaciones del compuesto estudiados en la fase preliminar……...298

Tabla 5.3.1.3. Relación dosificaciones utilizadas en pruebas de caracterización mecánica de los compuestos en su fase final……299

Tabla 5.4.1. Dosificaciones planteadas para la conformación de los paneles……..315

Tabla 5.4.1.1.1. Dimensiones principales y peso promedio. ……318

Tabla 5.4.1.1.2. Relaciones geométricas principales y densidad promedio……318

Tabla 5.4.1.1.3. Relación esfuerzo-deformación del panel PF0102…….. 320

Tabla 5.4.1.1.4. Relación esfuerzo-deformación del panel PF0103……322

Tabla 5.4.1.1.5. Relación esfuerzo-deformación del panel PF0104……324

Tabla 5.4.1.1.6. Relación esfuerzo-deformación del panel PF0105……325

Tabla 5.4.1.1.7. Resistencia a compresión de otros materiales……...327

Tabla 5.4.1.1.8. Resistencia máxima a flexión vertical del panel tipo PF0102……..328

Tabla 5.4.1.1.9. Resistencia máxima a flexión vertical del panel tipo PF0103……..328

Tabla 5.4.1.1.10. Resistencia máxima a flexión vertical del panel tipo PF0104…….328

Tabla 5.4.1.1.11. Resistencia máxima a flexión vertical del panel tipo PF0108…….329

Tabla 5.4.1.1.12. Módulo elástico en prueba a flexión vertical del panel tipo PF0102.329

Tabla 5.4.1.1.13. Módulo elástico en prueba a flexión vertical del panel tipo PF0103.329

Tabla 5.4.1.1.14. Módulo elástico en prueba a flexión vertical del panel PF0104……329

Tabla 5.4.1.1.15. Módulo elástico en prueba a flexión vertical del panel PF0105……329

Tabla 5.4.1.1.16. Valores de referencia de otros materiales……330

Tabla 5.4.1.2.1. Valores de referencia de otros materiales……..338

Tabla 5.4.1.3.1. Valores de aislamiento acústico de referencia……...349

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.2.1. Porcentaje de población urbana en México……...19

Figura 3.2.2. Porcentaje de población en pobreza patrimonial…..……20

Figura 3.2.3. Porcentaje de viviendas abandonadas en México……21

Figura 3.2.4. Porcentaje de percepción de ingresos en México.……22

Figura 3.2.5. Problemas actuales en la vivienda en México……..……26

Figura 3.2.6. Porcentaje de uso de materiales durables en México.……27

Figura 3.3.1.1 Smog de la Ciudad de México……25

Figura 3.3.1.2 Diagrama concepto Sistema Natural + Sistema Industrial……26

Figura 3.3.2.1 Bosque en la Sierra de la Garrotxa……27

Figura 3.3.3.1 Edificio en altura en Sevilla con estructura de concreto. ……32

Figura 3.3.4.1 Sistema prefabricado de estructura metálica de fácil montaje……35

Figura 3.4.2.1. Viviendas Weissenhof, propuesta de industrialización de vivienda de Le Courbusier……58

Figura 3.4.2.2. “Casas Diatom” a base de tierra endurecida con vapor y paneles estructurales de madera.……58

Figura 3.4.2.3. Propuesta de Casa desmontable de Jean Prouve. ……59

Figura 3.4.2.4. “The Packaged Houses System de Walter Groupius.……59

Figura 3.4.2.5. Viviendas prefabricadas por Ytong en 1956..……59

Figura 3.4.2.6. Vivienda prefabricada de Sáenz de Oiza.……59

Figura 3.4.2.7. Viviendas industrializadas en Vitoria-Gasteiz de Pich-Aguilera…60

Figura 3.4.2.8. Bloque de viviendas industrializadas en Manresa de Pich-Aguilera.……60

Figura 3.4.2.9. Imagen del proyecto Taliesin Mod.FabTM construido con elementos prefabricados.……60

Figura 3.4.2.10. Viviendas social de Jean Nouvel en Nimes……61

Figura 3.5.2.1.1. Mapa de zonas con construcción con tierra……..66

Figura 3.5.2.1.2. Expansión de la técnica de la construcción con tierra cruda…...67

Figura 3.5.2.1.3. Construcción con tierra en el Kurdistan Sirio…..……67

Figura 3.5.2.1.4. Construcción con tierra en Yemen……..……68

Figura 3.5.2.1.5. Construcción con tierra en Yemen……..……68

Figura 3.5.2.1.6. Bóveda correspondiente al bazar de Kashan. Iran la región de Bekace……..……69

Figura 3.5.2.1.7. Vista aérea de un Tata en Mali (Barbeta, 2002)……69

Figura 3.5.2.1.8. Vivienda de tierra en el poblado de Ségou. Mali……69

Figura 3.5.2.1.9. Mezquita de Djenné. Mali…….....70

Figura 3.5.2.1.10. Kashbah en Marruecos……70

Figura 3.5.2.1.11. Kashbah en Marruecos……70

Figura 3.5.2.1.12. Torre en Gourna……70

Figura 3.5.2.1.13. Casas circulares en Benin y Togo……71

Figura 3.5.2.1.14. Tolek Musqum ……..……71

Figura 3.5.2.1.15. Casas de Barro de los Ndebele……..……71

Figura 3.5.2.1.16. Tulou de Fujian, china……..……71

Figura 3.5.2.1.17. Tulou de Fujian, china……..……72

Figura 3.5.2.1.18. Edificios tradicionales tibetanos en Lhasa……72

Figura 3.5.2.1.19. Viviendas de la República Checa, Villa de Sobotista, año 1795……72

Figura 3.5.2.1.20. Casas de adobe en U.K. 70……73

Figura 3.5.2.1.21. Construcciones con tierra en Holanda……..……73

Figura 3.5.2.1.22. Gamme de Laponia……..……73

Figura 3.5.2.1.23. Alhambra de Granada……74
Figura 3.5.2.1.24. Viviendas en tapial cali castrado en Cataluña……74
Figura 3.5.2.1.25. Construcciones tradicionales en tierra en Castilla y León…….74
Figura 3.5.2.1.26. Pirámide del Sol, Trujillo, Perú……75
Figura 3.5.2.1.27. Construcción en adobe en Taos, Nuevo México, USA……75
Figura 3.5.2.1.28. Casa Paisa……76
Figura 3.5.2.1.29. Construcción tradicional boliviana en tierra……76
Fig. 3.5.2.1.30. Paquimé, Asentada en el desierto chihuahuense……79
Fig. 3.5.2.1.31. Cueva de las ventanas……80
Fig. 3.5.2.1.32. Patio de vivienda prehispánica en tierra en Paquimé……80
Fig. 3.5.2.1.33. Construcción en Bahareque en la zona húmeda de Tamaulipas..80
Fig. 3.5.2.1.34. Capilla en Granjeno, Tolimán, con muros de adobe……82
Fig. 3.5.2.1.35. Capilla en Granjeno, Tolimán, con muros de adobe……82
Fig. 3.5.2.1.36. Capilla en Granjeno, Tolimán, con muros de adobe……83
Fig. 3.5.2.1.37. Capilla en Tequesquite, Tolimán, con muros de adobe……86
Fig. 3.5.2.1.38. Capilla en Pueblito, Tolimán, con muros de adobe……86
Fig. 3.5.2.1.39. Capilla en Pueblito, Tolimán, con muros de adobe……86
Fig. 3.5.2.1.40. Detalle constructivo de la técnica de Enjarre…….....87
Fig. 3.5.2.1.41. Detalle constructivo de la técnica de Adobe…….....87
Fig. 3.5.2.1.42. Detalle constructivo de la técnica de Adobe…….....88
Fig. 3.5.2.1.43. Vivienda construida con técnica de Adobe…….....88
Fig. 3.5.2.1.44. Vivienda construida con técnica de Adobe…….....88
Fig. 3.5.2.1.45. Viveinda construida en adobe…….....88
Fig. 3.5.2.1.46. Detalle de la técnica de enjarre o bajareque…….....89

Fig. 3.5.2.1.47. Imagen de Pirámide de Teotihuacan…….....89

Fig. 3.5.2.1.48. Casa de adobe tradicional en proceso de demolición, en Chalmita……..90

Fig. 3.5.2.1.49. Muro desarrollado con la técnica de adobe en Tepoztlán.....91

Fig. 3.5.2.1.50. Muro desarrollado con la técnica de adobe en Amatlán.....91

Fig. 3.5.2.1.51. Muro desarrollado con la técnica de adobe en Amatlán.....91

Fig. 3.5.2.1.52. Arquitectura rural en Michoacán…….....92

Fig. 3.5.2.1.53. Sobrecimiento en Santiago Asajo, Michoacán.....92

Fig. 3.5.2.1.54. Muro construido con técnica de adobe en Michoacán.....93

Fig. 3.5.2.1.55. Muro construido con técnica de adobe en Michoacán.....93

Fig. 3.5.2.1.56. Vivienda tradicional de la comunidad de Santa Maria Yahuiche, Sierra Norte de Oaxaca.....94

Fig. 3.5.2.1.57. Vivienda tradicional en adobe en la comunidad de Ixtlan, Sierra norte de Oaxaca.....94

Fig. 3.5.2.1.58. Vivienda tradicional con los adobes vistos, interior del Jardín Jaguar, Nabolom.....95

Fig. 3.5.2.1.59. Restos de la pintura de cal que protege a los adobes en las fachadas…….95

Fig. 3.5.2.1.60. Construcciones tradicionales en tierra en San Cristobal de las Casas……...95

Fig. 3.5.2.1.61. Construcciones tradicionales en Bahareque en Abrasolo – Ocosingo……96

Fig. 3.5.2.1.62. Construcciones tradicionales en Bahareque en Abrasolo – Ocosingo……96

Fig. 3.5.2.1.63. Construcciones tradicionales en Bahareque en Abrasolo – Ocosingo, Chiapas……96

Fig. 3.5.2.1.64. Iglesia de 300 años construida en adobe en HUixpan, Chiapas…96

Fig. 3.5.2.1.65. Construcción en adobe en HUixpan, Chiapas……..……...96

Fig. 3.5.2.1.66. Detalle deconstrucción con tierra en estado de deterioro en HUixpan, Chiapas……97

Fig. 3.5.2.1.67. Construcción con tierra en HUixpan, Chiapas……97

Fig. 3.5.2.1.68. Construcción con bahareque en San Juan Chamula, Chiapas…98

Fig. 3.5.2.1.69. Construcción con adobe en San Juan Chamula, Chiapas……98

Fig. 3.5.2.1.70. Construcción con bahareque en San Juan Chamula, Chiapas…98

Fig. 3.5.2.1.71. Construcción con bahareque en San Juan Chamula, Chiapas…98

Fig. 3.5.2.1.72. Construcción Chukal Na Tzotzil, Chiapas……99

Fig. 3.5.2.1.73. Trama de ramas base de la técnica de Bahareque en vivienda tradicional maya, Yucatán……99

Fig. 3.5.2.1.74. Murete base del muro de bahareque con piedra caliza en vivienda tradicional maya, Yucatán……99

Fig. 3.5.2.1.75. Trama de ramas base de la técnica de Bahareque, con relleno de barro, en vivienda tradicional maya, Yucatán……..…100

Fig. 3.5.2.1.76. Trama de ramas base de la técnica de Bahareque, con relleno de barro, en vivienda tradicional maya, Yucatán……..…100

Fig. 3.5.2.1.77. Exterior de muro de bahareque en vivienda tradicional maya, Yucatán……100

Fig. 3.5.2.1.78. Interior en vivienda tradicional maya, Yucatán……100

Fig. 3.5.2.1.79. Acabado interior en vivienda tradicional maya, Yucatán……101

Fig. 3.5.2.1.80. Acabado exterior en cal en vivienda tradicional maya, Yucatán101

Fig. 3.5.2.1.81. Aspecto exterior de vivienda tradicional maya, Yucatán……101

Fig. 3.5.2.1.82. Detalle constructivo de muro en vivienda tradicional maya, Yucatán……101

Fig. 3.5.4.1.1. Esquema de fibras artificiales y naturales……181

Fig. 3.5.4.2.1. Imagen de fibra vegetal tratada……182

Fig. 3.5.4.2.2. Superficies de los cultivos herbáceos más cultivados a nivel mundial. En miles de hectáreas……185

Fig. 4.3.1.1 Máquina donde se realiza análisis termogavimétrico……220

Fig. 4.3.1.2 Mordazas acopladas a máquina universal……221

Fig. 4.3.1.3 Probetas de paja de cebada objetos de estudio……221

Fig. 4.3.1.4 Medición de espesor de probetas de paja de cebada……222

Fig. 4.3.1.5 Medición de grosor de probetas de paja de cebada……222

Fig. 4.3.1.6 Ejemplo de rotura de probeta de paja de cebada……223

Fig. 4.3.1.7 Introducción de muestras en equipo para análisis SEM……224

Fig. 4.3.2.1. Muestras de suelo arcilloso que son caracterizadas……226

Fig. 4.3.3.1. Muestras de las puzolanas que son caracterizadas ……229

Fig. 4.4.2.1. Imagen de cilindro 100x200 para prueba a compresión……238

Fig. 4.4.2.2. Imagen de panel 300x300x60 para prueba a flexo-compresión……238

Fig. 4.5.2.1.1. Esquema de aplicación ensayo……246

Fig. 4.5.2.1.2. Maquina universal donde se realizan los ensayos……246

Fig. 4.5.2.1.3. Imagen del deflectómetro con el que se miden las deformaciones……247

Fig. 4.5.2.1.4. Esquema de aplicación de esfuerzos para los ensayos a flexión vertical……249

Fig. 4.5.2.1.5. Esquema de aplicación de esfuerzos para los ensayos a flexión vertical……249

Fig. 4.5.2.1.6. Esquema de aplicación de esfuerzos para los ensayos a impacto……252

Fig. 4.5.2.2.1. Configuración experimental del aparato de placa caliente con guarda……253

Fig. 4.5.2.2.2. Circuitos eléctricos del sistema de placa caliente (cotas en cm)...253

Fig. 4.5.2.2.3. Distribución de los termopares para el registro de las temperaturas……254

Fig. 4.5.2.2.4. Termopares conectados ……..254

Fig. 4.5.2.2.5. Equipo de medición completo……254

Fig. 4.5.2.2.6. Tarjeta DAQ-ACPC-1216 con termopares y Controlador de temperatura Watlow SD……254

Fig. 4.5.2.2.7. Variador de voltaje STACO (3PN1010B)……..255

Fig. 4.5.2.2.8. Distribución de termopares en las caras de la probeta……255

Fig. 4.5.2.2.9. Preparación del panel para la colocación de los termopares en ambas caras de la probeta……255

Fig. 4.5.2.2.10. Estabilización de la temperatura de las placas……256

Fig. 4.5.2.2.11. Estabilización de la temperatura de las placas……256

Fig. 4.5.2.2.12. Equipo para la Calorimetría Diferencial de Barrido……258

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto propone la investigación, estudio y desarrollo de un compuesto arcilloso estabilizado mediante el uso de puzolanas provenientes de residuos agrícolas, residuos industriales y naturales procedentes de un entorno regional cercano, combinadas con cal y reforzado con paja de cereal, adecuado para el desarrollo de un panel prefabricado con prestaciones termo-acústicas y su aplicación dentro de un sistema constructivo industrializado en vivienda.

Panel termoacústico prefabricado y su aplicación dentro de un sistema constructivo industrializado en vivienda

La prefabricación es una de las posibles formas de materialización del proceso de industrialización en la construcción (Salas, 2008), donde se logra un perfeccionamiento sistemático de los procesos técnicos y logísticos de fabricación del componente constructivo (Pich-aguilera, *et al.,* 2008).

Un sistema industrializado eficaz para la construcción de vivienda consiste en construir utilizando componentes prefabricados procedentes de procesos industriales de ensamblaje que implican un ahorro económico a través de la calidad, la rapidez, la precisión y el ahorro energético (Ruiz-Larrea, 2008). En esta investigación se plantea un concepto de industrialización abierta, aplicado a la vivienda, a base de paneles prefabricados en su envolvente bajo directrices de proyecto redactadas con mentalidad y disciplina industrial, que aporten cotas de valor añadido y que se incorporen a la obra con decidida vocación de racionalización.

Existen autores que, partiendo del análisis de los sistemas constructivos tradicionales, valoran las posibilidades técnicas y económicas de la industria contemporánea para mejorar los procesos de fabricación y puesta en obra, y abogan por una industrialización y una especialización del sector de la construcción (Pich-aguilera, *et al.,* 2008). Existen investigaciones a nivel internacional que concluyen sobre los aportes que estos sistemas industrializados y prefabricados tienen al reducir el costo, tiempo y mano de obra (Ahmad Bari *et al.,* 2012), el consumo de recursos, de

materia prima implicada, al mejorar la calidad de la construcción y reducir las emisiones de CO2 tanto en la fabricación como en la logística de su transporte, puesta en obra y vida útil (Wadel *et al.,* 2010).

Al plantearse nuevas soluciones constructivas se deben cumplir las exigencias básicas en cuanto al confort termo-acústico, la salubridad y el ahorro de energía, lo que está ligado íntimamente a la envolvente (Alba *et al.,* 2012). El diseño de la envolvente afecta en gran medida al futuro ahorro energético del edificio en su periodo de uso – demanda energética esencial para alcanzar el necesario confort interior, mediante el apropiado grado de aislamiento, inercia térmica, permeabilidad al aire. El carácter termo-acústico del componente viene dado por su comportamiento energético en balance entre una baja conductividad térmica y una inercia térmica adecuada. Un buen aislamiento acústico, será potenciado por una mayor densidad.

La industrialización ha sido asimilada casi siempre al uso del acero, el aluminio, el hormigón y el plástico. Hay autores que plantean un cambio de paradigma respondiendo a circunstancias particulares, a lo que el entorno local ofrezca. En México no hay mucho avance en el estudio de componentes industrializados y estándares basados en recursos locales, como los suelos arcillosos y las fibras vegetales lignocelulósicas, dentro de las que está la paja de cereal.

Compuesto arcilloso estabilizado con puzolanas combinadas con cal

La construcción con tierra consiste en el aprovechamiento del suelo disponible para la fabricación de materiales o elementos constructivos, excluyendo la fase orgánica de las primeras capas (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012). Se puede considerar como un material abundante, gratuito, con grandes posibilidades económicas, magníficas condiciones térmicas, acústicas e incluso estéticas, aunque con resistencia y durabilidad que pueden mejorarse con ciertas técnicas (Salas, 2008).

El hombre ha construido con tierra desde hace aproximadamente 9000-10000 años (Minke, 2001). Actualmente casi el 50% de la población mundial vive en viviendas construidas con tierra (Guillaud, 2008). En la última década se han publicado en

Scopus casi 10 veces más que en la década anterior, lo que denota interés científico por transformar la industria de la construcción en más sostenible (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012).

La construcción contemporánea en tierra se puede englobar en tierra estabilizada y tierra sin estabilizar, prescribiéndose la tierra estabilizada como una solución adecuada para la crisis de vivienda urbana y la sostenibilidad medioambiental y siendo necesaria para cumplir con los estándares necesarios requeridos en el mercado que ciertos productos sin estabilizar no podrían pasar (Zami y Lee, 2010). Según Guillaud (2008), la tierra estabilizada implica la modificación de las propiedades del sistema tierra-agua-aire, habiéndose identificado alrededor de 130 diferentes agentes estabilizadores, incluyendo el cemento, la cal y el bitumen (Lal, 1995) y concluye que no existe ningún estabilizador ideal que se pueda aplicar indiscriminadamente. Aunque la estabilización de la tierra es bastante antigua, no fue hasta 1920 que se hizo una aproximación científica y queda determinado que todavía no se ha realizado un bagaje suficiente de investigación sobre el tema (Zami y Lee, 2010).

La tierra se tiende a estabilizar para evitar las fracturas por retracción en el proceso de secado, reducir la plasticidad, mejorar la trabajabilidad, la resistencia, la resistencia a erosión, y con ello, lograr mayor durabilidad (Reddy, 2007). Aunque la paja de cereal puede servir como estabilizador y ayuda en evitar las fracturas por retracción y aportar aislamiento térmico y reducir el peso (Minke, 2001), su uso puede afectar la resistencia a compresión (Binici *et al.,* 2005), en lo cual también influye el tamaño del elemento constructivo y el ratio de las dosificaciones. En la mayoría de los casos es necesario la combinación de estabilizadores químicos (Ceniza volante, Cal, Cemento,…) con el refuerzo de la fibra, pues mientras los estabilizadores mejoran la estabilidad del suelo, al mismo tiempo empeoran la ductilidad del compuesto, y la fibra, en este sentido ayuda a reducir la fragilidad del compuesto (Hejazi *et al.,* 2012). La adición de materiales puzolánicos y polímeros puede mejorar las propiedades de los

compósitos, como el caso de uso exitoso del ceniza volante, escoria, humo de sílice, metacaolín (Toledo, 2003).

Se concluye que la tierra estabilizada con cemento puede causar contaminación aérea y que se necesitan más estudios con estabilizantes no basados en el cemento portland (Zami y Lee, 2010), pudiéndose analizar la estabilización con cal, yeso y residuos puzolánicos alumino-silicatos (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012). El uso de polímeros (SBR látex p. ej.) también puede mejorar las propiedades físico-mecánicas de la pasta cementicia (Stancato *et al.,* 2005). Ciertos autores proponen la sustitución del cemento por materiales puzolánica como la ceniza volante, ceniza de la cáscara de arroz, otras cenizas provenientes de residuos agrícolas o residuos de minas de carbón en mezclas con otros químicos (Karade, 2010; Mathur, 2005). No existe mucha investigación sobre la rentabilidad de la tierra estabilizada (Zami y Lee, 2010).

La combinación de los materiales puzolánicos con la cal conllevan la formación de un compuesto cementicio con similares características a las del cemento portland, proveyendo muchos beneficios como impermeabilidad, durabilidad, resistencia al ataque de sulfato, resistencia mecánica, trabajabilidad.

Estándares internacionales como la ASTM (ASSTM 618-78, EN 197, definen las puzolanas como materiales silicios o aluminosilicatos que por sí mismos tienen muy poco o ninguna actividad hidráulica y capacidad cementicia, pero que finamente molida y en la presencia de agua, puede reaccionar con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente y conformar compuestos con propiedades cementicias.

Las puzolanas pueden ser obtenidas de manera natural o artificial. Existe un enorme potencial en el uso de puzolanas como residuos industriales o agro-industriales para remplazar el uso del cemento portland (Karade 2010; Mathur 2005). Recientes estudios han demostrado que puzolanas artificiales y naturales poseen buenas características puzolánicas (Guzmán *et al.,* 2011; Lima-Souza y Dal-Molin, 2005; Sinthaworn y Nimityongskul, 2009; Martinez ramirez *et al.,* 2006; Rosell-Lam *et al.*, 2011).

Se puede considerar posible la aplicación de residuos agrícolas para la producción de material puzolánico por medio de la calcinación del material orgánico, donde ocurre una descomposición y se produce ceniza que mezclado con cal en partículas pequeñas dar lugar a un compuesto aglutinante con buenas propiedades. Recientes investigaciones han trabajado sobre la obtención de materiales puzolánicos a partir de residuos agrícolas sólidos para la manufacturación de morteros y concretos (Biricik y Aköz 1999; Ordóñez *et al.,* 2002; Al-Akhras *et al.,* 2002; Ramaswamy *et al.,* 1983; Chandrasekhar *et al.,* 2006).

Fairbairn et al. 2010, dirigió un estudio sobre la potencial reducción de emisiones de CO2 de acuerdo con la metodología desarrollada por el marco de convenio sobre cambio climático de las Naciones Unidas y se llegaron a resultados donde la ceniza del bagazo de caña de azúcar mezclado con cemento reducía las emisiones de CO2 y en general mejoraba las prestaciones de los materiales cementicios.

El camino de la construcción con tierra pasa por trabajar e investigar en varios campos: la industrialización y mecanización para la optimización de procesos y la adición de materiales que aporten estabilización, durabilidad y protección frente a la humedad (Bestraten *et. al,* 2011). Con la industrialización de los materiales en base a paja de cereal y tierra se pueden mejorar las características naturales del material y garantizar unas calidades óptimas para su empleo y puesta en obra en un entorno urbano.

Paja de cereal, fibra lignocelulósica subproducto agrícola

La paja de cereal, como fibra lignocelulósica constituye una materia prima de bajo costo, abundante y renovable (Savastano *et al.,* 2003). En los países en desarrollo, el crecimiento de las industrias basadas en productos agro-forestales ha acelerado la producción de residuos como la cáscara de arroz, paja de trigo, paja de cebada, bagazo de caña, aceite de palma, avellanas etc. (Karade, 2010). Dentro de las fibras vegetales, se considera el uso de subproductos para poder alcanzar una tasa de reciclabilidad alta y así una cantidad máxima utilizable del capital natural disponible.

Esto es atractivo desde el punto de vista medio ambiental siempre que no comprometa la conservación del suelo, sabiendo que a nivel mundial existe una alta producción de cultivos herbáceos cereales, sobre todo de trigo, cebada y maíz, con la paja como subproducto más utilizado (Bowyer y Stockmann, 2001).

La paja, que es el tallo y material fibroso de la planta de cereal (Minke y Mahlke, 2005), es un material lignocelulósico generado en grandes cantidades como residuo de los cultivos de cereal. Después de la recolección del grano, una gran cantidad de paja queda disponible como residuo (Karade, 2010). Se ha reportado que la paja de cereal tiene una microestructura más complicada que la fibra de la madera y existe una mayor variedad en términos de tipo y tamaño de célula. La paja de cereal contiene entre 28-37% de celulosa, entre el 23-38% de hemicelulosa, entre 12-19% de lignina, 18% y entre el 0.5-14% de Sílice (Halvarsson *et al.,* 2004).

La paja ha sido utilizada desde la antigüedad en la construcción, en cubiertas, como material fibroso refuerzo en el adobe, en muros continuos de tierra para alivianarlos, etc. Hoy día se puede llegar a nuevas formas de uso de estas fibras, de manera estandarizada, de fácil puesta en obra, que gracias a una nueva homogeneización pueda posicionarse en el exigente sector de la edificación, sin ignorar los estándares de durabilidad y confort de la vivienda construida, donde el uso de residuos agro-industriales puede tener una contribución vital (Mathur, 2005).

Durante las dos últimas décadas se han publicado varios informes sobre el uso de residuos lignocelulósicos, incluido la paja de cereal, en la producción de compósitos de matriz inorgánica como el cemento portland, yeso o magnesita (Karade, 2010).La paja de cereal tiene características geométricas y mecánicas adecuadas como para hacer paneles con matrices cementicias, pero con problemas con la hidratación del cemento, teniendo en cualquier caso los requerimientos mecánicos, físicos y de durabilidad mínimos como para ser utilizado (Soroushian *et al.,* 2004).

El añadido de paja a un compósito ayuda a disminuir la factura por retracción y el tiempo de curado, y mejora la resistencia a compresión dentro de un ratio adecuado

de dosificación, además de mejorar el comportamiento mecánico del compósito (Li, 2005), mejorando la resistencia a cortante, la resistencia a flexión y la ductilidad (Bouhicha *et al.,* 2005). Las fibras son embebidas en la matriz y absorben el esfuerzo a cortante a modo de resistencia a tracción (Jamshidi *et al.,* 2010; Ghiassian *et al.,* 2008; Abtahi *et al.,* 2008). La mejora en la resistencia de los compuestos por el uso de refuerzos de fibra incrementa con el aumento en ratio del contenido en fibra, con el alto módulo de tensión de la fibra y la fricción entre la superficie de la fibra y el compuesto (Hejazi *et al.,* 2012).

La paja de cereal aporta al compósito baja densidad, y con ello aislamiento térmico (Bouhicha *et al.,* 2005). Recientes estudios indican como las propiedades de los compósitos pueden ser también mejoradas usando pulpa de material fibroso, ideal para el manufacturado de paneles delgados al hacer una distribución homogénea de la fibra en la matriz, aumentando la unión entre fibra y matriz, logrando una mayor eficiencia del refuerzo, un aumento significativo de la resistencia a flexión y rigidez, y una mejora en la durabilidad debido a la reducción de lignina y hemicelulosa en las fibras, lo que hace que se reduzca la degradación en matrices alcalinas (Savastano *et al.,* 2003).

En México la producción de cereales es la producción agrícola más importante según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera en su última edición del 2013, repitiéndose el esquema del trigo, el maíz y la cebada como cultivos con mayor producción. El trigo y la cebada crecen en varias partes del planeta sobretodo en climas templados. Se recolectan 1 o 2 veces al año. Debido al crecimiento de la agro-industria se ha acelerado la generación de estos residuos (Karade, 2010).

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Déficit de vivienda y calidad de hábitat construido en México y Latinoamérica

La calidad del hábitat construido y el acceso a una vivienda digna y de calidad no está garantizado de manera pareja en todo el entorno latinoamericano (Reyes,

2009). El crecimiento de la población y la migración desde las zonas rurales a zonas urbanas han agravado aún más el problema (González-Murillo, 2003). Según la Comisión Nacional de Fomento de la Vivienda en el 2006, la demanda habitacional, que tiene su origen en el comportamiento demográfico de la población, en un horizonte de 25 años (2005-2030) apuntaba a que se necesitará un promedio de 650 mil hogares nuevos por año. Con este ritmo, la demanda de vivienda alcanzó una cifra cercana a los 3.9 millones a finales del 2012, sumados a las 2.1 millones de familias que hoy requieren de habitación independiente. Esto representa un alto déficit de vivienda y la necesidad de impulsar la oferta de 6 millones de nuevas viviendas. Existe déficit de calidad y cantidad de vivienda, y el costo de materiales de construcción tradicionales es aún elevado para su uso a gran escala (Reyes, 2009).

La respuesta a esta demanda debe de ser a través de una construcción de calidad. Una vivienda digna, más allá de ser un techo donde cobijarse, debe implicar espacio suficiente, accesibilidad, seguridad, garantía de tenencia, estabilidad y durabilidad estructural, además de confort lumínico y termo-acústico. Se deben tener los servicios básicos necesarios (Agua/Saneamiento), además de un emplazamiento adecuado y precio razonable. Normalmente no se tienen resueltos los problemas mínimos de habitabilidad que confieran un confort interior adecuado y existen edificios residenciales que contienen una gran cantidad de químicos y metales pesados, que contaminan el ambiente interior y que pueden ocasionar diversos problemas de salud (Chikara *et al.,* 2009; Reboux *et al.,* 2011).

Para la resolución constructiva del hábitat construido, muchas veces se intenta adoptar sistemas o tecnologías importadas, no propias, que suponen alto consumo de energía y materiales y que son incompatibles con las propiedades físicas de los materiales locales, muchas otras veces, con el uso de materiales locales, no se logra garantizar funcionalidad adecuada en términos de durabilidad y alto costo de mantenimiento (Mathur, 2005).

1.1.2 Impacto ambiental de sector de la construcción

La industria de la construcción es una de los mayores y más activos sectores en crecimiento a nivel mundial. El sector de la construcción, según la OCDE en 2003, por acciones directas o indirectas, consume más del 40% de la energía producida y es responsable del 30% de las emisiones de CO2, por acciones directas o indirectas y consume más materia prima que ninguna otra actividad económica (Alrededor de 3000 Mt/año, casi el 50% del total en peso) (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012). Este impacto ambiental del sector de la edificación lo identificamos con el consumo de recursos no renovables, la generación de residuos contaminantes que conllevan la aceleración de la destrucción del stock de capital natural por degradación entrópica (Wadel et al., 2010), acrecentado por el actual continuo crecimiento de la población y sus necesidades en términos de edificación e infraestructura (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012).

Por otro lado, existe una gran dispersión de materiales y sistemas constructivos que coexisten en el mercado y forman parte de las obras, lo cual dificulta las acciones que permitan cerrar los ciclos materiales como condición de sustentabilidad (Wadel *et al.,* 2010). El manejo de materiales no locales influye en el costo energético por transporte (Berge, 2001) y la industria de la construcción apenas presta atención a productos o materiales de construcción renovables, naturales y locales.

1.1.3 Compuestos arcillosos estabilizados por medio del uso de puzolanas, provenientes de residuos agrícolas, combinadas con cal

La construcción con tierra puede traer una serie de problemas/desventajas como material de construcción urbana (menos durabilidad en comparación con otros materiales convencionales, puesta en obra intensiva, mala reacción ante terremotos, limitaciones estructurales, necesidad de alto mantenimiento, el conllevar proyectos menos rentables, ciertas dificultades a la hora de ser revocados, el no ser materiales estandarizados y adecuados, en principio, sólo para construcción “in situ”. (Zami y Lee, 2010; Mathur, 2005). Los aspectos económicos de la construcción con tierra dependen

de aspectos como la técnica de construcción, especialmente de los costos de la puesta en obra, el proceso de estabilización, la durabilidad y las necesidades de reparación (Zami, Lee, 2010). En referencia a los niveles de resistencia característica de la tierra, las fuentes son muy variables y no se tiene un conocimiento riguroso de los métodos de ensayo (Bestraten *et al.,* 2011).

La resistencia y propiedades de los materiales de tierra necesitan ser mejoradas, y esto se puede lograr mediante la estabilización, que puede ser resuelto con el uso de fibra o con el uso de aditivos que suelen estar basados en cemento, cal o puzolánicas (Metacaolín, cenizas volantes, cenizas de cáscara de arroz, cenizas de bagazo, etc.), que aglutinan las partículas del suelo a través de una reacción química. El producto final es parecido, basado en componentes silicios y cálcicos (Cristelo *et al.,* 2012), pero el problema es que hay garantizar la durabilidad y estabilidad estructural a lo largo del tiempo y sin entrar en conflicto por el uso aglutinantes de alto impacto ambiental.

Una preocupación clave en el uso la paja en matrices de tierra estabilizada tiene que ver con los términos de durabilidad a largo plazo debido a la debilidad entre la célula de la fibra, el ataque alcalino con ciertos estabilizantes y la sensibilidad a la humedad. Hay investigaciones dirigidos a solventar estos problemas con el pre-tratamiento de fibras y también con el uso de matrices de baja alcalinidad (Marthur, 2005). Aunque la paja de cereal puede ayudar en evitar las fracturas por retracción y aportar aislamiento térmico, al reducir la densidad (Minke, 2006), su uso puede afectar la resistencia a compresión (Binici *et al.,* 2005) y conllevar problemas de durabilidad, en lo cual también influye el tamaño del elemento constructivo y la relación ideal entre la densidad y propiedades físicas del compuesto y sus propiedades estructurales y de durabilidad (Minke, 2001).

1.1.4 Paja de cereal como fibra vegetal lignocelulósica subproducto agrícola y los materiales de construcción

A nivel mundial existe una alta producción de cultivos herbáceos cereales, sobre todo de trigo, cebada y maíz, con la paja como el subproducto más conocido y utilizado

(Bowyer y Stockmann, 2001). Actualmente estos residuos son incinerados o depositados en el campo y esto puede ocasionar varios problemas ambientales como la contaminación del aire, la emisión de gases con efecto invernadero y la ocupación de terreno fértil (Karade, 2010). Además, la biodegradación de los residuos lignocelulósicos en los vertederos emite metano, un gas efecto invernadero 72 veces más perjudicial que el CO2 y a veces el compostaje y la quema de estos residuos no es posible por legislación (Leliveld y Crutzen, 1992).

La paja de cereal es abundante pero con ciertos problemas como material de construcción: Bajo módulo de elasticidad, alta absorción de agua, susceptibles a ataques de hongos y plagas, poca durabilidad y descomposición en ambientes alcalinos, inestabilidad dimensional y variable propiedades físico-mecánicas (Karade, 2010).

La paja se puede procesar como tablero, en formato de fibra o partícula, pero su fabricación tiene un gasto extra de energía en el proceso, en la producción de las resinas mismas, en el corte de las partículas, en la mezcla con la resina, así como en el proceso de compresión y secado. En la mayoría de los casos, el uso de agua y, sobre todo, la problemática del uso de derivados de los formaldehídos o resinas sintéticas como aglutinantes, es mayor que en el caso de las fibras madereras (Wooley *et al.,* 1997). Existen estudios sobre paneles mediante paja comprimida sin uso de formaldehídos en el proceso de compactación, pero por sus características son sólo indicados para interiores.

El problema básico a resolver es la incógnita de si la paja de cereal existente en un entorno geográfico cercano, con sus características peculiares y únicas, cumple con los requisitos mínimos como fibra reforzante en paneles con matriz en base a tierra, cumpliendo con características adecuadas en cuanto a sus dimensiones, densidad, contenido de humedad, capacidad de absorción, capacidad de desorción, capacidad que tenga de mineralizar sus partículas, así como resistencia a tracción, básico para comprender y aceptar por bueno su comportamiento como refuerzo dentro de un compósito. Con respecto a esto, ciertos estudios han informado que la paja tiene una

microestructura más complicada que la de la madera, aunque esto es solucionable con ciertos tratamientos. Hay que seguir estudiando en cómo afecta las condiciones de almacenamiento y su duración en las características de la fibra y en como parar su degradación (Karade, 2010).

1.2 Justificación

1.2.1 Necesidad de mejora de la calidad del hábitat construido y una solución del déficit de vivienda

Con la presente propuesta de investigación se pretende desarrollar un nuevo componente constructivo que apoye la calidad del hábitat construido desde su buen comportamiento termo-acústico y el bajo coste, y que sea compatible con propiedades estructurales y durabilidad como para constituirse en una alternativa que apoye a la solución del déficit de vivienda hoy día existente. Los materiales en base a tierra y paja tienen la capacidad de equilibrar la temperatura y controlar la humedad relativa interior (Minke, 2001), logrando mantener un equilibrio interior entre 40 y 60%, lo que es beneficioso para la salud (Morton, 2008). Estos materiales cumplen con un buen aislamiento acústico (Piattoni *et al.,* 2011; Jiménez y Cañas, 2006; Lima *et al.,* 2012) y se conoce que la construcción con tierra no está asociada con efectos adversos de componentes orgánicos volátiles en ambientes interiores (VOCs), aportando buena calidad del aire interior (Wargocki *et al.,* 1999). La tierra como material se considera prácticamente incombustible, no propaga el fuego y no emite gases tóxicos. La resistencia al fuego de los muros de tierra se debe considerar de REI 90 para espesores iguales o mayores a 150 mm (Bestraten *et al.,* 2011).

1.2.2 Necesidad de reducción del impacto ambiental de sector de la construcción

Con la presente propuesta de investigación, se pretende analizar un modelo de producción arquitectónica desde una organización basada en la ecología industrial, que compara los sistemas industriales con los ecosistemas naturales, donde los residuos de una actividad, como la agrícola y la industria, puedan ser considerados recursos en otra. Con el desarrollo de los paneles prefabricados compuestos a partir de paja de

cereal y tierra estabilizada, se plantea una concepción sustentable de la construcción industrializada, apostando por soluciones que trabajen desde la eficiencia energética, utilizando materiales procedentes de recursos renovables, locales o reciclados/reciclables y evitando el uso materia prima o componentes de alto impacto ambiental.

La energía incorporada primaria en la construcción en base a tierra puede ser la mitad de una construcción convencional, e igual puede suceder con la producción de emisiones de CO2 equivalente (Lourenço, 2002) y el empleo de materiales reciclados ayuda a reducir otros dos grandes impactos medioambientales derivados de la actividad humana, el ingente consumo de recursos materiales y la masiva generación de residuos (Alba *et al.,* 2012). En un momento de conciencia del agotamiento de los recursos, del alto consumo energético, de que estamos llenando los vertederos, de que el planeta está siendo contaminado y que los recursos no renovables no durarán para siempre, existe la necesidad de materiales medioambientalmente amigables.

El aumento en el consumo de productos forestales puede ocasionar la escasez de estos recursos, por lo que ciertos autores apuntan a que hay que hacer esfuerzos en el uso de materia prima como los residuos lignocelulósicos como alternativa. La industria de la construcción consume grandes cantidades de material y el uso de materiales lignocelulósicos puede ser una alternativa para su eliminación como residuo (Karade, 2010). Las fibras toman importancia como parte de los denominados “eco-compósitos” en la industria moderna (Hanafi y Few, 1998) habiendo sido usado desde hace tiempo en compósitos de cemento y bloques de tierra en países en desarrollo por su disponibilidad y bajo costo (Jamshidi *et al.,* 2010; Ghiassian *et al.,* 2008; Abtahi *et al.,* 2008).

1.2.3 Necesidad de investigación sobre la estabilización de un compuesto arcilloso por nuevos métodos de combinación de puzolanas y cal

El uso de la tierra en la construcción constituye una oportunidad de reducir el impacto ambiental en la edificación, fuente de abastecimiento de material ilimitada,

permitiéndonos la posibilidad, incluso, de utilizar tierra de las propias excavaciones, favoreciendo la reducción de residuos de la obra y los gastos de transporte de material. Es necesario analizar los tipos de tierra que se pueden incorporar como matriz del panel y analizar mejoras a nivel granulométrico y de composición.

Los procesos de producción son sencillos, sin necesidad de cocciones que generan combustiones y un alto consumo energético. No se producen emisiones toxicas durante el proceso de transformación ni durante su vida útil. El lugar de extracción puede ser el mismo emplazamiento de la obra, de forma que el impacto ambiental durante el transporte y el impacto paisajístico en la producción se puede reducir a cero. Los restos de material desechados (piezas rotas o sobrantes) se pueden reintegrar en el mismo emplazamiento, sin generar residuos. En caso de un material estabilizado con cemento o cal, u otro estabilizante, la proporción del estabilizante recomendada (5-10%) es suficientemente baja como para no suponer ningún riesgo para el entorno natural, por lo se permite la regeneración de suelos y de la masa vegetal (Bestraten *et al.,* 2011). La construcción con tierra puede reusar millones de toneladas de residuos de suelo y otros materiales como el yeso producidos en la ciudad (Morton, 2008).

Se considera necesaria esta investigación para que se sume a otros estudios sobre el uso de fibras vegetales en sus diferentes formatos, ya desarrollados en otros países, pero adaptándolo a la realidad regional mexicana y en combinación con una matriz en base a tierra estabilizada. El proyecto propone adquirir el desarrollo tecnológico suficiente como para procurar la utilización de productos manufacturados prefabricados, a partir de paja de cereal y tierra estabilizada, disponibles a escala regional, lo que supone un aporte innovador en el campo de la construcción sustentable y el desarrollo sustentable en México. Esto supondrá un aporte básico en la tarea de identificar las posibilidades de aprovechamiento de la paja de cereal como subproducto agrícola en un entorno como el de México con sus requerimientos específicos para su uso en paneles prefabricados aplicables en la vivienda.

1.2.4 Necesidad de análisis de la paja de cereal como material de construcción

Las fibras vegetales, como la paja de cereal, son materias primas que pueden ser rentables comparadas con otro tipo de materiales, pueden aportar aislamiento térmico y reducción del peso de la construcción (Khedari *et al.,* 2005), pero para el desarrollo, promoción y valoración del uso de fibras vegetales, en concreto de la paja de cereal, y su incorporación a sistemas constructivos como componentes prefabricados, se hace necesario la investigación de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como de su compatibilidad e idoneidad en combinación con la tierra y sus estabilizantes.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis

Un panel termo-acústico prefabricado compuesto a partir de un compuesto arcilloso estabilizado reforzado con paja de cereal, cumple con los requerimientos físicos, mecánicos y de durabilidad como para su aplicación dentro de un sistema constructivo industrializado en vivienda.

2.2 Objetivo general

Desarrollar un panel prefabricado termoacústico mediante un bio-compuesto arcilloso estabilizado reforzado con paja de cereal y probar sus prestaciones termo-acústicas, mecánicas y de durabilidad como para aplicarlo dentro de un sistema constructivo industrializado en vivienda.

2.3 Objetivos específicos

- Caracterizar la paja de cereal y la matriz de suelo arcilloso estabilizado, garantizando las compatibilidades entre fibra, suelo y agentes estabilizantes y determinar su idoneidad como partes del compósito a partir del cual se pretende desarrollar el panel prefabricado.

- Definir y caracterizar el compuesto y sus diferentes dosificaciones a ensayar, teniendo en cuenta las diferentes relaciones aglomerantes/arena, fibras/aglomerantes, fibras/agua.

- Experimentar una serie de combinaciones propuestas de compuestos a partir de la primera caracterización del mismo y sus diferentes dosificaciones como para obtener unas conclusiones sobre las características de este y así poder proponer una tipología de panel.

- Proponer una tipología de panel prefabricado a partir de paja de cereal y suelo arcilloso estabilizado y probar sus prestaciones termo-acústicas, mecánicas y de durabilidad como para aplicarlo dentro de un sistema constructivo industrializado en vivienda y llegar a conclusiones sobre esta aplicación.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Vivienda y hábitat construido

La vivienda es un derecho básico de acuerdo al Pacto Internacional de Derechos Económicos, Culturales y Sociales firmado en el 2012 por los estados miembros de la Organización de la Naciones Unidas (ONU).

Se considera la vivienda "dentro del proceso de apropiación del objeto construido por parte de la unidad familiar, base en los requerimientos y posibilidades de la misma (Torres, 2011). La vivienda se considera el hábitat o unidad básica habitacional de la familia, núcleo de la sociedad, con la función de brindar un refugio seguro y confortable a sus habitantes, y siendo lugar donde se lleva a cabo otras actividades para satisfacer las necesidades familiares e individuales (Gómez y Horta, 2014).

Walter Gropius en 1930 plantea que la vivienda debe "establecer el mínimo elemental de espacio, aire, luz y calor indispensables al hombre para poder desarrollar completamente sus funciones vitales sin restricciones debidas". La vivienda se debe plantear como un servicio para sus habitantes y no viceversa. Se debe cuidar la temperatura ambiente interior confortable y la base modular de intensidad de luz natural. (Salas y Oteiza, 2009).

La vivienda, como acción edificatoria, debe estar ligada a la utilidad social de satisfacer las necesidades de cobijo, la habitabilidad, ligada a la idea de vivienda digna y adecuada. Normalmente la habitabilidad responde ante unos mínimos normativos y se plantea resolverla sin considerar los recursos y residuos implicados. Existe diversidad de configuraciones de la habitabilidad según condiciones materiales ajustadas a condiciones y necesidades concretas, y desde el punto de vista de la sostenibilidad, debería estar supeditada al cierre de los ciclos materiales y vinculada a precios para proveerla y mantenerla en el tiempo, teniendo en cuenta la eficiencia en el uso de los recursos y las emisiones de CO2 consecuencia de su construcción, uso y demolición (Arcas *et al.,* 2010). En la vivienda deben plantearse nuevas soluciones

constructivas, se deben cumplir las exigencias básicas en cuanto al confort termo-acústico, la salubridad y el ahorro de energía, lo que está ligado íntimamente a la envolvente (Alba *et al.,* 2012).

En los países industrializados se tienen mercados de vivienda basados en la oferta en lugar de en la demanda y emergencia. Es en las economías emergentes y en países en vías de desarrollo donde se da una abrumadora y urgente necesidad de vivienda (Salas y Oteiza, 2009). El déficit de viviendas y su alto coste obligan a vivir en precariedad y los métodos tradicionales de construcción se muestran impotentes para afrontar esta situación, lo que lleva a la necesidad de investigar todo material y elemento o sistema constructivo que ayude a paliar esta problemática, en búsqueda de una integración social por medio de una vivienda digna. En general, existe la necesidad de soluciones rápidas para paliar el problema de alojamiento en las grandes ciudades, cada vez más colapsadas debido al crecimiento demográfico y tendencia de la población rural a establecerse en la ciudad, generándose un importante déficit de alojamiento urbano, que lleva al planteamiento de una arquitectura racionalizada, normalizada y estandarizada (Cassinello, 2008).

En general, la edificación residencial es poco permeable a los avances técnicos, con cierto anacronismo dentro del modelo actual donde la innovación es una necesidad permanente de la empresas que garantiza su propia pervivencia (Pich-Aguilera *et al.,* 2008).

3.2 Diagnóstico sobre la vivienda en México

La vivienda y su precariedad es actualmente uno de los problemas más graves de las ciudades latinoamericanas, basado en una gran demanda y los pocos recursos de la población para acceder a ella (Sánchez, 2012). En Europa el 80% de la población vive en ciudades; en Latinoamérica, el 70%. La diferencia radica en la elevada tasa de crecimiento de esta última y en su inequidad entre clases sociales que se acentúa progresivamente, siendo la más diferenciada del mundo según el informe de la CEPAL de 2012. Esto ha llevado a las principales ciudades latinoamericanas a tener carencia de vivienda y exceso de población de escasos recursos como demandantes de ésta.

En el caso de México, tras la industrialización de los años 30, las principales ciudades del país sufrieron consecuencias muy parecidas a las del resto de Latinoamérica. La población rural se desplazó a las ciudades y el crecimiento demográfico urbano se disparó (Sánchez, 2012). México comienza el siglo XXI con una sociedad principalmente urbana. En las ciudades mexicanas se concentra alrededor de tres cuartas partes de la población. Durante los últimos 30 años, la expansión territorial de las ciudades ha dado lugar a un modelo de ciudad discontinua, dispersa y de baja densidad (ONU-HABITAT, 2011).



Fig. 3.2.1. Porcentaje de población urbana en México.

En México, la vivienda es el ámbito familiar por antonomasia, y representa el activo fijo más importante para las personas y familias. En el territorio nacional existen 28.1 millones de viviendas particulares habitadas (INEGI, Censo General de Población y Vivienda 2010). El grado de felicidad de una persona está sujeto a múltiples variables y aspectos, uno de ellos es la vivienda (Estado Actual de la Vivienda, 2013).

El problema de la vivienda es causado por el desmedido crecimiento demográfico, por la migración descontrolada, el ineficaz sistema financiero, la inadecuada legislación y el deficiente sistema administrativo a la hora de desarrollar planes de vivienda íntegros (Sánchez, 2012). Según el diagnóstico realizado para el Plan de Desarrollo Nacional en el 2013, en México el 46.2% de la población vive en condiciones de pobreza y el 10.4% de extrema pobreza, teniendo un acceso limitado a una vivienda digna, sin ingresos suficientes para ejercer al menos uno de sus derechos sociales entre los que se encuentra la calidad y espacios de la vivienda y sus servicios básicos. Unos 2.5 millones de personas carecen de un acceso a servicios básicos en la vivienda. En 2010, esta carencia afectó a 9.4% de la población en localidades urbanas, mientras que en zonas rurales se presenta en 50.4%. Existen 2.8 millones de viviendas que necesitan ser reemplazadas y 11.8 millones que requieren mejoramiento o ampliación. Se estima que en los próximos 20 años se demandarán 10.8 millones de soluciones de vivienda debido a la creación de nuevos hogares. En el 2013, 92,538 familias demandaron una vivienda con mejores atributos en relación a su vivienda actual (Estado Actual de la Vivienda, 2013).

“Una sociedad no puede desarrollarse sustentablemente si la gran mayoría de sus miembros no puede satisfacer sus necesidades básicas mientras otros viven en la opulencia. Las estimaciones más recientes muestran que la mitad de la población se encuentra en condición de pobreza patrimonial, y 21 millones de personas subsisten en condición de pobreza alimentaria” (ONU-HABITAT, 2011).

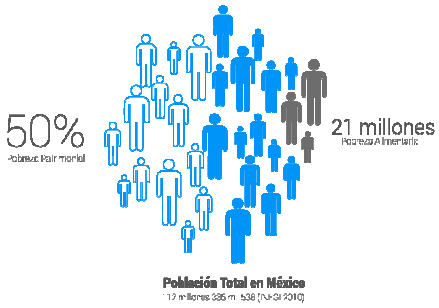


Fig. 3.2.2. Porcentaje de población en pobreza patrimonial.

La calidad del hábitat construido y el acceso a una vivienda digna en México son prioridades nacionales según el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, en su estrategia 2.5.2. Una vivienda digna, además de proporcionar el espacio suficiente, accesibilidad, seguridad, garantía de tenencia, estabilidad y durabilidad estructural, ha de ser confortable ambientalmente para distintas condiciones higro-térmicas exteriores.

A pesar de los apoyos que surgieron para dotar de vivienda al sector más vulnerable de la población con programas creados por gobierno, el trabajo realizado por diferentes inmobiliarias no ha sido el adecuado para solucionar el problema. En el 2010, INFONAVIT reveló que dos de cada diez viviendas financiadas por este instituto se encontraban deshabitadas, entre algunas de las razones se encuentran: 38% no dispone de los servicios básicos; 31% se encuentran lejos del trabajo, de la escuela o de la familia; 10% es por razones de inversión; 10% porque resultan muy pequeñas; y 3% por inseguridad; en algunos casos la lejanía de los nuevos desarrollos habitacionales representan un gasto de más del 50% del ingreso familiar en transporte (ONU-HABITAT, 2011).

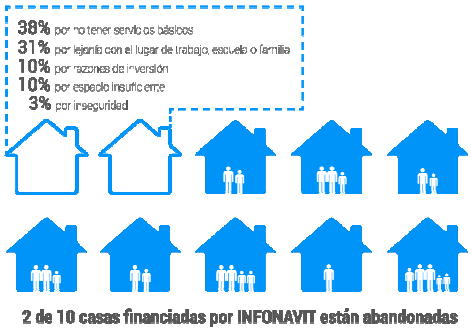


Fig. 3.2.3. Porcentaje de viviendas abandonadas en México.

Según el Estado Actual de la Vivienda 2013, una investigación hecha por la UAM en el 2009, demuestra que la mayor parte de la expansión reciente de las ciudades estuvo acompañada de la edificación de desarrollos habitacionales cada vez más lejos del tejido urbano. Mientras más reciente su construcción, más lejos se localiza. La vivienda es una necesidad primordial de la población y es la causa principal de la expansión de la mancha urbana (Sánchez, 2012). “Entre otras causas, la expansión territorial de las ciudades se debe a una deficiente regulación del suelo y a una reducida oferta de suelo formal para los hogares de menor ingreso. Ya sea que se trate de la ubicación periférica de asentamientos precarios o de zonas residenciales para hogares de altos ingresos, este crecimiento genera externalidades negativas de tipo ambiental, económico y social. Durante los últimos 20 años, las periferias de las ciudades mexicanas se han transformado al hacerse más heterogéneas. Los asentamientos precarios frecuentemente ocupan zonas alejadas (sin infraestructura ni servicios), zonas de riesgo (zonas inundables, derechos de vía, barrancas) o áreas de protección ecológica, lo que da lugar a una segregación pasiva. Se ha calculado que 90 mil hogares al año se establecen en zonas no aptas para la vivienda, en condiciones

muy precarias, y donde se ha comprobado que cuesta entre 2 o 3 veces más introducir servicios" (ONU-HABITAT, 2011).

Las viviendas en hacinamiento ascienden a 551.800 en todo el país. Las edificadas con materiales precarios en paredes o techos y de reemplazo inmediato suman 1.140.840, por lo que el rezago básico es de 1.692.640 viviendas. Las construidas con materiales regulares contabilizan 7.254.085 unidades. La compra de una casa es una inversión a largo plazo que busca un aumento en el patrimonio familiar (Sánchez, 2012).

Según las estimaciones de CONAPO, entre 2010 y 2030 la población del país se incrementará en casi 15 millones de personas. En el año 2005 en México existían 56 zonas metropolitanas donde se concentraban 57,9 millones de habitantes, es decir, el 56,0 % de la población total. Aproximadamente para el año 2030 se espera que el 57% de los mexicanos se asienten en 36 núcleos de población con más de 500 mil habitantes. En el año 2030 el 82% de la población total se asentará o habitará en localidades urbanas. Las estadísticas de CONAPO señalan que la demanda de vivienda seguirá aumentando y, por ende, la cantidad de viviendas con que se contará para el año 2030 será aproximadamente de 38 millones, lo que significaría un aumento de casi 12 millones de viviendas. Pensando en la proyección de que se construirán casi 40 millones de viviendas más en los futuros 30 años (Sánchez, 2012). "En el país existen drásticas disparidades regionales entre el norte y sur que se manifiestan al analizar la concentración de población, la generación de riqueza, la disponibilidad de agua, la marginación urbana, el desarrollo humano, y las desigualdades en la concentración del ingreso", "aunque se observan algunas tendencias positivas, la distribución del ingreso y la marginación urbana en México siguen siendo elevadas. El 10% de la población

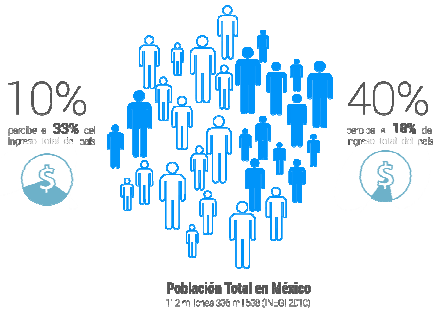


Fig. 3.2.4. Porcentaje de percepción de ingresos en México.

más rica recibe 33% del ingreso del país, mientras que el 40% más pobre de la población percibe tan sólo 18% del ingreso total" (ONU-HABITAT, 2011).

Para el año 2050 habrá 166 millones de habitantes en el país y en los próximos 30 años se construirá el 35% de las viviendas que hoy existen en México. Para la tercera década del presente siglo, en México habrá casi 40 millones de hogares. El crecimiento de este sector será continuo durante los siguientes años dado que los ámbitos urbanos consumen el 50% de los recursos energéticos del país, el sector tiene un gran potencial de ahorro energético y optimización de uso de recursos. Los beneficios de construir de forma sustentable son muchos y aumenta la plusvalía de los desarrollos habitacionales (Hinojosa, 2012).

"Históricamente, más del 60% de la población con ingresos menores a tres salarios mínimos, está excluido de los Programas Institucionales de Suelo Urbanizado y de Vivienda. Esta población desarrolla procesos irregulares de poblamiento y autoproducción de su hábitat. Sin embargo, este poblamiento representa más de 65% de las viviendas de todo el país". "La vivienda de autoconstrucción se define básicamente como aquella vivienda construida por el mismo habitante, sin ningún factor político, legal y económico que lo respalde. Esta autoconstrucción y la falta de políticas públicas eficientes causan la generación de "viviendas informales", es decir, aquellas viviendas que se construyen con materiales de calidad insuficiente, según los estándares del país. El efecto sobre la pérdida de ingresos ha venido acentuando el deterioro de la calidad de vida. La vivienda se va construyendo progresivamente en función del recurso económico con el que cuenten y tomando en cuenta la cavidad para nuevos miembros de su familia". Las "viviendas informales" son erigidas con materiales reciclados o de desperdicio que los habitantes van recolectando de diferentes maneras, lo que hace que carezca de una estructura formal. Principalmente la autoconstrucción de la "vivienda informal" empieza con elementos como polines o tablones de madera forrados con láminas de cartón, asbesto o plásticos para crear una envolvente que funciona como cuarto." (Sanchez, 2008).

“El crecimiento poblacional durante los últimos cuarenta años ha generado problemas en el sector de la vivienda (déficit cuantitativo y cualitativo)3, y ante la imposibilidad de los organismos encargados de apoyar al sector de la población más vulnerable con programas habitacionales y regular el crecimiento urbano, los pobladores de bajas condiciones socioeconómicas han visto como única alternativa a su problema de suelo y vivienda, la invasión o apropiación ilegal urbana y la autoconstrucción de vivienda”. La urbanización de la pobreza en México es visible en las modalidades de ocupación irregular de la tierra y en las actividades económicas, así como en la creciente exclusión social y la degradación del medio ambiente. Lo anterior surge ante la imposibilidad de dichas familias de bajos ingresos económicos, generalmente empleada en el mercado informal, de acceder a los sistemas de financiación hipotecaria de la vivienda del sector formal, donde se tiene la participación de profesionales de la construcción, arquitectos e ingenieros, así como de la economía estructurada y el acato a las normas”. “Por su parte, la construcción informal de la vivienda popular se distingue por la falta de contratos que regulen la calidad de la obra conforme a las normas de construcción y urbanización y den legalidad a la propiedad; estas viviendas generalmente son realizadas por los propios usuarios –autoconstrucción- sin proyectos arquitectónicos previos, en predios sin legalidad de tenencia, sin disponibilidad de servicios básicos y adecuada accesibilidad” (Argüello, 2010).

En México, el derecho a la vivienda se establece en el Artículo 4, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (2013), en donde se afirma que “Toda familia tiene derecho a disfrutar de vivienda digna y decorosa”. Según el Estado Actual de la Vivienda 2013, el derecho humano a la vivienda, reconocido en el artículo 4° de la Constitución y regulado por el Pacto Inter nacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (PIDESC), de Naciones Unidas, del que México es adherente desde 1981, se enfrenta para su pleno cumplimiento a diversos obstáculos y limitaciones.

En la Constitución se establece el derecho a una vivienda digna. Para el Comité de Derechos Urbanos de Naciones Unidas en su Observación General 4 (1991), define y aclara lo que significa una vivienda digna o adecuada: “en la actualidad una vivienda no se debe interpretar en un sentido restrictivo simplemente de cobijo sino que, debe considerarse más bien como el espacio donde los individuos o las familias puedan vivir en seguridad, paz y dignidad”. La adecuación de una vivienda va a estar determinada en parte por factores sociales, económicos, culturales, climatológicos, ecológicos y de otra índole, aun así, es posible identificar algunos aspectos externos que ayudan a obtener una vivienda digna en cualquier espacio geográfico; entre estos aspectos figuran los siguientes (ONU, 1991).

“En México, 2 de cada 10 hogares (6.3 millones de un total de 31.4 millones) t i e n e acceso a l sector formal de financiamiento, mientras que el resto tendrá que buscar fuentes alternativas para obtener una vivienda, o bien, mejorar su condición actual con la finalidad de obtener el crédito hipotecario en el futuro”. “La Política Nacional de Vivienda (PNV) de la actual administración busca atender en forma integral las necesidades de vivienda que existen en el país, al tiempo de reordenar los instrumentos con que cuenta para ello. En los últimos anos, la política en esta materia permitió consolidar la modernización operativa y financiera de las entidades de fomento y financiamiento a la vivienda, canalizando recursos al sector como nunca antes. Sin embargo, se observa una falta de articulación de los programas para lograr la máxima efectividad de los distintos esfuerzos de promoción que se llevaron a cabo. Entre los aspectos que requieren mayor atención están la planeación y el control en el crecimiento urbano, la calidad de la infraestructura y los servicios en los conjuntos habitacionales, así como una cobertura amplia en cuanto a tipos de solución de vivienda promovidas, y segmentos de población atendidos. La nueva política se centra en cuatro estrategias: fortalecer la coordinación institucional; utilizar el financiamiento a la vivienda para orientar el desarrollo urbano; reducir el rezago habitacional, y; fortalecer las acciones de mejoramiento a la vivienda, en el ámbito urbano y rural” (Estado Actual de la Vivienda en México, 2013).

Calidad de la construcción y los materiales en las viviendas

El crecimiento poblacional durante los últimos cuarenta años ha generado problemas en el sector de la vivienda y ante la imposibilidad de los organismos encargados de apoyar al sector de la población más vulnerable con programas habitacionales y regular el crecimiento urbano, los pobladores de bajas condiciones socioeconómicas han visto como única alternativa a su problema de suelo y vivienda, la invasión o apropiación ilegal urbana y la autoconstrucción de vivienda, construcciones que se distinguen por la falta de contratos que regulen la calidad de las obras conforme a las normas de construcción y urbanización. Dicho fenómeno de autoconstrucción tiene como característica la mala calidad estructural de la vivienda, hacinamiento y escasez de servicios básicos, además de la precariedad de los materiales empleados, los cuales al ser empleados sin especificaciones técnicas y la falta de mantenimiento provoca el deterioro paulatino de la vivienda reduciendo su vida útil (Argüello, 2010).

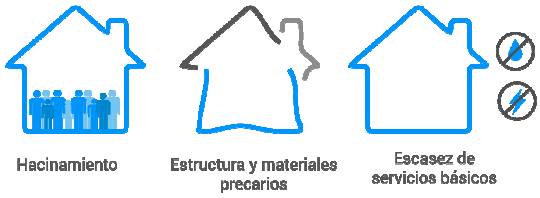


Fig. 3.2.5. Problemas actuales en la vivienda en México.

Según datos de INEGI del 2010, el porcentaje de viviendas particulares habitadas con materiales durables en muros (tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto) es de 86.3%; las viviendas particulares habitadas con materiales durables en techos (losa de concreto, tabique o ladrillo, vigueta y bovedilla, terrado con viguería) es de 71.6%; y las viviendas particulares habitadas con recubrimientos en pisos (cemento, firme, madera, mosaico u otros) es de 93.8%.

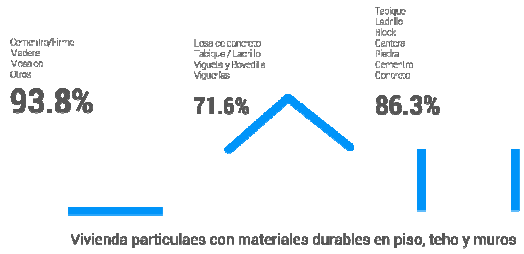


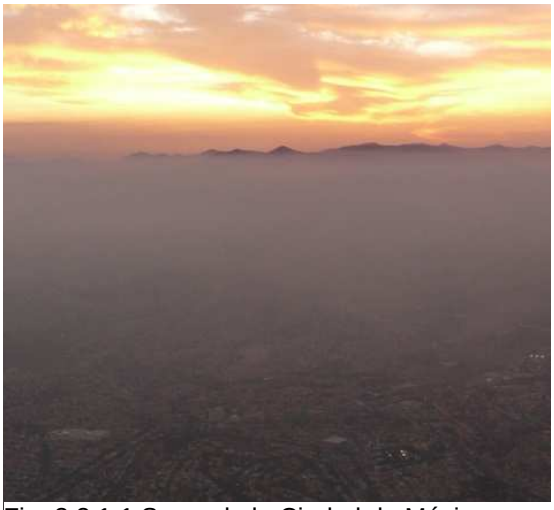
Fig. 3.2.6. Porcentaje de uso de materiales durables en México.

3.3. Construcción sustentable

3.3.1 Contexto ambiental

Es hasta 1987, con la aparición del informe “Nuestro futuro común” (Informe Bruntland) desarrollado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de la Organización de las Naciones Unidas, cuando se produce un primer acuerdo mundial sobre la concepción contemporánea del problema ambiental, sobre las causas de la degradación del medio natural en el que estamos inmersos, y cuando se da la incorporación del concepto de sostenibilidad, más concretamente de desarrollo sostenible, al ideario de muchas disciplinas, entre ellas también la arquitectura.

Hoy día, el modelo productivo predominante tiene origen en la revolución industrial. Anteriormente, la sociedad se caracterizaba por hacer uso de recursos biosféricos, ajustándose, casi siempre, a la capacidad de la naturaleza para producirlos, asimilando los residuos generados.


Fig. 3.3.1.1 Smog de la Ciudad de México

En general, los grandes corporativos que dirigen la actual actividad industrial no han prestado la debida importancia a cómo se da la interacción entre la actividad humana y el medio ambiente, y no se han preocupado de los impactos sociales, económicos y medio ambientales consecuentes a largo plazo. Nuestro actual modelo de desarrollo está guiado por un consumo basado, principalmente, en la combustión de combustibles fósiles, y conlleva un agotamiento de los recursos naturales y una contaminación que condicionan el bienestar de las generaciones presentes y futuras. Este modelo, desentendido de su relación con el deterioro ecológico, se pone en crisis a partir del informe “Los límites del Crecimiento” encargado al Massachusetts Institute of Technology (Meadow *et al.* 1972).

Con la disposición indiscriminada de fuentes de energía se ha permitido acceder masivamente a los recursos con indiferencia respecto a su procedencia y distancia de origen. Estamos inmersos en una espiral de crecimiento ilimitado en el consumo de recursos y en la consiguiente generación de residuos (Cuchí, 2005). La aceleración del consumo de recursos, bajo una desigual estructura de acceso a ellos, la explosión demográfica y la extensión del transporte horizontal dan lugar a una organización cultural, la sociedad industrial, donde cada material extraído de la litosfera acaba degradado, en una secuencia lineal extracción-fabricación-uso-residuo, que conlleva una transformación de recursos en desperdicios y, con ello, una disminución del stock de capital natural con que cuenta el planeta (Wadel *et al.,* 2010).

El sistema de producción natural, por el contrario, hace que el planeta no genere residuos, sino que recicla la materia constantemente, empleando en ello energía también renovable. La biosfera, litosfera e hidrosfera funcionan como grandes depósitos, zonas de tránsito y transformación de materiales que aprovechan el movimiento del agua, en su ciclo entre la biosfera y la atmosfera producido por la energía solar y la gravedad, así como las transformaciones materiales que produce la energía geotérmica en la litosfera y el fondo de la hidrosfera (Fernández, 2007). En la Biosfera se llega a alcanzar un metaequilibrio a nivel ecosístemico.

Desde el presente texto, se pretende superar la idea de que existe un sistema natural y un sistema industrial totalmente separados, si no entrelazados y vinculados. Con la idea de la ecología industrial se pretende entender y conducir el dialogar de este sistema industrial en conjunto con el sistema natural.

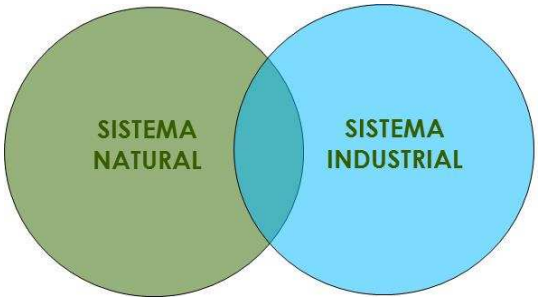


Fig. 3.3.1.2 Diagrama concepto Sistema Natural + Sistema Industrial

3.3.2 Ecología Industrial

El sistema de producción natural, por el contrario, hace que el planeta no genere residuos, sino que recicla la materia constantemente, empleando en ello energía también renovable. La biosfera, litosfera e hidrosfera funcionan como grandes depósitos, zonas de tránsito y transformación de materiales que aprovechan el movimiento del agua, en su ciclo entre la biosfera y la atmosfera producido por la energía solar y la gravedad, así como las transformaciones materiales que produce la energía geotérmica en la litosfera y el fondo de la hidrosfera (Fernández, 2007). En la Biosfera se llega a alcanzar un metaequilibrio a nivel ecosístemico.

Se parte del término “ecología natural”, rama de la biología que estudia las relaciones entre los seres vivos, sus entornos y sus modos de vida. La ecología estudia todas las especies existentes interrelacionadas entre sí como parte de un mismo sistema, el “ecosistema”. El término “ecología” fue acuñado por primera vez como "oecology" por el zoólogo alemán Ernst Haeckel en 1860, que definió la ecología en 1869 como el “Estudio de las interacciones de los organismos, colonias de organismos y especies biológicas (incluyendo a los seres humanos) con su entorno, vivo o no, y el flujo de energía y materia entre tales grupos de especies dentro de un ecosistema (Fernández, 2007).



Fig. 3.3.2.1 Bosque en la Sierra de la Garrotxa.

Para definir “Ecosistema” partimos de la definición de “sistema” de la RAE como “Conjunto de reglas o principios sobre una materia racionalmente enlazados entre sí”, “Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto”. Luego, el Oxford English Dictionary, define “ecosistema” como el “Conjunto de interacciones entre los componentes biológicos y físicos del medio ambiente. Unidad que abarca todo los organismos de un área determinada, sus

relaciones recíprocas con el medio físico y que abarca una gran variedad de especies y sus interacciones con el material circundante y los recursos energéticos. Según la RAE, “Ecosistema” (De eco- y sistema) se define como “Comunidad de los seres vivos cuyos procesos vitales se relacionan entre sí y se desarrollan en función de los factores físicos de un mismo ambiente”. En 1935, el ecologista británico, Arthur G. Tansley, acuñó el término "ecosistema" para referirse al conjunto de organismos que definen un “biome” (Un bioma (del griego «bios», vida), también llamado paisaje bioclimático o áreas bióticas) y el intercambio entre él y la materia inorgánica del medio ambiente, donde se reconoce este intercambio dinámico de materiales y energía.

Según las "leyes" básicas de la ecología según Barry Commoner y Nicholas Georgescu-Roegen (Riechmann en Blount et al., 2007): 1. La biosfera es una compleja red, en la cual cada una de las partes que la componen se halla vinculada con las otras por una tupida malla de interrelaciones. 2. Todo ecosistema puede concebirse como la superposición de dos ciclos, el de la materia y el de la energía. 3. La configuración de la actual naturaleza refleja unos cinco mil millones de años de evolución por "ensayo y error". 4. En los procesos biosféricos, al final, tendremos un déficit en términos de materia-energía, por lo que se deduce que no existe un equilibrio dentro de cada ecosistema, sino un metaequilibrio a nivel global.

A finales de 1940 y 1950, Eugene P. Odum desarrolló teorías que llevarían a una nueva disciplina de estudio llamada "ecología ecosistémica". El trabajo de Odum conduce a una concepción de la tierra como un “gran ecosistema”, que se autorregula y se involucra en un flujo de energía y materiales de enorme complejidad. Odum realizó estudios que implicaban que los sistemas humanos también podrían autorregularse a través del diseño, la ciencia y la ingeniería y planificación (Fernández, 2007).

En un contexto como el expuesto en párrafos anteriores surge el concepto de “ecología industrial”, al compararse el sistema industrial con los ecosistemas naturales a partir de autores como R. Frosch y N. Gallopoulos (Wadel *et al.,* 2010) y definiéndose como el estudio de los flujos materiales de origen humano, los flujos de energía y las transferencias entre la antroposfera y la bioesfera global con el fin de sintetizar una red

de procesos industriales interrelacionados que promueven el uso responsable y sostenible del capital renovable y no renovable (Fernández, 2007). La ecología industrial, desde una visión sistémica del medio ambiente, también puede definirse como la totalidad o parte de las relaciones entre las diversas actividades industriales, sus productos y el medio ambiente (Kumar y Patel, 1992).

Tomando la idea de metabolismo para cuantificar la energía y recursos/materiales que atraviesan las economías, se define el "metabolismo industrial", como un sistema integrado de procesos técnicos que convierte materias primas y energía en productos acabados y en residuos. El sistema es regulado por el balance entre la provisión y la demanda de productos siendo el marco económico el mecanismo de regulación del metabolismo industrial (Wadel *et al.,* 2010). Se entiende que los flujos de materiales dentro de este metabolismo pueden asimilar las condiciones de la biosfera donde los residuos de una actividad pueden ser los recursos de sí misma, o bien de otra.

Ecología Natural → sistemas auto-reguladores naturales → sistemas auto-reguladores naturales humanos → Ecología Industrial

La ecología industrial se basa en una analogía directa con los sistemas ecológicos naturales. La estructura del sistema ecológico natural y la estructura de un sistema industrial, o un sistema económico, es extremadamente similar (Frosch, 1992). Teleológicamente, ecología industrial puede definirse como el medio por el cual un estado de desarrollo sostenible se aborda y se mantiene. Consiste en una visión sistémica de la actividad económica humana y su interrelación con los sistemas físicos fundamentales con el objetivo de establecer y mantener la especie humana a niveles que puedan sostenerse indefinidamente a nivel biológico, químico, económico, cultural, y de evolución tecnológica (Allenby, 1992).

Esta nueva disciplina, campo emergente de estudios analíticos y territorio aspiracional para el diseño, la arquitectura y la ingeniería, parte de un intento de (re)establecer una intrincada malla de intercambios de bienes y servicios con el fin de

minimizar los impactos ambientales de las actividades económicas bajo el modelo de producción industrial, para lo que debe concentrarse no sólo en el papel y las características de los productos, la tecnología y la industria, sino también en el sistema socio-económico y ambiental de manera combinada (Ruth, 1998).

Lo que propone la ecología industrial es el cierre de los flujos materiales inmersos en un sistema de producción abierto, que genera residuos al aire, al agua o a la tierra bajo la consigna de eliminar la palabra residuo y sustituirla por recurso. El modelo productivo resultante no es ya lineal sino cíclico y queda definido por el ciclo reciclaje-fabricación-uso-reciclaje (Anderson, 1992).

Ecólogos como Ramón Margalef, H. T. Odum o Barry Commoner proponen que la economía humana debe imitar la "economía natural" de los ecosistemas. La economía ecologizada distinguiría entre dos tipos de "metabolismo económico": todo lo que fuera a parar al metabolismo biológico de la naturaleza sería perfectamente biodegradable y por otro lado, lo que fuera al metabolismo industrial circularía una y otra vez en ciclos cerrados, sin mezclarse con el metabolismo biológico, por medio de la rehabilitación, reutilización y el reciclaje. Así, todos los productos de la economía pueden ser clasificados o bien como "nutrientes biológicos" o bien como "nutrientes técnicos" (McDonough y Braungart, 1998). El planteamiento en cualquier caso es el de "residuo cero", en el sentido de que los residuos de los procesos productivos pueden ser aprovechados íntegramente como materia prima (Del Río, 2002).

En la definición de Ecología Industrial se debe interpretar la palabra "industrial" de manera general, como el propósito de representar la suma total de la actividad humana, que abarca, la minería, fabricación, agricultura, construcción, generación de energía, transportación, la utilización del producto por los consumidores, sistemas de infraestructura, servicios de redes y eliminación de residuos. La ecología industrial no está relacionada exclusivamente a la idea de la fábrica y la fabricación de productos, se extiende a todas las acciones de los seres humanos, como una estrategia de reinserción, reinserción de la sociosfera y la tecnosfera en la biosfera.

Finalmente aclarar que al tomar al sistema natural como referencia, tenemos que tener en cuenta al físico y premio Nobel Ilya Prigogine cuando expone que los sistemas vivos, y la biosfera en su conjunto, son “sistemas apartados del equilibrio” que tienen eficientes “estructuras disipativas” para extraer el desorden (Riechmann en Blount, 2007). Como escribió Ramón Folch, “equilibrio ecológico es una “figura poética para evocar la interacción sistémica que se establece entre los componentes de un ecosistema. Es una metáfora sacralizada por los amantes de las simplificaciones y los fundamentalismos. A lo mejor, ni siquiera existe” (Folch, 1999). Se tiene que pensar en un meta-equilibrio, razón de nuestros vitales desequilibrios, plantear la posibilidad de la incertidumbre e intentar orientar la evolución de sistemas complejos sin pretender tener certeza sobre los resultados.

Escribió Nicholas Georgescu-Roegen en 1972: “...quien crea que puede diseñar un plan para la salvación ecológica de la especie humana no comprende la naturaleza de la evolución, y ni siquiera la de la historia, que es la de una lucha permanente bajo formas siempre nuevas, no la de un proceso físico-químico predecible y controlable (Riechmann en Blount, 2007).

3.3.3 Impacto ambiental de la industria de la construcción

La industria de la construcción es una de los mayores y más activos sectores en crecimiento a nivel mundial. Industria de la construcción = áreas económicas y sociales más importantes. Igual a nivel de desarrollo tecnológico dista de otros sectores como el del automóvil, el aeronáutico, el electrónico o el químico (Queipo *et al.,* 2009).

El sector de la construcción, según la OCDE en 2003, por acciones directas o indirectas, consume más del 40% de la energía producida y es responsable del 30% de las emisiones de CO2, por acciones directas o indirectas y consume más materia prima que ninguna otra actividad económica (Alrededor de 3000 Mt/año, casi el 50% del total en peso) (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012; Salas y Oteiza, 2009). En el año 2012 el sector doméstico consumió 52,030 GWh de energía eléctrica, que significa un 25% del

consumo total del país (Sener, 2012), lo que supone un gran potencial para generar un gran impacto positivo en la situación energética de México.

El mercado de la construcción es un mercado fragmentado, con metodologías y técnicas arcaicas y poco especializadas, con alta fluctuación, inestabilidad de precios de mercado, precariedad laboral y altos índices de siniestralidad (López del Corral, 2009; Queipo *et al.,* 2009). El sector tiene escasa inversión en I+D+i (López del Corral, 2009).

Actualmente, la edificación es dependiente de la emisión de gases efecto invernadero, y hay que tener en cuenta que en el año 2050 los edificios que se construyen hoy seguirán en uso, con su mismo mal funcionamiento. Las emisiones en el sector de edificación van en aumento. Ejemplo de España que aumenta un 114%, donde en el periodo del 1990-2007 el 26% de las emisiones imputables eran en edificación. Las emisiones son derivadas de las diferentes fases de la construcción de un edificio (Arcas *et al.,* 2010).

Este impacto ambiental del sector de la edificación se identifica con el consumo de recursos no renovables, la generación de residuos contaminantes que conllevan la aceleración de la destrucción del stock de capital natural por degradación entrópica (Wadel *et al.,* 2010), acrecentado por el actual continuo crecimiento de la población y sus necesidades en términos de edificación e infraestructura (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012).



Fig. 3.3.3.1 Edificio en altura en Sevilla con estructura de concreto.

Por un lado, el sector de la construcción está basado todavía hoy en un trabajo artesanal que conlleva una no precisión del trabajo, no repetitividad en

operaciones, ni control sistemático de calidad de acabados, racionalización y garantía de suministros (Queipo *et al.,* 2009), y por otro lado, existe una gran dispersión de materiales y sistemas constructivos que coexisten en el mercado y forman parte de las obras, lo cual dificulta las acciones que permitan cerrar los ciclos materiales como condición de sustentabilidad (Wadel *et al.,* 2010). El manejo de materiales no locales influye en el costo energético por transporte (Berge, 2001) y la industria de la construcción apenas presta atención a productos o materiales de construcción renovables, naturales y locales. Por otro lado, en la resolución constructiva del hábitat construido, es frecuente la adopción de sistemas o tecnologías importadas, no propias, que suponen alto consumo de energía y materiales y que son incompatibles con las propiedades físicas de los materiales locales, lo que origina disfuncionalidades en términos de durabilidad y alto costo de mantenimiento (Mathur, 2005). La utilización de sistemas constructivos y materiales comunes en otras latitudes, provocan una inadecuación de la respuesta de la envolvente térmica al clima local, por lo que se generan problemas de falta de confort térmico. Se identifican igualmente los impactos derivados de los procesos industriales de extracción y fabricación de los materiales, la combustión de energía para su transporte, generación energética para los consumos del uso de los edificios, la generación de residuos de derribo, además de impactos derivados de la construcción como la eco toxicidad y toxicidad humana, eutrofización o desequilibrio de nutrientes en un ecosistema acuático, el smog etc...

Los edificios contienen una gran cantidad de químicos, metales pesados, componentes volátiles orgánicos (VOCs), y otros materiales tóxicos que contaminan el aire interior y pueden causar problemas de salud, enfermedades, desarrollo de enfermedades en recién nacidos, supresión del sistema inmune e incluso cáncer (Chikara *et al.,* 2009; Reboux *et al.,* 2011). Muchos materiales no regulan bien o no se comportan bien ante la humedad de los espacios interiores, conllevando una mala calidad del aire interior pudiendo provocar enfermedades como bronquitis, asma etc.

3.3.4 Ecología industrial y el cierre de los ciclos de los flujos materiales en la construcción sostenible

La idea principal que surge de la definición de ecología industrial es la de cerrar los el ciclo de los flujos materiales, propuesto por William McDonough y Michael Braungart. Estos autores proponen avanzar desde los ciclos de vida "de la cuna a la tumba" para los productos y materiales hacia ciclos "de la cuna a la cuna" (McDonough y Braungart, 2002). Para el logro del cierre de los ciclos materiales y de la ecología industrial se debe contar con la tecnología adecuada, pero también se debe contar con un marco institucional y una conciencia social que favorezca la producción renovable y el reciclaje (Wadel *et al.,* 2010). Las escalas temporales y espaciales son también de importante consideración de la ecología industrial, como en los sistemas biológicos. El consumo y transformación de los recursos deberían ser en espacios temporales cortos, pues así se generaría degradación del material reutilizable.

Se sabe que el sector de la construcción y la arquitectura por sí solos no pueden resolver los problemas medioambientales del planeta, pero pueden contribuir significativamente. Partiendo de la idea de la ecología industrial antes expuesta y teniendo como ejemplo y antecedente primero de producción sostenible la propia biosfera y naturaleza, considerada como una gran máquina de reciclar que es, el presente texto reflexiona alrededor de la idea de sostenibilidad en la arquitectura, donde, si consideramos la habitabilidad como la utilidad de la arquitectura, se plantea reconocer y cuantificar todos los flujos materiales (los que proveen la energía precisa para conseguir la habitabilidad, los materiales de construcción, los residuos y el agua) que son precisos para conseguir esa habitabilidad, y reorganizarlos para que estos flujos materiales circulen en ciclos cerrados.

El objetivo es el de lograr una reducción del impacto ambiental de sector de la construcción. La propuesta es la de cerrar el ciclo de los flujos materiales en la edificación para el logro de su máxima utilidad, una habitabilidad máxima.

La aplicación de la ecología industrial en la edificación se puede hacer a partir del análisis de ciclo de vida de los materiales utilizados en esta actividad. La meta del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es caracterizar todos los flujos materiales para especificar su potencial impacto ambiental y poder considerar alternativas a estos impactos. A partir de este análisis del ciclo de vida de los materiales, para poder cerrar el ciclo de los materiales, se presenta una propuesta de modelo a seguir (Wadel *et al.,* 2010):

- Extracción y Fabricación: uso primordial de materiales naturales, reciclados y reciclables. Emplear materiales de bajo impacto ambiental (baja energía y CO2 incorporados), y potenciar la reciclabilidad. Trabajar con el mínimo número de materiales posible y estudiar las posibilidades de su gestión en ciclo cerrado. Disponer de materiales con mayor participación de energías renovables, eliminación de procesos tóxicos y reciclaje en su fabricación.



Fig. 3.3.4.1 Sistema prefabricado de estructura metálica de fácil montaje.

- Transporte: ajuste de las dimensiones y modulado de los sistemas constructivos para evitar el uso de maquinaria pesada. Con ello se evita utilizar equipos especiales y vehículos de acompañamiento, al tiempo que las grúas a emplear son de bajo tonelaje y todos los medios de transporte pueden ser reaprovechados para cualquier otro tipo de cargas de contenedor. Emplear proveedores locales e intentar localizar la fábrica de producción de materiales y componentes cerca de las obras a atender. Racionalizar los movimientos y optimizar cargas.

- Construcción: El impacto ambiental de la etapa de construcción se concentra en la generación de residuos y otros efectos (energía y emisiones incorporadas, etc.) de la parte de obra que se realiza in situ. Por ello, por ejemplo, favorecer al máximo posible la prefabricación del edificio, la utilización de pocos materiales y estos con

juntas reversibles. Hacer uso de materiales, componentes, elementos constructivos y sistemas que permitan la posterior reutilización o fácil reciclado de la fracción útil del material. Hay que revisar el análisis del impacto ambiental de los materiales, y aquellos materiales de mayor impacto, hay que garantizar su posibilidad de reciclado y/o reutilización.

- Uso: ajuste de la cantidad de material empleada según la respuesta térmica deseada medida con programas de simulación. Reducir la demanda, de acuerdo a las condiciones de cada clima, para controlar más estrictamente la infiltración, la ventilación controlada, la ganancia solar selectiva, etc., así como también disponer de equipos e instalaciones de mayor eficiencia. Mejorar el comportamiento bioclimático del edificio (aislamiento térmico, protección solar y ventilación natural, empleo de elementos que aporten inercia térmica, etc. Aumentar la captación de energía renovable y los captadores fotovoltaicos para reducción de consumo eléctrico. Hacer una gestión adecuada del flujo de agua dentro de la edificación y una gestión adecuada y buen manejo de los residuos producidos durante la vida útil del propio edificio.

- Mantenimiento: uso de materiales durables, de bajo impacto ambiental de fabricación así como de bajo mantenimiento y/o que sean reciclados/reciclables. Sustituir, especialmente en los casos de corta durabilidad, los materiales de alto impacto ambiental por opciones naturales o completamente reciclables. Disponer de tratamientos naturales para los materiales naturales que aumenten su durabilidad y/o disminuyan el impacto ambiental de cada aplicación.

- Deconstrucción: Utilizar sistemas constructivos de junta reversible que potencien la máxima recuperación de los materiales, evitando la generación de residuos. Usar materiales no adheridos, que favorecen la separación selectiva y por tanto las posibilidades de reutilización directa, rehabilitación o reciclado. Desarrollar productos de instalaciones que puedan ser descompuestos en materiales simples y reciclables.

Para garantizar el cierre del ciclo de los flujos materiales, se tiene que asegurar la cadena de custodia en la responsabilidad de los materiales involucrados en la edificación. Para ello se tiene que repensar el sistema comercial que atañe al uso de la edificación y pensar en sistemas comerciales alternativos, como aquellos que no ofrecen ya la titularidad de un edificio sino el alquiler del servicio que él presta. Para garantizar el cierre del ciclo de los flujos materiales hay que contar con un sistema industrial y un sistema comercial adecuado (Kieran y Timberlake, 2003). El problema central es crear, más que un sistema constructivo, un modelo de gestión (Wadel *et al.,* 2010).

3.4 Construcción industrializada para una Vivienda Sostenible y ecológica

3.4.1 Construcción industrializada



Fig. 3.3.4.1 Sistema prefabricado de estructura metálica de fácil montaje.

La ecología industrial trata de reestablecer los sistemas humanos, los sistemas de habitabilidad y la manera de construir a nivel ecosistémico, y ver la manera de que encajen con los sistemas naturales. Se trata de reintegrar la tecnosfera en la biosfera (Riechmann en Blount, 2007). No sólo hay que pensar en el tipo de edificio, el sistema constructivo y los materiales, sino también en la gestión de los recursos a lo largo de su vida útil. La reconversión de los residuos en nuevos recursos es una necesidad del sistema técnico para afrontar el reto de la sostenibilidad.

Conseguir el cierre total del ciclo de los flujos materiales es difícil, pues hay materiales que tienen dificultades técnicas para reciclarse completamente. Es difícil el control total de la energía de extracción, fabricación y transporte de materiales, uso del edificio, derribo, etc. La teoría planteada por la ecología industrial plantea dificultades a la hora de ponerse en práctica, en general, y en particular en el sector de la construcción. Se necesita una matriz muy compleja donde, más que la complejidad de los flujos a analizar, juega un papel importante la relación entre la producción de utilidades, en el caso de la edificación el de la habitabilidad, y la satisfacción de las necesidades respecto al hábitat construido.

Se plantea que la industrialización en la arquitectura y en la edificación puede ser una pieza clave para poder hacer eficiente la gestión de los flujos materiales implicados, al poderse racionalizar, cuantificar y regir de manera más adecuada la producción de la arquitectura y del propio edificio, y si bien todavía quede camino por recorrer para el logro de soluciones sostenibles definitivas, por lo menos, desde los

principio de la Ecología Industrial, se pueden plantear medidas paliativas que aporten en este compromiso que tenemos que tomar con el medio que nos rodea y la sociedad en la que estamos inmersos.

Salas y Oteiza en el 2009 definen “Sistema Constructivo” como una entidad organizada conformada por componentes entre los que existen relaciones definidas o como la organización completa de partes de diferentes en las que las relaciones entre ellas están perfectamente definidas y definidas mediante reglas explícitas. Un “Sistema Constructivo Industrializado” consiste en construir utilizando componentes prefabricados procedentes de procesos industriales que implican un ahorro económico a través de la calidad, la rapidez, la precisión y el ahorro energético por el control del diseño y la fabricación, eficiencia en la puesta en obra, en la vida útil del edificio (Ruiz-Larrea, 2008). La prefabricación es estudiada como una de las posibles formas de materialización del proceso de industrialización en la construcción (Salas, 2008), donde se logra un perfeccionamiento sistemático de los procesos técnicos y logísticos de fabricación del componente constructivo (Pich-aguilera, *et al.,* 2008) y una simplificación del proceso de producción, que permite adoptar normas de calidad en el proceso y un mayor control en el uso y deconstrucción, desmontaje del desperdicio/reutilización/reciclado de materiales (Salas, 2008; Ruiz-Larrea, 2008). Se trata de una nueva organización y sistematización del proceso constructivo, que conlleva ventajas operativas y de rentabilidad (Queipo *et al.,* 2009).

Leonardo Da Vinci en el siglo XV planteo la construcción de una serie de nuevas ciudades en la región de Loire, donde se hace un planteamiento que consistió en establecer, en el centro y origen de cada ciudad, una fábrica de elementos básicos que permitieran conformar a su alrededor un gran abanico de edificios, de forma fluida y flexible, y una gran diversidad de tipologías edificatorias con un mínimo de elementos constructivos. Francisco I y Enrique II en el siglo VXI construyeron pabellones de madera prefabricados para su uso en batalla. Transportados fácilmente por barco, se montaban y desmontaban rápidamente por los propios soldados, de tal forma que los campamentos fueran, además de resistentes y confortables, ágiles en sus

desplazamientos. En 1578 también se levantó en Baffin (Canadá) una casa prefabricada de madera que había sido construida en Inglaterra. Asimismo, en 1624, la Great House, una casa de madera panelizada y modular, construida por Edward Winslow en Inglaterra, fue trasladada y montada en Massachusetts al otro lado del Atlántico [Gómez, 2009].

La revolución Industrial fomentó la idea de la creación de diseños modulares que pudieran ser construidos con base a elementos prefabricados producto de la producción en serie e implementando puentes y cubiertas de hierro fundido. Al final del S. XVIII cuando se empezó a vislumbrar la posibilidad de industrializar la construcción; en Europa, mediante la construcción de puentes y cubiertas con hierro fundido, material que sería después aplicado a la elaboración de pilares y vigas de edificios; y al mismo tiempo, en Estados Unidos, mediante la construcción de edificios de tipología “Balloon Frame”, constituidos por listones de madera provenientes de fábrica y ensamblados mediante clavos fabricados industrialmente. En 1889 ya aparecía en EEUU la primera patente de edificio prefabricado mediante módulos tridimensionales en forma de “cajón” apilable, ideada por el arquitecto estadounidense Edward T. Potter. En 1892 Edmond Coignet levantó el que parece ser el primer edificio totalmente compuesto por elementos prefabricados de hormigón armado; se trataba del Casino Municipal de Biarritz, diseñado por el arquitecto Calinaud. De ahí en adelante, más de cien años de evolución nos han llevado hasta los prefabricados actuales [Gómez, 2009].

En 1919 Gropius habla de “la no escisión entre el desarrollo industrial y la propia arquitectura, a la que debe servir de medio para configurarse en realidad” (Salas y Oteiza, 2009).

En 1920, Le Corbusier denominó la nueva casa como “Máquina de habitar”, abriendo paso a la racionalización, industrialización y prefabricación. Se pasaba a entender la Casa como máquina, como objeto útil, como ensamblaje de piezas industrializadas que macla perfectamente. Las necesidades de una nueva sociedad industrial consolidada, avances en técnicas y la aparición de nuevos materiales de construcción posibilitaron la estandarización y producción en serie que resultó ser más

económica, rápida, con un uso racional de los materiales y de mayor calidad. En el Congreso Internacional de Arquitectura Moderna (CIAM) se proclama la necesidad de este cambio en la forma de pensar, de proceder, de proyectar, de fabricar, de construir, contando con la estandarización y normalización para paliar el déficit de vivienda. Le Corbusier plantea la necesidad de un mercado con suficiente variedad de prefabricados, que él denomina “Caja de Elementos de Construcción” (Cassinello, 2008).

Período 1950-1970: masividad, euforia y negocio: Los sistemas cerrados a base de grandes paneles fueron dominantes en la llamada “Europa del Este”. En estas décadas los sistemas constructivos prefabricados impusieron de forma implacable (en pro de la economía y la urgencia). Se establece en la fase de producción: flexibilidad, elasticidad y variación, apuntando en la dirección de hacer posible la consecución desde estas fábricas la meta de tener series cortas y diversificación del producto (Salas, 2008).

Salas y Oteiza en el 2009 hablan del compromiso entre la técnica y la necesidad, y destacan como Jean Prouvé en 1979 relaciona la industrialización y la arquitectura por medio del dominio del proceso.

De 1985 a 2000: En este momento irrumpió con fuerza la prefabricación de edificios públicos: escuelas, hospitales, oficinas... La industrialización de la construcción de naves y polígonos industriales se ejecutaba mayoritariamente a base de grandes elementos prefabricados de hormigón (Salas, 2008).

Hoy día en países como Suecia, se plantean nuevos procesos de construcción industrializada sobre medidas socialmente avanzadas, con apoyo de la administración pública, desde la automatización de la industria de la construcción. En Finlandia el 70% de los edificios de viviendas, el 80% de los de oficinas y comerciales y hasta un 90% de los industriales son industrializados. En Estados Unidos se trabaja con elementos con código abierto a base de componentes de producción avanzada con el objetivo del ahorro energético y el posibilitar la industrialización personalizada o por encargo. Se

trabaja desde procesos informatizados de sistematización del proyecto. En Japón existen fabricantes de viviendas prefabricadas con cadenas de producción automatizada y robotizada, pensando en la rapidez de ejecución y el énfasis en el ensamblaje. En Holanda se añade un papel participativo al usuario que conduzca a la configuración de la vivienda dese la industrialización. Kas Oosterhuis plantea el proyecto “Variomatic” como un catálogo flexible basado en el concepto interactivo del diseño paramétrico (Salas y Oteiza, 2009).

Existen autores que, partiendo del análisis de los sistemas constructivos tradicionales, valoran las posibilidades técnicas y económicas de la industria contemporánea para mejorar los procesos de fabricación y puesta en obra, y abogan por una industrialización y una especialización del sector de la construcción (Pich-aguilera, *et al.,* 2008). Existen investigaciones a nivel internacional que concluyen sobre los aportes que estos sistemas industrializados y prefabricados tienen al reducir el costo, tiempo y mano de obra (Ahmad Bari *et al.,* 2012), el consumo de recursos, de materia prima implicada, al mejorar la calidad de la construcción y reducir las emisiones de CO2 tanto en la fabricación como en la logística de su transporte, puesta en obra y vida útil (Wadel *et al.,* 2010).

Con la industrialización se establece una relación plenamente bilateral entre industria y arquitecto, entendiendo que ninguno debe subordinarse al otro sino que ambos trabajan para la sociedad. Por medio de la industrialización, los sistemas constructivos evolucionan logrando (Pich-Aguilera *et al.,* 2008):

- Reducción de la materia prima implicada (que, según como, también quiere decir mínimo peso dentro de una franja tipológica determinada). El montaje se hace por medio de un sistema en obra totalmente en seco, sin apuntalamientos y con control de los tiempos y recursos, que se conoce y se planifica desde el comienzo. No se producen pérdidas de material durante el proceso de carga y descarga, almacenamiento, ajustes en la colocación de las piezas en obra

- Reducción de las emisiones de CO2 tanto en la fabricación como en la logística de su transporte, puesta en obra y vida útil.

- Reducción del coste no sólo en términos económicos sino también sociales. Todos los residuos son reutilizados en fábrica, donde existe una gestión de recursos. Los impactos durante la realización de la obra están limitados. Se tiene ahorro en el consumo eléctrico durante el proceso de puesta en obra, en conceptos de montaje de encofrados, montaje de armaduras, vibrado del hormigón. La estructura puede desmontarse de igual forma que se construyó, y transportarla con un número aproximado de camiones igual al utilizado en su ejecución.

- Versatilidad del propio sistema para hacer posible aplicar creativamente en situaciones no tipificadas y la compatibilidad o capacidad de diálogo con otros sistemas complementarios o bien subordinados.

Salas y Oteiza en el 2009 diferencian entre diferentes formas de Industrialización aplicado a la edificación:

- Industrialización sutil: elementos, componentes y subsistemas de procedencia variada. Preocupación en como concebir los encuentros, las uniones o conexiones para reestablecer la continuidad entre elementos, componentes y subsistemas. Posibilidad de industrialización abierta o por catálogo.

- Industrialización sutil cerrada: mediante sistemas de catálogos de procedencia única. Elementos se fabrican conforme a especificaciones internas del propio sistema, que responden únicamente a reglas de compatibilidad interna y el proyecto arquitectónico ha de subordinarse a los condicionantes del sistema. También tenemos el empleo parcial de componentes, donde la gama de productos y prestaciones es más o menos fija admitiéndose ciertas variaciones dimensionales o de pequeña entidad y los “Sistemas tipo mecano”, resultado de la evolución hacia una apertura “acotada” de los sistemas cerrados (Salas, 2008).

- Industrialización sutil abierta: Singular, específica o por encargo. De catálogos compatibles. De sistema abierto (Soluciones repetibles, no necesariamente idénticas). De soluciones mixtas.

Los sistemas constructivos mediante industrialización abierta son aquellos sistemas constituidos por elementos o componentes de distinta procedencia aptos para ser colocados en diferentes tipos de obras, industrializadas o no, y en contextos diversos. La industrialización abierta da la posibilidad de que componentes complejos de distintas procedencias y generados con diferentes formas de producción, bajo directrices de proyecto redactadas con mentalidad y disciplina industrial, propicien como resultado, espacios construidos mayoritariamente a base de componentes producidos por empresas distintas (Salas, 2008). Un sistema industrializado eficaz resultará siempre abierto y puede adaptarse a cualquier arquitectura rigurosa. El proyecto arquitectónico debe redactarse en términos homologables. La forma debe contener en su interior un lenguaje cifrado de mínimos (en términos de compatibilidad geométrica o técnica) capaz de introducir al proyecto de arquitectura en la red de los sistemas industrializados y adaptar los rígidos catálogos industriales a las necesidades de la arquitectura. El reto de la arquitectura, por lo tanto, consiste en construirse utilizando verdaderos procesos de ensamblaje de los componentes de un catálogo abierto de productos a soluciones variadas e innovadoras. (Larrea *et al.,* 2008).

Una preocupación importante atañe a la forma de concebir los encuentros, uniones o conexiones para restablecer la continuidad entre elementos, componentes y/o subsistemas, cuyo resultado es la obra realizada total o parcial del edificio. En este sentido, aparecen tres posibles tipologías de industrialización abierta como las más frecuentes en la práctica actual de los países más desarrollados (Salas, 2008):

- Cuando el origen de la resolución total se basa en el proyecto arquitectónico-constructivo realizado para responder a un encargo concreto –un caso singular o demandado– necesitaría matizarse como: industrialización abierta singular o por encargo.

- Una segunda matización de la "industrialización abierta' puede necesitar el añadido de 'a base de catálogos'. Pretendería adjetivar los casos en los que el proyecto arquitectónico-constructivo es resultado del consenso entre el equipo de proyecto y los productores-suministradores de los elementos, componentes o subsistemas. En estos casos, al igual que en la prefabricación pesada, el proyecto tiene, o puede tener, características específicas a las que con gran acierto Smith y Testa, en su libro "Building Systems" denominaron hace ya cuatro décadas: proyecto invertido.

- Finalmente, se propone delimitar un tercer caso para ambas, industrialización cerrada y abierta, cuando la resolución de los aspectos constructivos los aporta en su práctica totalidad uno o varios productores-suministradores en forma de sistema constructivo.

Industrialización y prefabricación de la construcción en México

En México este proceso de industrialización basado en sistemas modulares o sistemas prefabricados comenzó a tener auge en los años sesentas, viéndose limitado y a su vez postergado por las políticas gubernamentales, que no quisieron hacer uso de la prefabricación en los proyectos de gobierno, debido a que se pensó que como todos los procesos de industrialización traería como consecuencia la desocupación de muchos trabajadores de esta industria, sobre todo los de menor preparación.

Existe un antecedente importante en la figura de Juan José Díaz Infante (1936-2012), que trabajó con la integración de procesos técnicos modernos y la construcción para lograr ahorros efectivos, tanto en tiempo como energía. Ejemplo temprano lo tenemos con la casa prefabricada de plástico que presentó en una exposición en el Museo de Arte Moderno de México en 1969. Investigó sobre nuevos materiales, sistemas constructivos y estructurales, siendo un innovador, siempre del lado del progreso técnico, realizando un buen número de invenciones y descubrimientos (Louise Noelle, 2012)

En la actualidad:

- La penetración de prefabricados de concreto crece rápidamente en la edificación (centros comerciales, estacionamientos, hospitales, hoteles) y en el sector de la vivienda.

- Hoy en día la producción de sistemas constructivos modulares asciende al 30%.

- La competencia en la industria de la construcción no es solo la competencia es trasnacionales.

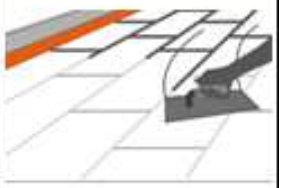
Se realiza un registro de empresas y casas comerciales dentro del territorio nacional que trabajen con sistemas y elementos constructivos prefabricados y bajo la lógica de la industrialización. El registro se lleva a cabo diferenciando según elemento constructivo y en dos grandes bloques entre pre-fabricados de concreto y de acero.

Cuadro resumen de sistemas y materiales prefabricados e industrializados:

Tabla 3.4.1.1. Sistemas y elementos prefabricados para muros.

Hebel	Block	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Piezas sólidas utilizadas para construir muros de mampostería tanto cargadores como no cargadores. Capacidad de muro cargador con block Hebel hasta 10 niveles. Incombustible y resistente al fuego. Reduce los tiempos de construcción al requerirse sólo 8.2 piezas de block por metro cuadrado de muro. No requiere mano de obra especializada.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/FT_Block(1).pdf http://www.hebel.mx/es/docs/Hebel_Mamposteria_Confinada_16JUN.pdf http://www.hebel.mx/es/docs/Block_Hebel_Mamposteria_Reforzada_16JUN.pdf	
Hebel	Block U	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Para funcionar como cerramiento en muros o vigas cortas sobre claros de puertas o ventanas tanto en muros cargadores como no cargadores. Pieza de las mismas dimensiones que el Block Estándar, pero con un espacio al centro y en toda su longitud, que le permite recibir el vaciado de concreto reforzado. Evita el uso de cimbra en mampostería confinada o reforzada.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/FT_Block-U(4).pdf http://www.hebel.mx/es/docs/Block_Hebel_Mamposteria_Reforzada_16JUN.pdf	
Hebel	Block O	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	El Block O Hebel es una pieza sólida con un orificio en uno de sus extremos para la construcción de castillos anogados en mampostería reforzada. Evita el uso de cimbra en mampostería confinada o reforzada.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/FT_Block-O(4).pdf http://www.hebel.mx/es/docs/Block_Hebel_Mamposteria_Reforzada_16JUN.pdf	
Hebel	Block Semi-Jumbo	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Los Blocks Semi-Jumbo Hebel son piezas sólidas con el doble de peralte del Block Estándar, utilizados para construir muros de mampostería tanto cargadores como no cargadores (PractiMuro). Eleva el rendimiento de instalación al utilizarse únicamente 4.1 piezas de block por metro cuadrado. Menor consumo de mortero adhesivo.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/FT_Block_Semi-Jumbo.pdf	

Hebel	Block Jumbo	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Los Blocks Jumbo Hebel son piezas sólidas sin refuerzo interior comúnmente utilizado para ajustes en puertas, ventanas o remates en el Sistema de Panel de Muro o como muros de mampostería tanto cargadores como no cargadores.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/FT_Block_Jumbo(3).pdf	
Hebel	Panel para muro	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Pueden utilizarse como revestimiento lateral en naves industriales, bodegas y centros comerciales. Trabajan simplemente apoyados sobre estructura de concreto o acero y se diseñan en base a requerimientos de claro y carga. Disponible como Paneles Arquitectónicos Ranurados con secciones semi-circulares o trapezoidales.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/Panel_Muro_-_v09.319(4).pdf http://www.hebel.mx/es/docs/Hebel_Sistema_Tableros_p_muros_fachada_17JUN.pdf http://www.hebel.mx/es/docs/Panel_Hebel_Muros_Interiores_18JUN.pdf	
Hebel	POWERBoard	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Se instalan directamente a bastidores metálicos para muros de fachada en proyectos habitacionales, comerciales e industriales. De rápido ensamblaje Reduce substancialmente la carga transferida a la estructura principal. Se unen entre sí con adhesivo Hebel.	A	http://www.hebel.mx/es/docs/Hebel_Power_Board_Guia_de_Instalacion.pdf	
Hebel	Power Panel (Hebel Board)	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Los Power Panel Hebel son elementos reforzados para el recubrimiento de muros exteriores e interiores sobre estructura de madera o acero.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/Hebel_Board_-_v09.319(4).pdf	
Hebel	Barda	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Los Paneles Hebel Barda son elementos reforzado con aristas chaflanadas que se utilizan en sistemas de bardas prefabricadas.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/Hebel_Barda_-_v09.913(4).pdf	
Hebel	Dintel	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Los Dinteles Hebel son vigas prefabricadas reforzadas para cubrir claros de puertas o ventanas en muros de mampostería tanto cargadores como no cargadores.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/Dintel_Hebel_-_v09.319N(2).pdf	

						
Hebel	Placa Termoaislante	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Ofrece grandes bondades en el aislamiento térmico contra calor y frío en casas y edificios construidos con sistemas tradicionales. Las piezas se instalan fácilmente sobre muros y losas de azotea sin requerir mano de obra especializada.	B	http://www.hebel.mx/es/docs/GR_PTA_v11.1125.pdf	
GMI	Muro Aislante IntraCel	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS)	Utilización como muros interiores o exteriores. Sistemas EPS de ahorro energético y confort acústico.	A	Catálogo	
GMI	Mega Wall	PVC estructural espumado	Sistema que integra muros, puertas, ventanas, closets y estantes. Con posibilidad de relleno de aislante de Intrapet o incluso concreto aligerado.	A	Catálogo	
Litebuild	Liteblock	Concreto Celular	Es un concreto celular que se fabrica mediante espuma estructural y concreto convencional.La espuma deja cierto contenido de aire dentro del material el cual aligera la carga, funciona como aislante térmico y absorbe enormemente el sonido.	B		
Novidesa	Panales aislantes IKOS	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS)	Para construcción de muros no sujetos a cargas: muros divisorios (interiores), recubrimiento de fachadas (exteriores), recubrimiento ligero para techumbres, muretes, muros bajos, apoyos, pretiles y dinteles decorativos, barandales, etc.	A	Carpeta Novidesa	

Sistemas Constructivos MG	Panel MG divisorio	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS)	Para construcción de pretiles, muros bajos, volúmenes, divisorios, faldones, nichos, ingresos, jardineras, molduras, pérgolas.	A	http://panelmg.com.mx/pdf/paneles-divisorios.pdf	
Sistemas Constructivos MG	Panel MG semi-estructural	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS)	Abultados, plafones, arcos, remates, closets, barras de cocina, losas para lavabos.	A	http://panelmg.com.mx/pdf/paneles-semiestructurales.pdf	
Sistemas Constructivos MG	Panel MG estructural	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS)	Muros de carga, escaleras, bardas, fachadas, losas de entrepiso, azoteas, voladizos, balcones.	A	http://panelmg.com.mx/pdf/paneles-estructurales.pdf	
meTecno	SUPERWALL®, SUPERWALL® FLAT, SUPERWALL® Cal 26/Inox, SUPERWALL® Inox /Inox	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS)	Panel metálico para muros de fachadas, tipo sándwich con fijación oculta, inyectado en línea continua de poliuretano expandido de alta densidad (40 Kg/m3) y ambas caras en lámina de acero galvanizada prepintada.	A	http://www.metecnomexico.com/flash/fichas/ficha_superwall_flat.pdf	

Tabla 3.4.1.2. Sistemas y elementos prefabricados para losas y entrepisos

Napresa	Vigueta preesforzada					
Napresa	Losa Alveolar Pretensada	Concreto pretensado	Losa de concreto pretensado, con peralte constante, aligerado mediante alveolos longitudinales. Sistema de forjado unidireccional altamente industrializado.	B	http://www.napresa.com.mx/PREFABRICADOSDECONCRETO/MATERIALESPARATECHO/ESTRUCTURALES.aspx	

Hebel	Panel Hebel	Concreto Celular Autoclaveado (AAC = Autoclaved Aerated Concrete).	Con resistencia a la compresión mínima de 61.2 kg/cm2, clase AAC-6. Acero de refuerzo alta resistencia con esfuerzo de fluencia fy=5000 kg/cm2. Ofrece la combinación única de losa estructural más aislamiento térmico en un solo producto. Tiempo promedio: 5 minutos por panel Rendimiento: 12 Pza. / hora 96 Pza. / jornada Longitud: 4.0 m Rendimiento: 235 m2 por jornada	B	http://www.hebel.mx/es/docs/Panel_Losa_sobre_Mamposteria_18_JUN.pdf	
Sistemas Constructivos MG	Panel MG estructural	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS)	Muros de carga, escaleras, bardas, fachadas, losas de entrepiso, azoteas, voladizos, balcones.	B	http://panelmg.com.mx/pdf/paneles-estructurales.pdf	
Novidesa	Panel M16	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS)	Cuenta con un agente ignífugo que no propaga la flama. Esta estructurado con dos canaletas de acero galvanizado G60 sección tipo "C" calibre 22 con troquelados nominales y separados entre si a cada 30 cm (12"). Funcionan como soporte del sistema para recibir el peso del concreto al ser colocado y reciben el acabado en la parte inferior. Colocación de producto 150 m2/Jor 250 m2/Jor	B	http://www.novidesa.com.mx/sites/novidesa.com.mx/files/ficas_tecnicas/m16.pdf	

Tabla 3.4.1.3. Sistemas y elementos prefabricados para cubiertas

meTecno	GLAMET® LV MONOROOF	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS), cara externa en lámina de acero galvanizada prepintada y cara interna en vinil blanco.	Panel metálico para cubiertas, tipo sándwich. Elemento de cubierta para edificaciones industriales, comerciales y residenciales. Por su acabado al interior en vinil, en ocasiones es ulizado como cubierta en lugares donde se tiene previsto cielo raso / plafón. Elemento para fachadas por la rigidez que proporcionan las nervaduras.	A	http://www.metecnomexico.com/flash/fichas/ficha_glamet_lv.pdf	

meTecno	GLAMET ® DRY TECHMET DRY	Poliestireno expandido de alta densidad (EPS), cara externa preimpermeabilizada con una membrana flexible de poliolefina termoplástica TPO y cara interna en lámina de acero galvanizada preplntada.	Elemento de cubierta para edificaciones industriales, comerciales y residenciales, con baja pendiente, que requieran garantizar un alto grado de hermeticidad. Elevada resistencia mecánica con posibilidad de mayor separación entre apoyos.• Optimo aislamiento térmico y acústico.• Permite suprimir la instalación de plafón / cielo raso u otro detalle de acabado.• Acabado exterior plano.• Ligero.	A	http://www.metacnomexico.com/flash/fichas/ficha_glamet_dry.pdf	
meTecno	CUTEC	Cara externa en lámina de cobre y cara interna en lámina de acero galvanizado preplntado con un núcleo de poliuretano.	Cubierta o fachada recomendada para edificaciones de gran prestigio.	A	http://www.metacnomexico.com/productos/atc/cutec.html	
Mexalit	CEMPANEL ®	Fibrocemento	CEMPANEL® es la línea de paneles de fibrocemento fabricados con la más avanzada tecnología a base de cemento Pórtland, arena sílica, fibras naturales y aditivos, que después de ser sometidos a procesos de autoclavado, adquieren las propiedades y estabilidad requeridas.	A	http://www.mexalit.com/producto_cempanel.htm	

Tabla 3.4.1.4. Sistemas y elementos prefabricados para sistemas complejos

MECALUX	Entreplantas	Acero atornillado, piso de madera o metálico	Los altillos o entreplantas permiten aprovechar al máximo la altura útil de un local duplicando o triplicando su superficie y acondicionándola como zona de almacenaje, vestuarios, oficinas, etc. La instalación de una entreplanta supone la mejor solución para aprovechar el espacio disponible. Es posible ocupar toda la superficie o sólo las zonas más altas del local.	A	http://www.mecalux.com.mx/racks-otros-sistemas/entreplisos?gclid=CN2917lv47UCFYdxQgodeloAuQ	

GMI	Minispace	Acero	Para almacenamiento comercial o personal. Sistema metálico y de PVC ensamblado a base de tornillería por lo que no requiere del uso de mano de obra especializada. Los conjuntos se pueden desarmar, transportar y reinstalar en otros terrenos recuperándose el 90% de los materiales utilizados.	A	Catálogo	
GMI	IntraSystem		Intrasystem es un sistema industrializado diseñado para su fácil y rápido ensamble, con capacidad para admitir una gama infinita de combinaciones de acabados a su elección. Su estructura de acero galvanizado rolado en frío, está diseñado para ofrecer la máxima resistencia y capacidad de esfuerzo frente a sismos y vientos, Intrasystem se ha desarrollado considerando la problemática de la construcción en países en desarrollo, particularmente enfocados hacia la solución de la vivienda, educación y salud.	A	Catálogo	

Tabla 3.4.1.5. Sistemas y elementos prefabricados para sistemas estructurales - soportes

Aprec	Columnas	Concreto pretensado	Las columnas prefabricadas pueden ser de una sola pieza o en secciones, alcanzando así grandes alturas de manera segura y práctica. Las secciones estándar son rectangulares y circulares y de acuerdo a las especificaciones y características de cada proyecto pueden ser reforzadas o pretensadas. El diseño de las conexiones es particular para cada proyecto.	B	http://www.aprec.com.mx/index.php?seccion=precolados	
Pretencreto	Columnas prefabricadas	Concreto pretensado		B	http://www.anippac.org.mx/memorias08/26sept08/COLUMNAS%20PREFABRICADAS.pdf	

Tabla 3.4.1.6. Sistemas y elementos prefabricados para sistemas estructurales - vigas y traves

Aprec	Vigas AASHTO TIPO III, IV, VI.	Concreto pretensado	Vigas de concreto pretensadas o post-tensadas respetando los estándares AASHTO. El uso mas frecuente es en puentes vehiculares por parte de la SCT, sin embargo las características técnicas del elemento permite ser utilizada como rigidizante en estructuras.	B	http://www.aprec.com.mx/index.php?seccion=precolados	

Aprec	Trabes Cajon	Concreto pretensado	Trabe de concreto hueca en su interior, permitiendo grandes claros a bajo peso. Los peraltes estándar son desde 90cm hasta 180cm y ancho hasta 300cm. Existen elementos tipo cajón de mayor dimensión y peso que se fabrican sobre diseño.	B	http://www.aprec.com.mx/index.php?seccion=precolados	
Aprec	Trabes Portantes y/o rigidizantes	Concreto pretensado	Trabes Portantes y/o rigidizantes: Los elementos estructurales típicos de la edificación requieren trabes tipo portantes o de carga y trabes rigidizantes. Estos elementos pueden ser rectangulares, T-invertida, tipo L, y de acuerdo a las especificaciones y características de cada proyecto pueden ser reforzadas o pretensadas.	B	http://www.aprec.com.mx/index.php?seccion=precolados	

Tabla 3.4.1.7. Sistemas y elementos prefabricados para fachadas

Hunter Douglas	Sandwich Wall	Poliuretano y aluzinc	Panel Sandwich Wall: Es un panel para revestimiento de fachadas compuesto por dos planchas metálicas de aluzinc que tienen entre sí poliuretano inyectado de densidad 60kg/m3, lo que le da características aislantes. Tiene como medidas entre 50 y 35 mm de espesor, y anchos estándares de 300 / 470 / 500 / 565 / 600 mm. con un largo máximo de 9,8 metros. Se utiliza un perfil plástico en las juntas para evitar los puentes térmicos entre los paneles metálicos.	B	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga_123.pdf	
Hunter Douglas	Side Wall	Poliuretano y aluzinc	Es un panel de aluzinc para revestimiento exterior o interior con aislación, pudiendo ser poliuretano con espesor de 15 ó 20 mm o poliestireno expandido con espesor de 20 mm. Puede instalarse directamente a la estructura o a la fachada de superficie plana.	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga_125.pdf	

Hunter Douglas	Softwave 25	Poliuretano y aluzinc	Es un panel de aluzinc que tiene líneas curvas y se usa como revestimiento para fachadas con un espesor entre 0,5mm y 0,6mm. Puede tener perforaciones o tener la cara lisa.	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga_125.pdf	
Hunter Douglas	Softwave 50	Poliuretano y aluzinc	Es un panel de aluzinc que tiene líneas curvas y se usa como revestimiento para fachadas con un espesor entre 0,5mm y 0,6mm. Puede tener perforaciones o tener la cara lisa. El empalme es de tipo machihembrado y se fija a la estructura en su parte lisa.	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga_129.pdf	
Hunter Douglas	Panel Uveline	Poliuretano y aluzinc	Revestimiento de fachadas de paneles de Aluzinc con espesores entre 0,5mm y 0,6 mm que se fijan a la estructura de apoyo con un tornillo autoperforante. Los paneles pueden tener terminados lisos o perforados se empalman a través de un machi-hembrado.	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga_132.pdf	
Hunter Douglas	Panel Multipanel F	Poliuretano y aluzinc	Panel de aluzinc con textura lisa o arenada se usa principalmente como revestimiento de fachadas; se puede instalar en forma vertical, horizontal o diagonal y también se usa como marquesinas. Permite la dilatación térmica libre del panel. Se permite la incorporación de aislamiento a la solución constructiva.	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga_136.pdf	
Hunter Douglas	Multipanel Wave	Poliuretano y aluzinc	Es similar al Multipanel F. pero con una geometría ondulada.	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga_137.pdf	

Hunter Douglas	Panel 150 F	Poliuretano y aluzinc	Panel de Aluzinc usado como revestimiento de fachadas o techo falso. El sistema 150F consta de dos componentes básicos que son: El panel de 150 mm. de ancho y el riel portapanel V-9. Los paneles se fijan al riel portapanel por ajuste firme a presión que no requiere de otros elementos de sujeción.	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga_140.pdf	
Hunter Douglas	Panel 300FS	Aluzinc	Paneles de Alucozinc que no necesitan portapaneles y se instalan directamente a la estructura aplomada. Tiene 2 alternativas con aislación: 300FS Simple (un panel 300FS estándar con aislación de poliestireno expandido de espesor variable y una densidad de 20 Kg/m3) y 300 FS Compuesto (conformado por los mismos elementos antes mencionados, pero con un espesor de aislación de 40 mm. y una bandeja de cierre de Aluzinc por la trascara de 300 mm. de ancho en un espesor de 0,4 mm).	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga3_141.pdf	
Hunter Douglas	Revestimiento Tile	Aluminio y Honeycomb	Revestimiento interior y exterior compuesto por un sistema de anclajes, perfiles de nivelación y bandejas de modulaciones variables. Las bandejas están compuestas por dos paneles metálicos unidos por una celdilla de aluminio llamada Honeycomb	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga_120.pdf	
Hunter Douglas	Quadroclad	Aluminio y Honeycomb	Fachada ventilada formada por paneles compuestos por fleje de aluminio en el exterior y un alma de honey comb de aluminio en su interior.	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/mx/linea/fachadas/fachadas-ventiladas/quadroclad	
Hunter Douglas	ProdEX	Madera	Panel compuesto revestido por chapas de madera natural, con un tratamiento superficial de formulación propia a base de resinas sintéticas y PVDF.	A	http://www.hunterdouglas.com.mx/ap/uploads/mx/productos/productos_archivo_descarga2_2038.pdf	

3.4.2 Vivienda industrializada y sostenible

El catálogo “Home Delivery, Fabricating the Modern Dwelling”, del Museo de Arte Moderno de Nueva York, presentó la vivienda prefabricada no sólo como una reflexión sobre la vivienda como objeto de diseño repetible, sino también como agente

fundamental en el discurso de la sostenibilidad, la innovación arquitectónica, de los nuevos materiales y nuevas formas de investigación.

Queipo *et al.,* 2009 presenta el proyecto INVISO como exploración del optimizar la producción de viviendas por medio de la industrialización de los procesos constructivos, buscando la generación de nuevo materiales y sistemas desde una producción más eficiente y competitiva. El proyecto INVISO plantea como estrategias el desarrollo de nuevos procesos constructivos y su optimización, que conllevan una mayor precisión de ejecución, un mayor nivel de productividad, el desarrollo de nuevas soluciones técnicas sostenibles y una definición de nuevas tipologías de vivienda basados en criterios de industrialización y sostenibilidad, maximizando flexibilidad y confort a partir de altos niveles de estandarización. Se pasa a hablar de proceso de producción de vivienda en vez de construcción de viviendas. La solución constructiva tiene que venir definida desde el proyecto arquitectónico, desde la flexibilidad la modularización de las dimensiones, versatilidad de aplicaciones, viviendas y fachadas perfectibles, alternativas a la duplicación completa de los núcleos sanitarios, luces y disposiciones estructurales, compartimentaciones ambiguas, tabiquerías y divisiones móviles, participación del usuarios y planteamientos bioclimáticos. Se necesita un diseño modular y estandarización del tamaño y forma de los elementos.

El proyecto INVISO plantea una industrialización abierta, usando componentes y sistemas industrializados procedentes de distintos fabricantes y que se integran en obra mediante procedimientos simples. Esto hace necesario una coordinación dimensional y modular, la intercambiabilidad de componentes y la compatibilidad de juntas. Se plantea la creación de una base de datos sobre elementos y componentes prefabricados a nivel nacional. Se persigue la innovación tecnológica y sostenibilidad a lo largo del todo el ciclo de vida, buscando el no empleo de agua en la ejecución de las unidades de obra in situ, el fabricar en factoría y montaje rápido y sencillo en obra, haciendo todas las fijaciones en seco, sencillas y removibles con el tiempo (Queipo *et al., 2009*).

Por medio de la industrialización en la vivienda se plantea la optimización energética de cerramientos multicapas y ligeros, optimización de cerramientos con integración de sistemas solares activos, optimización acústica de cerramientos multicapa ligeros ante impacto y ruido aéreo y la optimización de sistemas de divisiones interiores, de tabiques e instalaciones, por medio de sistema ligeros que hagan más eficiente la vivienda (Queipo *et al.,* 2009).

Casos:

- Viviendas Weissenhof, Stutgart, Le Corbusier, 1927

- Saatliches Bauhaus, Gropius, 1919

- Vivienda experimental" VDL, Richard Neutra

- Richard Neutra Las "Casas Diatom" a base de tierra endurecida al vapor, cimentaciones metálicas adaptables y transportables, paneles estructurales de madera (Exposición en Los Ángeles 1936).

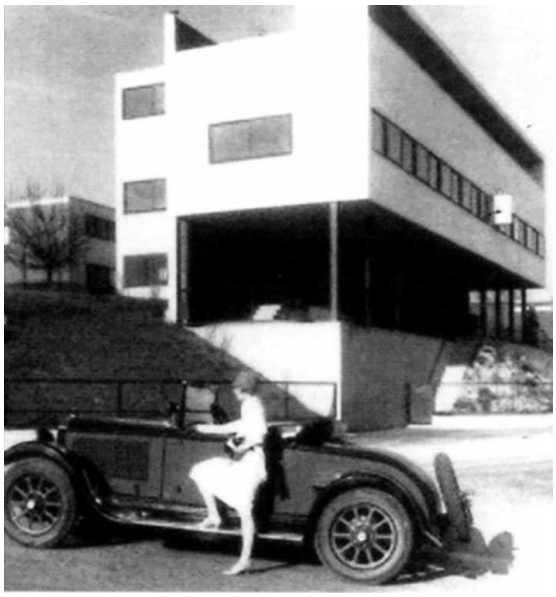


Fig. 3.4.2.1. Viviendas Weissenhof, propuesta de industrialización de vivienda de Le Courbusier.

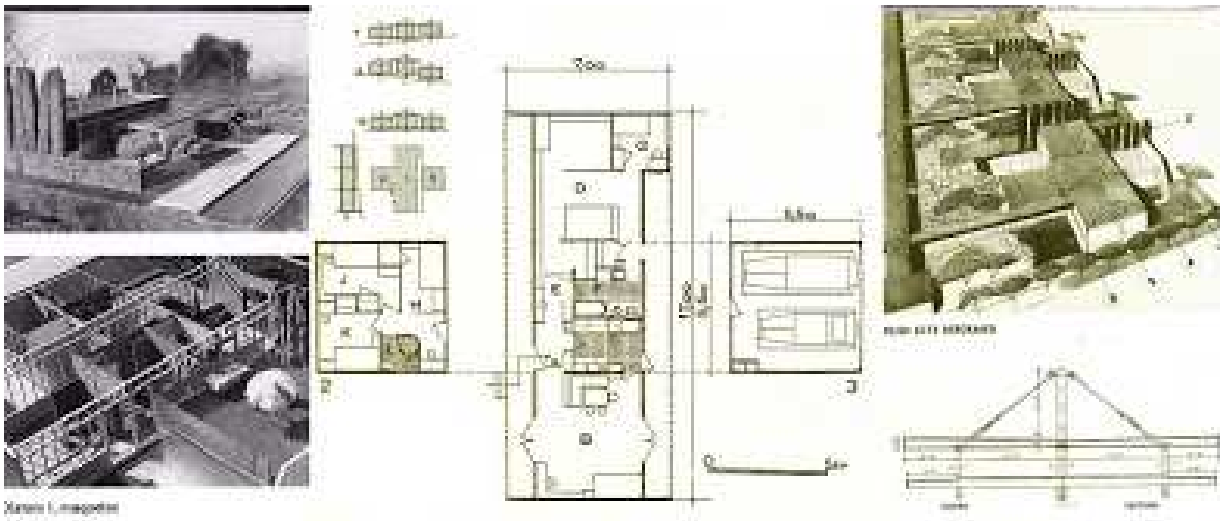


Fig. 3.4.2.2. "Casas Diatom" a base de tierra endurecida con vapor y paneles estructurales de madera.

Otros casos interesantes de investigación y propuesta innovadora son la "Casa Desmontable" de Jean Prouve de1945, "The Packaged Houses System de Walter Groupius de entre 1943 y 1945. John Entenza 1945, propone "The Case Study House Program", análisis llevado a cabo en Los Ángeles (1945). Albert, propuesta tecnológica de la más innovadoras en la época, "Bungalow 49" (1949).



Fig. 3.4.2.3. Propuesta de Casa desmontable de Jean Prouve.

F. J. Sáenz de Oiza interviene en este campo con una propuesta de vivienda unifamiliar prefabricada donde los muros portantes son de fábrica de ladrillo, propuesta desarrollada para el Concurso de Viviendas Experimentales (1956).

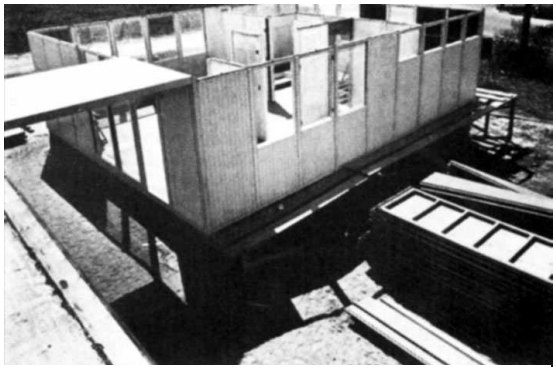


Fig. 3.4.2.4. "The Packaged Houses System de Walter Groupius.

Patente Ytong plantea Viviendas prefabricadas en 1956.



Fig. 3.4.2.5. Viviendas prefabricadas por Ytong en 1956.

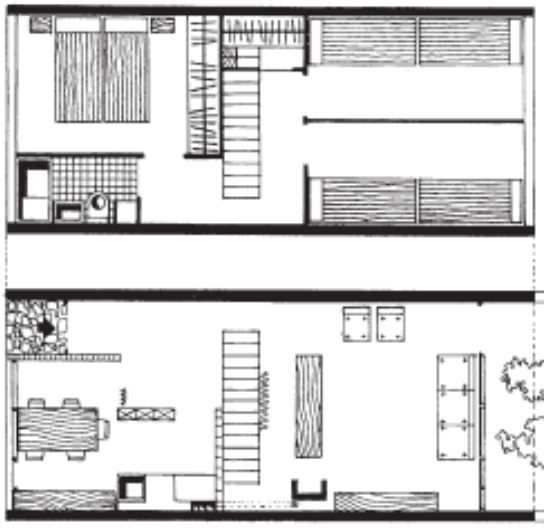


Fig. 3.4.2.6. Vivienda prefabricada de Sáenz de Oiza.



Fig. 3.4.2.7. Viviendas industrializadas en Vitoria-Gasteiz de Pich-Aguilera.

Pich-Aguilera, se han convertido en referentes en España en la propuesta innovadora de vivienda prefabricada e industrializada. Se tienen muy buenos ejemplos de la aplicación de la industrialización en la vivienda con el proyecto de 156 Viviendas Industrializadas en Vitoria-Gasteiz y recientemente uno de sus últimos proyectos el del bloque de viviendas y urbanización en Manresa en el 2013.



Fig. 3.4.2.8. Bloque de viviendas industrializadas en Manresa de Pich-Aguilera.

Taliesin Mod.FabTM es un ejemplo de habitación de 65 m2que se montó con elementos prefabricados de manera rápida y que permite su transportación en carretera y conexión con prácticamente cualquier red de servicios



Fig. 3.4.2.9. Imagen del proyecto Taliesin Mod.FabTM construido con elementos prefabricados.

- Un proyecto que muestra esto muy bien es Nemausus de Jean Nouvel en Nimes, Francia, donde la necesidad de espacios grandes y bajo costo para la vivienda social

eran los factores que se requerían. El aspecto del costo fue resuelto gracias al reciclado de materiales industriales, como las puertas de los estacionamientos que se usaron para los balcones, las escaleras de aluminio y los decks de metal. Así lograron hacer viviendas mucho más grandes con el mismo presupuesto.



Fig. 3.4.2.10. Viviendas sociales de Jean Nouvel en Nimes.

3.5 Materiales de construcción para una construcción sostenible

3.5.1 Materiales de construcción sostenibles

Partimos de la conciencia del deterioro ambiental y la degradación del medio natural en el que estamos inmersos hoy día, de que la vida del ser humano gira en torno al hábitat construido, y de que la arquitectura en la que se basa este hábitat construido se materializa, actualmente, basada en una disposición indiscriminada de fuentes de energía y con un impacto ambiental ya comentado. Sabemos que el sector de la construcción y la arquitectura por sí solos no pueden resolver los problemas medioambientales del planeta, pero pueden contribuir significativamente. Ante la emergencia de un nuevo paradigma, “La arquitectura contemporánea debe incorporar la sensibilidad ambiental de su tiempo catalizando un nuevo impulso para la invención y la expresión formal en la manera de construir” (Pich Aguilera, 2008).

Actualmente en México, los materiales de construcción que más se usan para vivienda son el tabique rojo y el block. Los hornos empleados para la producción de ladrillos rojos presentan los siguientes problemas: Emplean residuos como combustibles, son grandes generadores de contaminación, dan uso irracional del suelo, conforman un sector marginado, la gente que se dedica a la cocción de ladrillos no cuenta con recursos para invertir en tecnología. Los blocks conllevan todos los problemas que conllevan los materiales basados en el cemento, alto consumo de

energía, de combustibles fósiles, consumo de recursos naturales (Manzano *et al.,* 2011).

Teniendo como ejemplo y antecedente primero de producción sostenible la propia biosfera y naturaleza, considerada como una gran máquina de reciclar que es, la presente propuesta de investigación pretende trabajar alrededor de la idea de Sostenibilidad en la arquitectura, donde, si consideramos la habitabilidad como la utilidad de la arquitectura, plantea reconocer y cuantificar todos los flujos materiales (los que proveen la energía precisa para conseguir la habitabilidad, los materiales de construcción, los residuos y el agua) que son precisos para conseguir esa habitabilidad, y reorganizarlos para que estos flujos circulen en ciclos cerrados, planteando el cierre de todos los ciclos abiertos de los sistemas de producción que generan residuos al aire, agua o tierra, pasando a considerar el residuo como propio recurso.

No sólo hay que pensar en el tipo de edificio, el sistema constructivo y los materiales, sino también en la gestión de los recursos a lo largo de su vida útil. Si pensamos en los recursos y los materiales como nutrientes, ya sean biológicos o técnicos, se puede recuperar el valor económico del residuo, al considerarlo como recurso.

3.5.2 Construcción con tierra o suelos arcillosos

El uso de la tierra en la construcción constituye una oportunidad de reducir el impacto ambiental en la edificación, fuente de abastecimiento de material ilimitada, permitiéndonos la posibilidad, incluso, de utilizar tierra de las propias excavaciones, favoreciendo la reducción de residuos de la obra y los gastos de transporte de material. Es necesario analizar los antecedentes de construcción y arquitectura en tierra, los tipos de tierra que se pueden incorporar como matriz del panel y analizar mejoras a nivel granulométrico, de estabilización y de composición.

La construcción con tierra consiste en el aprovechamiento del suelo disponible para la fabricación de materiales o elementos constructivos (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012). El uso de la tierra en la construcción constituye una oportunidad de reducir el

impacto ambiental en la edificación, fuente de abastecimiento de material ilimitada, permitiéndonos la posibilidad, incluso, de utilizar tierra de las propias excavaciones, favoreciendo la reducción de residuos de la obra y los gastos de transporte de material. El suelo que se usa en la construcción con tierra consiste sólo en la fase mineral excluyendo la fase vegetal presente en las primeras capas del mismo. Esta fase mineral incluye arcilla, limo y arena en diferentes proporciones (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012).

La arcilla es el principal material utilizado en los materiales de tierra (Manzano *et al.,* 2007). La arcilla es producto de la descomposición química de silicatos y minerales (labradorita, micas y minerales ferromanganésicos) (Pineda *et al.,* 2007), puede ser definida como un material terroso, natural y de granulometría fina. La arcilla está compuesta esencialmente de sílice, alúmina y agua (Manzano *et al.,* 2007) y se caracteriza por configurarse estructuras coplanarias de aluminosilicatos en los cuales algunos cationes pueden ser modificados de manera fácil (Pineda *et al.,* 2007). La naturaleza particular de estos iones no es crítica como para mantener la estructura de la arcilla, sólo la carga eléctrica total es importante. En soluciones acuosas con un pH del agua normal, las partículas de arcilla presentan una carga negativa. La intensidad de la carga eléctrica depende la estructura atómica particular y la composición química de la arcilla. Por ejemplo, iones de potasio pueden ser remplazados por iones de hidrógenos induciendo a la hidratación interplanaria (Pineda *et al.,* 2007).

Según su estructura, las arcillas son clasificadas en tres grandes grupos: caolinitas, montmorillonitas e illitas. La tierra o compuesto arcilloso se puede utilizar como material de construcción para edificaciones ecológicas y confortables debido a su bajo costo, su bajo consumo de energía en la construcción y su buen comportamiento térmico (Manzano *et al.,* 2007; Pineda *et al.,* 2007).

Según las características propias de la arcilla, según lo que se disponga en un entorno regional cercano, se usará una técnica u otra de trabajo con el suelo arcilloso. Las técnicas más usuales de usos de la tierra y los compuestos arcillosos en la construcción actualmente son:

- “Bahareque”: paramentos de tierra con alma mediante entramado vegetal.

- “Cob”: mezcla de arcilla y paja conformada in situ. Masa de barro y abundante paja que se apila y se moldea a mano para formar muros monolíticos, con textura y resistencia que permiten explorar cuestiones de forma, ligereza, escala y contraste (Bestraten, 2011).

- “Tapial o tierra apisonada”: sobre moldes de encofrados) estabilizada o no, aunque actualmente la proyección es que sea estabilizada siempre. Consiste en tierra amasada y apisonada en encofrados para conformar muros monolíticos (Maldonado, 2003). Necesidad estructural de muros que van de 0.5-0.9m. De grosor con capacidad de edificarse con tapial hasta 2 plantas. Se tiene baja resistencia a compresión que origina serias limitaciones en términos arquitectónicos y de diseño estructural (Cristelo et al., 2012). La resistencia de este tipo de muros debe ser mejorada (Muntohar, 2011). En la construcción con tapial los suelos tienen un comportamiento arcilloso distintivo en cuanto que la cohesión juega un papel importante en la estabilidad del elemento constructivo.

- “Adobe”: ladrillos de tierra arcillosa cruda, de la palabra árabe “attob”, que significa “ladrillo secado al sol”. Tierra conformada en molde secado al sol que muchas veces para evitar la fractura por retracción tiene añadido de refuerzo fibroso como la paja u otras fibras vegetales. El adobe está compuesto de arcilla arenosa, agua, paja y materiales orgánicos. El adobe se usa mayoritariamente en climas cálido-secos, donde es muy durable, aunque puede ser usado en climas húmedos con preparaciones especiales. Se conocen estructuras de adobe de más de 10000 años de vida, siendo uno de los materiales más antiguos que existen. Necesidad de gran cantidad de agua para su fabricación. Densidad 1200-1500kg/m3, Resistencia a compresión: 0,53-1,72 N/mm2. (Bestraten, 2011).

- “Bloques de tierra comprimida” (BTC): evolución del adobe donde la tierra es comprimida manual o mecánicamente. Es una de las técnicas que más ha crecido y evolucionado en los últimos 50 años, especialmente en países en desarrollo (Lima *et*

al., 2012). BTC como alternativa a los ladrillos de cerámica cocida. Densidad 1700-2000kg/m3, Resistencia a compresión: 1-10 N/mm2. (Bestraten, 2011).

- “Muros de tierra vertida”.

Actualmente diferentes autores e investigadores proponen nuevas e innovadoras técnicas para trabajar con suelos arcillosos para su uso en construcción. Es se expondrá en capítulos posteriores.

3.5.2.1 Construcción con tierra o suelos arcillosos. Antecedentes y ejemplos

Antecedentes y ejemplos históricos y arquitectura vernácula en tierra a nivel global

Arquitectura vernácula

La arquitectura vernácula es la respuesta natural a las características del entorno, así como a las tradiciones y particularidades de sus habitantes. Estas respuestas son transmitidas tradicionalmente, y son de acuerdo a los mecanismos de autocorrección, enriquecidos con la actualización y reutilización (Guerrero-Baca, 1996). Con la construcción vernácula se denota una integración entre lo construido y la cultura que originan (López, 1987), como ejemplificación de la diversidad de una cultura (Guerrero, 2009). El término Arquitectura Vernácula lo podemos usar para “categorizar métodos de construcción que utilizan recursos disponibles localmente como una respuesta de la adaptación al entorno y que siguen métodos tradicionales de construcción con un conocimiento transmitido generación tras generación y que responde a los valores, economía y formas de vida de cada comunidad que la produce” (Rudofky, 1973).

Hoy día no está valorada la arquitectura vernácula, tiene estigma de pobre y cruda, existe discontinuidad en la transmisión del conocimiento, mantiene problemas de normatividad. No obstante, la Arquitectura Vernácula se vuelve de nuevo relevante a la hora de evidenciar la forma en la que se vive en relación con el entorno. (Castellanos, 2009). Se entiende como un ente cambiante, que se va modificando conforme va

evolucionando el sitio, percibiéndose la paulatina influencia de la industrialización, no solo en los procesos constructivos, sino también en los cambios de los patrones conductuales de quienes se han asentado en este medio (Guerrero Baca 1996).

El uso de materiales de la región y sistemas constructivos tradicionales con la implementación de tecnologías apropiables y actuales, sigue siendo la solución para la habitabilidad en el medio rural. “Las tendencias más recientes proponen una especie de síntesis creativa y operacional entre las denominadas técnicas tradicionales y modernas, tratando de acoplar aquellos recursos que satisfagan de manera más eficiente las necesidades de la vida contemporánea, con las rutas tradicionales, que los usuarios puedan apropiárselas y dominarlas en lugar de padecerlas” (Rodríguez, 2011).

Arquitectura vernácula en tierra

El hombre ha construido con tierra desde hace aproximadamente 9000-10000 años (Minke, 2001). La construcción con tierra se puede decir que comenzó con las primeras sociedades agrícolas, que nos llevaría a entre 12000 y 7000 a.C. (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012).

La mitad de la población mundial vive o trabaja en edificios construidos con tierra, barro o arcilla (May, 2011), estando estimado que el 30% de la población habita una vivienda construida con sistemas constructivos basados en la tierra (Barbeta, 2002), 50% en el conjunto de los países en vía de desarrollo (Angulo-Ibáñez et al.,). La Organización de las Naciones Unidas (ONU), estima que la quinta parte de la población mundial habita en viviendas hechas con estas técnicas (Rodríguez, 2011). La construcción en tierra se ha desarrollado en casi todo el mundo, la hay en todos los

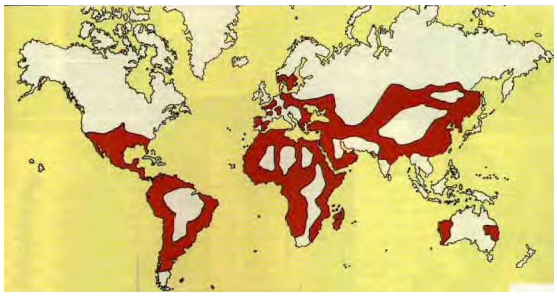


Fig. 3.5.2.1.1. Mapa de zonas con construcción con tierra (Barbeta, 2002).

continentes, variando mucho el tamaño de lo construido, desde vivienda, pequeños refugios, hasta edificios ceremoniales (May, 2011).

La arquitectura de tierra es una técnica constructiva milenaria, que se ha desarrollado sus diferentes técnicas constructivas: adobe, bajareque, tapial.

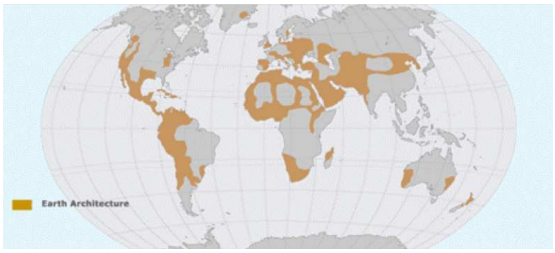


Fig. 3.5.2.1.2. Expansión de la técnica de la construcción con tierra cruda (www.terra-cruda.com).

Constituye un extenso patrimonio cultural que ha transcendido el paso del tiempo con edificios de centenares de años de existencia. Culturas milenarias emplearon la tierra como solución en todo tipo de estructuras de tierra, cuyos vestigios aún perduran (Bestraten et al., 2011). El hombre ha construido con tierra desde hace aproximadamente 9000-10000 años (Minke, 2001). La construcción con tierra se puede decir que comenzó con las primeras sociedades agrícolas situadas en Mesopotamia, entre el Tigris y el Eufrates, que nos llevaría a entre 12000 y 7000 a.C. (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012; Barbeta, 2002). Casi desde el inicio de la historia de las civilizaciones, el hombre ha utilizado la tierra arcillosa para construir. Es un principio inmediato, que fue adoptado en el momento que el hombre decidió asentarse permanente en un territorio. No siempre se disponía de madera, o de piedra de fácil trabajar para la construcción seca. He aquí la necesidad de utilizar un aglomerante que fuera capaz de unir piedras informes y de diversidad de tamaños, o de dar, de algún modo, mayor solidez y resistencia a las construcciones vegetales. (Barbeta, 2000). Se

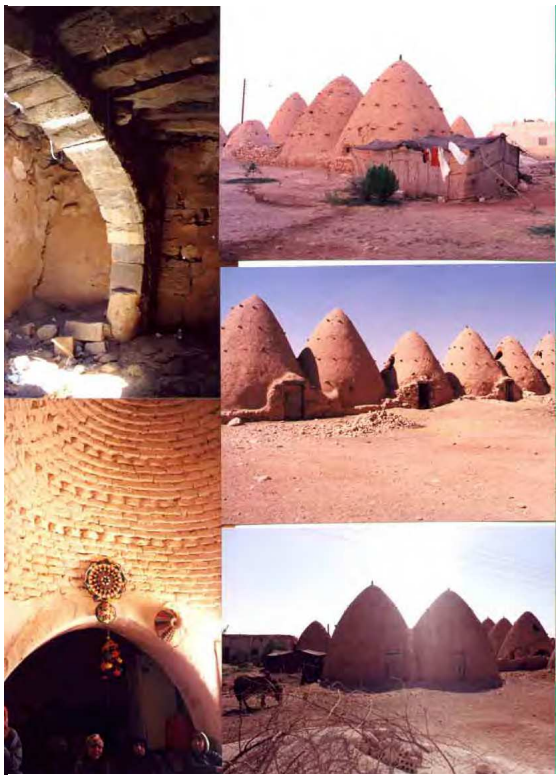


Fig. 3.5.2.1.3. Construcción con tierra en el Kurdistan Sirio (Barbeta, 2002).

pueden encontrar restos de construcción en tierra -3400 a.C., con una arquitectura de bóvedas y cúpulas, en Tepé Yajiá (Persia), o en las murallas de Nínive (Siria), o en ciudades del prestigio en su época como Jericó, la ciudad más vieja del Mundo, -2000 -1800 a.C. (Barbeta, 2002).

Las técnicas vernáculas constructivas de construcción en tierra todavía son muy utilizadas. Paradójicamente, el valor y la extensión del patrimonio edificado en arquitectura y construcción con tierra han sido sistemáticamente ignorados y ocultados por casi todas las disciplinas involucradas por las artes y la arquitectura, que no tienen la preocupación de integrarlas en sus sistemas de transmisión de conocimiento (Rodríguez, 2011).



Fig. 3.5.2.1.4. Construcción con tierra en Yemen (Barbeta, 2002).

Kurdistan Sirio

Se tiene el caso de la estructura en cúpula ojival en construcciones sirias. Existen excavaciones arqueológicas en Tell Beydar dentro del Kurdistan Sirio que revelan pueblos en estructura circular, edificados en muros de 50 y contrafuertes de75 cms de grosor , con adobe de 25x50x10 cms, hechos in situ, y cubiertas planas de 3m. de luz con rollizos de madera (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.5. Construcción con tierra en Yemen (May, 2011).

Yemen

Se tiene la referencia de las casas torre

de Yemen, levantadas con arcilla secada al sol, con ladrillos de adobe o refractarios sobre muros de piedra 671 a.C. (May, 2011; Barbeta, 2002). A medida que se eleva, varía la dimensión y nombre del adobe (garwí: 5x 50 x 30cm; abbadi: 5x45x30 cm), como la anchura del muro que pasa de dos metros en la base a 25-30 cm. en la coronación. A nivel medio se da una anchura de 60cms.desde el 671 a.C. (Barbeta, 2002).

Proceso de crecimiento orgánico permite un secado óptimo de los muros (6 meses), y una entrada en carga progresiva. Algunas de las edificaciones llegan a los 65m de altura, y tienen techos entre 3 y 6 metros. Estos edificios incluyen complejas estructuras de arcos lobulados, herraduras reforzadas con madera para absorver los empujes horizontales, y forjados de bóvedas llamadas “Ukuf”, construidas con unos adobes-madar más pequeños, fáciles de pegar y que evitan la utilización de encofrados en su ejecución (Barbeta, 2000).

En Oriente Medio, Oriente Próximo y África encontramos diversos ejemplos de construcción con tierra vernácula. Caso de las construcciones en tierra en Irán (Fig. 3.5.2.1.6). En Mali se tienen valiosos ejemplos de arquitectura vernácula en tierra, como el caso de la vivienda de tierra en el poblado de Ségou.



Fig. 3.5.2.1.6. Bóveda correspondiente al bazar de Kashan. Irán la región de Bekace (Barbeta, 2002).

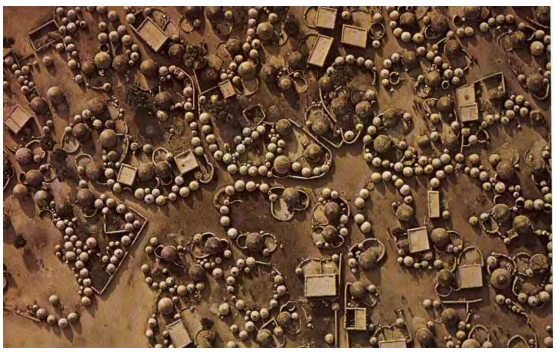


Fig. 3.5.2.1.7. Vista aérea de un Tata en Mali (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.8. Vivienda de tierra en el poblado de Ségou. Mali (Barbeta, 2002).

dobe en el edificio de adobe más grande del mundo la gran mezquita de Djenné, en Mali, con muros salpicados con canalones de cerámica que alejan el agua de las paredes. ladrillos de barro secados al sol (May, 2011).



Fig. 3.5.2.1.9. Mezquita de Djenné. Mali (May, 2011).

Construcciones en tapial con fachadas decoradas con adobes de Kashbah en Marruecos (Barbeta, 2002). Se cimientan a 50cms. con un hormigón de piedras, cal y piedra y un sobrecimiento de 20 a 50 cms.



Fig. 3.5.2.1.10. Kashbah en Marruecos (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.11. Kashbah en Marruecos (Barbeta, 2002).

En el norte de áfrica se tienen buenos ejemplos como con la Torre tradicional de adobe en Gourna, Egipto (Barbeta, 2002) o las construcciones urbanas con adobe en el desierto (May, 2011).



Fig. 3.5.2.1.12. Torre en Gourna (Barbeta, 2002).

Ejemplos interesantes se tiene con las construcciones mediante bolas de arcilla superpuestas en los Tolek Musgum, en el caso de las casas circulares en Benin y Togo, Casa de barro mediante construcción de torres circulares o en las casas de barro pintado y cubierta de paja de los Ndebele (May, 2011).

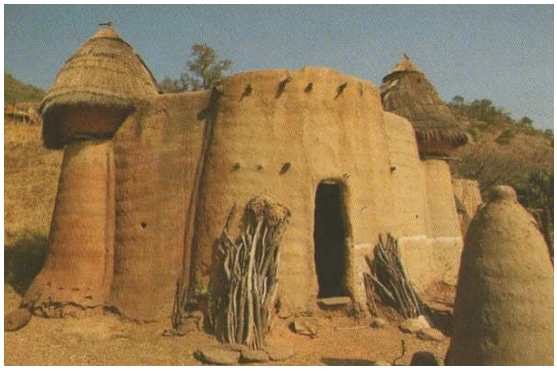


Fig. 3.5.2.1.13. Casas circulares en Benin y Togo (May, 2011).

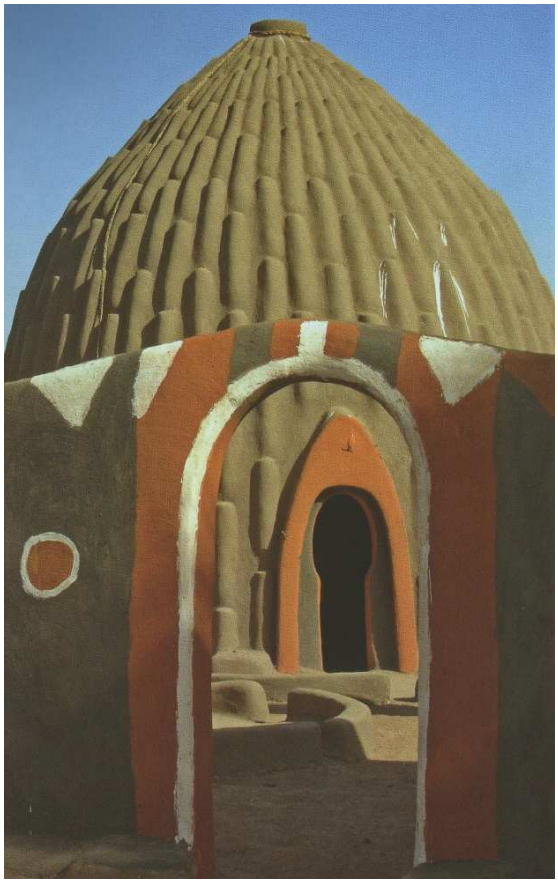


Fig. 3.5.2.1.14. Tolek Musqum (May, 2011).



Fig. 3.5.2.1.15. Casas de Barro de los Ndebele (May, 2011).



Fig. 3.5.2.1.16. Tulou de Fujian, china http://en.wikipedia.org/wiki/Fujian_Tulou#/media/File:Zhenchenglou.JPG

China

Gran ejemplo se tiene con la construcción Tulou de Fujian, china. Muros de tierra apisonada de hasta 1.8mts de ancho, a veces reforzadas con bambú, sobre cimientos de piedra, recubiertos con arcilla (May, 2011) y los edificios tradicionales tibetanos de Lhasa donde se usaba tierra para la construcción de muros y cubiertas (May, 2011).



Fig. 3.5.2.1.17. Tulou de Fujian, china http://en.wikipedia.org/wiki/Fujian_Tulou#/medi

Arquitectura mediterránea y Europa

En la Europa mediterránea la Construcción con Tierra se distribuyó desde Occidente por la colonización árabe como ejemplifica Medina al- Zahra (Córdoba, España), y por Oriente nos la encontramos desde las costas del Ego (entramado de adobe), en las fortificaciones micénicas (aparejo ciclópeo), en Khiro Kifia, o en el Palacio del rey Minos en Cnossos, del 2000 a.C. todas en Creta (Barbeta, 2002).

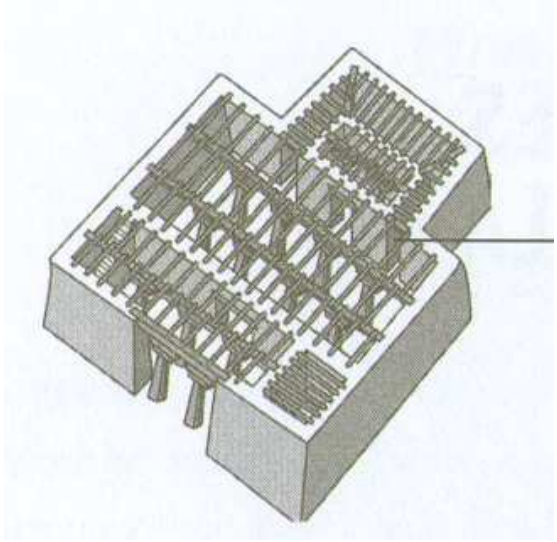


Fig. 3.5.2.1.18. Edificios tradicionales tibetanos en Lhasa (May, 2011).

También en culturas posteriores se continua utilizando , como en el templo de Hércules (palacio Halicarnaso, en Atenas), en Cartago (-820), en el hábitat popular de Roma e incluso más tarde, en la Galia romana, como Lugdunum (Lion, Francia) (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.19. Viviendas de la República Checa, Villa de Sobotista, año 1795 (Barbeta, 2002).

Se encuentran ejemplos de construcciones en adobe en U.K., mediante la mezcla de fibra, agua, arcilla y áridos. Edificios con encaballadas en U.K. anteriores a 1200. La cubierta apoyaba sobre estructura de madera por lo que los cerramientos se construían con materiales diversos, adobe, tepe, arcilla etc. existen como 4000 en U.K. Casas de adobe en U.K. Tierra comprimida de lodo, arcilla, arena y gravilla que se amasaba con paja y agua, para muros, bancos, hornos etc. estructuras hasta de 700 años en U.K. (May, 2011).

En Holanda y norte de Alemania se tienen ejemplos de construcciones con muros con estructura de madera rellena de adobe, cañas o ladrillos (May, 2011).

Otro antecedentes se tiene con el Gamme de Laponia, refugios para pueblos seminómadas de laponia basado en estructura de varas recubierto de tepe (May, 2011).

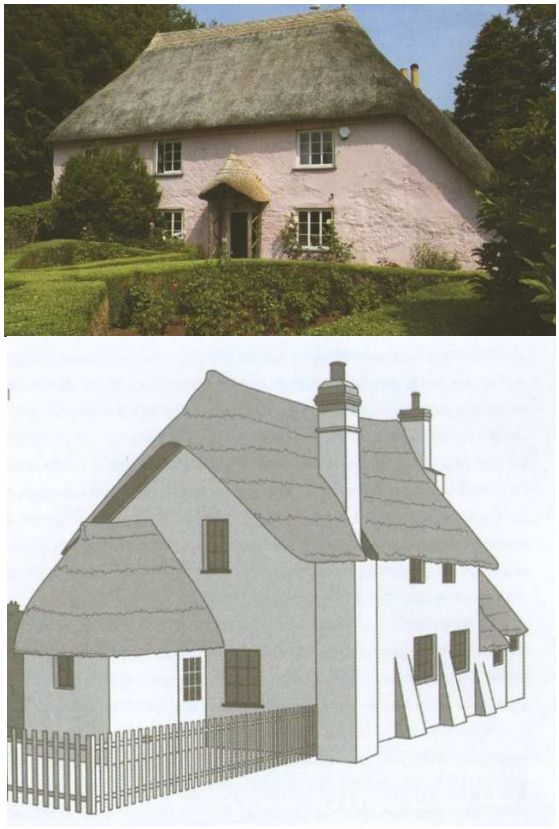


Fig. 3.5.2.1.20. Casas de adobe en U.K. (May, 2011).

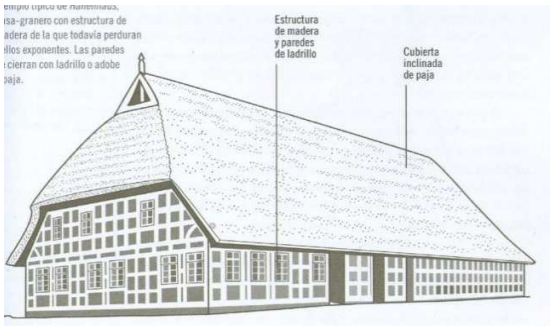


Fig. 3.5.2.1.21. Construcciones con tierra en Holanda (May, 2011).

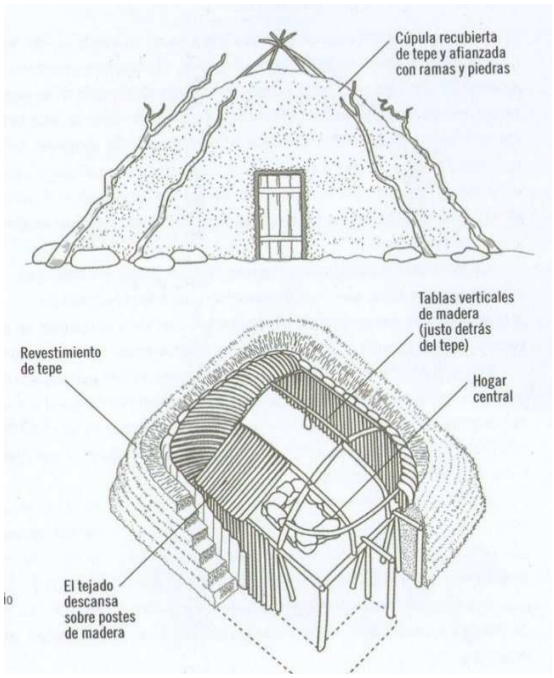


Fig. 3.5.2.1.22. Gamme de Laponia (May, 2011).

España

A través de los árabes se introdujo en España, sea en adobe o tapial, pero anteriormente ya se había utilizado en asentamientos Neolíticos preibéricos, como lo demuestran los restos arqueológicos que hemos estudiado del Cabo de Gata, en Almería y el que se encontró en Sabadell, Barcelona, de más de 4.000 años de antigüedad, construcción en adobe encañizado y pared de mano. Se pueden encontrar plazas de toros de tapial, la Alhambra de Granada, en tapial calicastrado. S. XII-XIV o viviendas y edificación con Tapial y tapial con cal en Cataluña (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.23. Alhambra de Granada (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.24. Viviendas en tapial cali castrado en Cataluña (Barbeta, 2002).

El barro crudo se usó en las construcciones tradicionales en las regiones de Castilla y León de las siguientes formas (Barbeta, 2000): Se empleó como mortero, para unir los cantos rodados o la mampostería de piedra. Este sistema se utilizó en toda la Tierra de Campos en los llamados Lizares y en la misma ciudad de Numancia; Se empleó Mezclado con paja, como revoque de los muros de adobe o de las tapias de tierra; Para reforzar los muros y tabiques con un esqueleto formado por varas o tiras de madera unidas a unos palos verticales cubiertos de barro y con un revoque externo de cal; Los suelos solían ser de tierra apisonada, ya utilizado en las cabañas de los antiguos pobladores a las casas



Fig. 3.5.2.1.25. Construcciones tradicionales en tierra en Castilla y León (Barbeta, 2002).

humildes de Tierra de Campos; Y las dos técnicas más utilizadas son el adobe y el tapial.

Estados Unidos y Latinoamérica

En el continente americano la tierra como material constructivo para la construcción edilicia tiene dos momentos importantes, el primero el uso del material en las culturas prehispánicas y el segundo la tradición constructiva inducida por los europeos, lo cual generó una importante serie de edificaciones de diversos géneros (Rodríguez, 2011).

En Latinoamérica, la tecnología andina precolombina se basaba en “la pared de mano” o “bollos de barro” que se utilizaba para construir murallas en tongadas de 80 cm. como estructuras piramidales, que a veces se mezclaban o encofraban con piedra. Como también podemos observar, se producen paralelismos en las técnicas utilizadas en diversos lugares del Planeta. Antes de la intrusión del tapial a través de la colonización, ya se había utilizado el adobe, que aparece entre el -500a.C y -600A.C, o la quincha, e incluso bajo relieves de tierra, que aún perduran. La Pirámide del Sol, Trujillo Perú, 50metros de altura fabricado en adobe (Barbeta, 2002). En Norteamérica, se tiene el antecedentes del pueblo de Taos, Nuevo México, construcciones con muros de adobe, 1000 d.c. a 1450 d.c. (May, 2011).



Fig. 3.5.2.1.26. Pirámide del Sol, Trujillo, Perú (Barbeta, 2002).

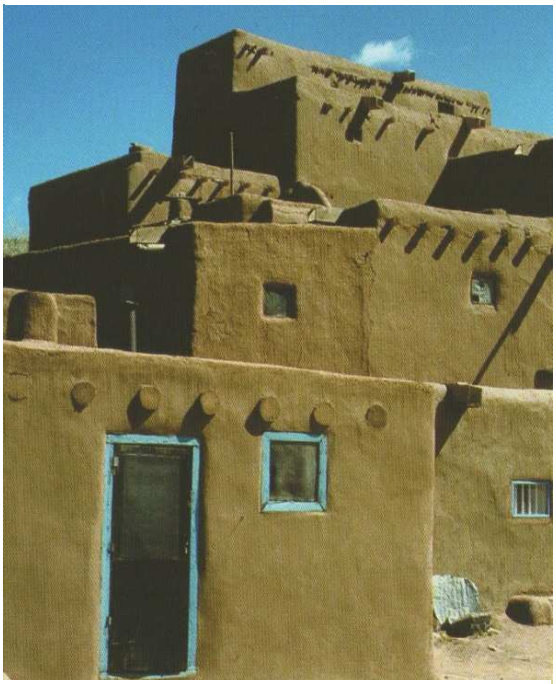


Fig. 3.5.2.1.27. Construcción en adobe en Taos, Nuevo México, USA (May, 2011).

Casa paisa: Adobe para las paredes (May, 2011). Otra estructura de tierra tradicional en Latinoamérica, y en concreto en Colombia, es el bajareque, postes de madera entramados con ramas, zunchados por dos vigas de madera, una superior y otra inferior, sobre un zócalo de piedra. El entramado está recubierto por una de las dos caras, de barro con fibras. Es una estructura ligera, y resistente con gran flexibilidad y capaz de soportar seísmos, aunque debido a la colonización y a la desforestación ha caído actualmente en desuso (Barbeta, 2000).

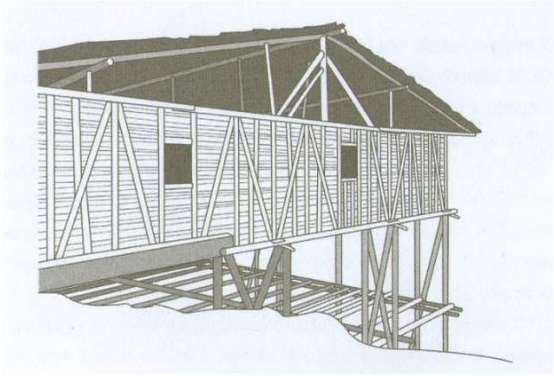


Fig. 3.5.2.1.28. Casa Paisa (May, 2011).

Se encuentran también ejemplos con las construcciones tradicionales bolivianas construidas en tierra. (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.29. Construcción tradicional boliviana en tierra (Barbeta, 2002).

Antecedentes y ejemplos históricos y arquitectura vernácula en México

Arquitectura vernácula en México

En México, la arquitectura tradicional que hasta hace quince años era un patrimonio cultural en la mayoría de los estados, casi se ha perdido en su totalidad. La migración de las personas de las regiones rurales a los centros urbanos del país o al extranjero, en su mayoría a los Estados Unidos, se podría considerar uno de los principales factores para la pérdida de la vivienda tradicional. Otros factores es la falta de aspectos legales que protejan a la vivienda vernácula como patrimonio o sitios

históricos (Roux, 2011). Se da olvido de los conocimientos tecnológicos tradicionales junto a la destrucción de la arquitectura vernácula por sustitución por edificios de mayor rentabilidad y por el abandono de zona rurales (López, 1987).

La arquitectura vernácula mexicana tiene particularidades tanto locales como regionales, patrimonio arquitectónico olvidado, sin embargo, constituyendo la gran mayoría del patrimonio construido del país. Arquitectura vernácula como equivalente a Arquitectura nativa que nació de un lento y decantado proceso histórico, en el cual la mezcla de elementos indígenas, africanos y europeos han sido la base de la conformación del propio país, constituyéndose la integración como la esencia de su identidad actual. Se da un olvido de los conocimientos tecnológicos tradicionales. La cultura indígena se da como sustrato y fuerza determinante. Se tienen narraciones y crónicas sobre aspectos específicos como materiales empleados. Las casas de paja son diferenciadas de las de adobe y de las de cal y canto, siendo estas últimas símbolo de cierto rango social (López, 1987).

En la arquitectura vernácula mexicana, el agente dominante es el uso de materiales regionales de disponibilidad presente, asequibilidad inmediata. Interrelación de la tecnología y el material empleado según la disponibilidad de recursos de cada lugar (Guerrero, 2009). Lógica estructural dependiente de los materiales regionales (Tejeda, 1992). En México se da mestizaje en sistemas constructivos con la arquitectura vernácula. Se da herencia de tecnologías de los colonizadores más en la arquitectura representativa y de estilo. Arquitectura vernácula basada en materiales de construcción que respondían al entorno natural y que derivada de conocimientos ancestrales, como fuente de conocimiento que aporta al actual concepto de sustentabilidad, que utilizaba materiales que necesitan labores continuas de mantenimiento (Guerrero, 2009).

En México, la arquitectura vernácula se puede englobar en dos grandes grupos (Guerrero, 2009):

- Estructuras entramadas, dónde, en el caso de la tierra, se añade a una retícula formada por troncos, ramas, varas, dif. gramíneas, pencas, quiotes de agaves, tule o junco, según la región, cubriendo los huecos en forma de barro crudo, y otros materiales, cuando hace falta un cierto aislamiento térmico o como protección adicional a los entramados para evitar su deterioro.

- Mampostería: a base de materiales pétreos con dimensiones relativamente uniformes que trabajan fundamentalmente a compresión normalmente colocadas superpuestas. El adobe es el ejemplo de construcción con tierra de este tipo dentro de la arquitectura vernácula, existiendo también el uso de cantos rodados, rocas talladas y ladrillos.

En general, se entiende la arquitectura vernácula como manera sustentable de adaptación al medio natural y cultural, con sistemas constructivos económicos y del lado de la memoria colectiva. Arquitectura Vernácula como con cierta carga axiológica. Hoy día existe creencia preconcebida de que los materiales de construcción son mejores y más resistentes si proceden de un sistema industrializado. Patrimonio vernáculo también obedece al modo en el que es usado el edificio por la comunidad. El material usado en arquitectura vernácula alterado por la afectación del medio. Arquitectura popular repensada desde los materiales de bajo costo, esquemas de autoconstrucción, y mecanismos de gestión financiera (Villarruel *et al.,* 2009).

Arquitectura vernácula en tierra en México

Arquitectura vernácula muy cercana a poder ser sinónimo de arquitectura en tierra (Teresa de Jesús Estrada Lozano, Arquitectura Vernácula). En México, las diferentes técnicas en base a tierra han tenido presencia en casi todo el país, desde Chihuahua hasta Yucatán (Roux, 2011). La arquitectura en tierra se empleó, históricamente, para erigir ciudades completas en las diversas regiones del país, a pesar de los múltiples climas y características geográficas existentes. Actualmente, patrimonio arquitectónico construido en tierra en proceso de desaparición. (Meraz *et al.,* 2013).

El adobe es la mampostería de mayor difusión en México, asentados con morteros de lodo por la abundancia de suelos adecuados para su elaboración, por la facilidad para la transformación y edificación y por sus propiedades térmicas y acústicas. Los adobes utilizados se hacían añadiendo fibras y otros materiales (Guerrero, 2009).

También existen mamposterías de tierra conformadas por tapial y por barro colado, sistemas constructivos que permiten edificar muros en secciones, donde se vierten y compactan por capas dentro de moldes y cimbras. Esta técnica existe desde tiempos prehispánicos, como en Paquimé y las cuevas de la sierra madre occidental (Guerrero, 2009).

EN crónicas antiguas se hacen referencia a las construcciones de adobe y de cal y canto, siendo, estas últimas, símbolo de cierto rango social. Primeras referencias en el siglo XVI, por parte de Fray Diego Landa, de existencia en Yucatán de muros de bambú al que se le agregaba barro revuelto con hierba (Bajareque). Relación de Cristóbal de Salazar sobre el poblado de Coatepec en 1579: Casas con cimiento de piedra y paredes de adobe. Muros de cal y canto con argamasa de cal, arena y tierra, todo mezclado para su fortaleza. Mismo documento sobre el pueblo de Cuezala: “Son las casas y edificios de piedra y barro, y algunas de adobes…” (López, 1987).

Norte de México. Chihuahua.

Uno de los ejemplos más espectaculares del norte de Mesoamérica es el asentamiento de Paquimé, localizado en Chihuahua. Caso típico de arquitectura de tierra, donde los arqueólogos han identificado ocho tipos diferentes de muros en función de sus espesores y sistemas constructivos. Se han hallado estructuras de lodo moldeado, adobe, tapial y bahareque (Guerrero, 2002).



Fig. 3.5.2.1.30. Paquimé, Asentada en el desierto chihuahuense. (Guerrero, 2002).

Tenemos ejemplos de construcción en tierra en el norte con el caso característico de las casas-cuevas “de las ventanas”, casas construidas en tierra en zona excavada y aprovechando huecos de la montaña y por lo tanto su inercia térmica.



Fig. 3.5.2.1.31. Cueva de las ventanas (Md4arqutiectura bioclimática).



Fig. 3.5.2.1.32. Patio de vivienda prehispánica en tierra en Paquimé (Md4arqutiectura bioclimática).

Noreste Mexicano



Fig. 3.5.2.1.33. Construcción en Bahareque en la zona húmeda de Tamaulipas (Roux, 2011).

Materiales regionales, asequilidad inmediata. Uso del adobe en la construcción de muros, compitiendo con el sillar, que se usa más en arquitectura representativa (Tejeda, 1992). En la vivienda rural del altiplano tamaulipeco se aplica la técnica constructiva milenaria de tierra. En las partes altas del estado el clima es templado, en las partes bajas caluroso. Es la región donde menos llueve y son frecuentes las heladas. Como respuesta al entorno natural, la tipología constructiva utilizada en las viviendas edificadas en la zona utiliza los materiales que la naturaleza ofrece en gran cantidad, como es la tierra y la piedra. La cimentación de las viviendas es de buena calidad, ya que se utiliza la piedra basáltica de la región, conocida como piedra azul, junteada con mortero, antiguamente de cal apagada y posteriormente de cemento arena (Roux, 2011).

En el estado se encuentran ejemplos de muros de Bajareque. Hasta hace aproximadamente 50 años, todavía era un material utilizado en la construcción de muros para vivienda. El sistema funcionaba a base de la utilización de puntales o varas verticales denominados “horcones” de barreto, haciéndose una “cesta” con varas de carrizo más delgadas, dejándose la estructura, sin recubrimiento. Este sistema se empleó para la construcción de cocinas, cobertizos de guardado de alimentos (Roux, 2011).

Es el sistema más empleado y comprende el empleo de adobes de 12 x 14 x 28 cm, fabricados tradicionalmente, se utiliza tierra de la región, mezclada con fibras vegetales y estiércol de ganado, se dejan secar al sol durante 10 días y una vez secos se procede a fabricar los muros. El junteado de los ladrillos se hace con la misma tierra de con que se fabrican los adobes utilizando rajuela de piedra para el nivelado. Una vez terminado los muros se puede dejar sin recubrir, pero preferentemente se recubre con el mismo barro y posteriormente se les aplica pintura vinílica (Roux, 2011).

Región huasteca de Tamaulipas

En la sierra de Tamaulipas se dan plataformas circulares, rellenas de lodo y piedra y en ocasiones recubiertas con lajas, que constituían la base para desplantar los templos y viviendas. Dentro de otro de los patrones de la vivienda huasteca que encontramos en Tanhuijo, se usa un sistema constructivo con basamentos constituidos por tierra y lodo entremezclado con pedacería y conchas de ostión, debido a la cercanía del mar. La arquitectura doméstica en la Huasteca Hidalguense, suele estar hecha con muros de Chicheve, esto es, un entramado de otates con enjarre de arcilla, o tierra de río y zacate, en otras partes conocido como bajareque (López, 1987).

Estado de Querétaro y Bajío

En la parte semidesértica del estado, como Cadereyta de montes, muros de piedra cubiertos de lodo. Arcilla más usada para ligazón de la piedra (Dorantes, 2009).

En el 2009, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Dirección de Sitios y Monumentos de Querétaro publica un "Inventario de las Capillas Familiares Otomí-Chichimecas en el espacio cultural", que consiste en un estudio y análisis de espacios singulares sagrados, donde a partir de una descripción arquitectónica, de fachada, elementos de identificación, espacios arquitectónicos y sistemas constructivos usados en las capillas familiares de varios municipios dentro caracterizados por la cultura Otomí-Chichimeca en el centro del estado de Querétaro, se identifican algunos casos donde se hace uso de sistemas constructivos en base a tierra, en concreto usando adobe.

Capilla en Tolimán, en el barrio del Granjeno, Querétaro. Construcción con muros de adobe de 0.7m, con aplanado blanco como recubrimiento y cubierta de viguería de madera y terrado.



Fig. 3.5.2.1.34. Capilla en Granjeno, Tolimán, con muros de adobe (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Dirección de Sitios y Monumentos de Querétaro, 2009).



Fig. 3.5.2.1.35. Capilla en Granjeno, Tolimán, con muros de adobe (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Dirección de Sitios y Monumentos de Querétaro, 2009).

Se tiene el caso de otra capilla en el mismo barrio y localidad que el caso anterior donde se construye igual con muro de adobe, en este caso, de 0.9m, sin aplanado en el exterior, con cubierta de lámina galvanizada sobre vigas de madera.



Fig. 3.5.2.1.36. Capilla en Granjeno, Tolimán, con muros de adobe (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Dirección de Sitios y Monumentos de Querétaro, 2009).

También en Tolimán, en este caso en el barrio de Tequesquite, encontramos otra capilla familiar con muros de adobe de 0.6m de ancho, con aplanado de color blanco, actualmente sin cubierta, pero que tuvo cubierta de madera y terrado.

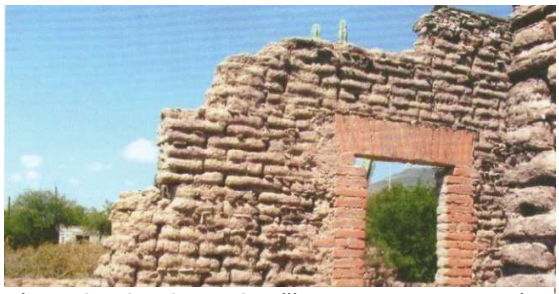


Fig. 3.5.2.1.37. Capilla en Tequesquite, Tolimán, con muros de adobe (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Dirección de Sitios y Monumentos de Querétaro, 2009).

En el mismo municipio, en el barrio del pueblito, se encuentra en estado ruinoso otra capilla construida con muros de adobe de 0.45m y cubierta plana.



Fig. 3.5.2.1.38. Capilla en Pueblito, Tolimán, con muros de adobe (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Dirección de Sitios y Monumentos de Querétaro, 2009).

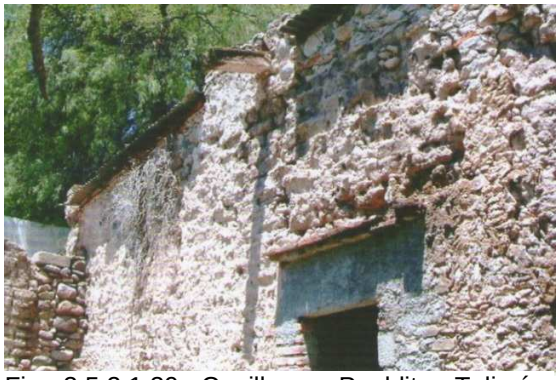


Fig. 3.5.2.1.39. Capilla en Pueblito, Tolimán, con muros de adobe (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Dirección de Sitios y Monumentos de Querétaro, 2009).

Sierra Gorda de Querétaro

Es importante el trabajo en torno a las culturas populares relacionado con el desarrollo sostenible, que conlleva un apoyo al bienestar económico con el reconocimiento y fomento de valores culturales q crean identidad. Áreas donde encontramos arquitectura vernácula ligada en cierta forma con valores altos de emigración de la población y problemas de acceso a la educación. Arquitectura vernácula como un elemento vivo que sufre transformaciones y convive de manera respetuosa con su medio natural. Transmisión de una tradición constructiva como parte de la identidad regional. Esto se altera por la migración y con que la arquitectura vernácula o sus técnicas es vinculada con la pobreza (Álvarez, l., 2009). En la Sierra gorda se hace estudio de arquitectura vernácula en corredor de las misiones franciscanas, se estudian 113 localidades, 69 con existencia de arquitectura vernácula. Se observa la aplicación de diferentes técnicas como por ejemplo el del "enjarre", cruce de varas verticales y horizontales sobre la que se aplica una capa de arcilla mezclada con agua. El enjarre en aplicado tanto en la parte exterior como interior (Dorantes, 2009). Bahareque o enjarre, más común en Jalpan y Arroyo Seco, y tapial inexistente en



Fig. 3.5.2.1.40. Detalle constructivo de la técnica de Enjarre ("De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro", Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro, 2009).



Fig. 3.5.2.1.41. Detalle constructivo de la técnica de Adobe ("De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro", Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro, 2009).

Jalpan, y más usado en Arroyo Seco pero también en Landa. Se encuentra adobe en, Jalpan, Arroyo Seco y Landa, destancando en Landa, por su número de casos.

Se encuentra adobe, en algunos lugares de la sierra conocido como tabique, secado tradicionales, con tiempo de secado dependiente de las condiciones climáticas del lugar. No existe uniformidad de dimensiones, con variaciones de entre 30 y 40. Hoy día, la técnica tradicional del terciado se sustituye por el uso de castillos de concreto, que conlleva un diferente comportamiento estructural. En cualquier caso, el remate s suele solucionar con elemento de madera denominado Morillo para cargar la estructura de la cubierta.



Fig. 3.5.2.1.42. Detalle constructivo de la técnica de Adobe ("De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro", Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro, 2009).



Fig. 3.5.2.1.43. Vivienda construida con técnica de Adobe ("De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro", Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro, 2009).



Fig. 3.5.2.1.44. Vivienda construida con técnica de Adobe.

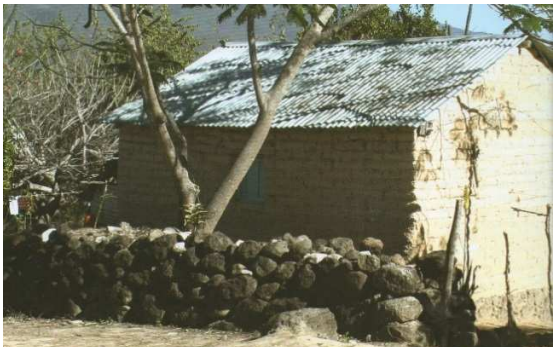


Fig. 3.5.2.1.45. Viveinda construida en adobe ("De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro", Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro, 2009).

El tapial es otra técnica que encontramos en la Sierra Gorda de Querétaro, siendo un sistema usado de manera con apisonado normal, a veces con añadidos vegetales, con tierra tamizada o con diferentes tamaños de pétreos, a veces apisonado cubierto por aplanado, a veces la tierra se mezcla con pequeñas cantidades de cal.



Fig. 3.5.2.1.46. Detalle de la técnica de enjarre o bajareque ("De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro", Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro, 2009).

Otro sistema con gran plasticidad, es el bajareque o enjarre. Consiste en barro mezclado con materiales maderables. Huacal o parte interior a la malla de ramas/varas, se cubre con lodo en varias capas, mezclado con elementos vegetales. A veces en el entramado se colocan piedras de diferentes tamaños y esto se recubre con el lodo anterior. Se termina con un acabado de enjarre de lodo.

México central.

Se documenta el uso de adobe estucado en las construcciones habitacionales en Teotihuacán, así como que se documenta que las pirámides principales, la del sol y la luna fueron construidas mediante un sistema de recuadros de adobe que rellenaron con tierra, siendo su núcleo de barro (Mangino, 1990).



Fig. 3.5.2.1.47. Imagen de Pirámide de Teotihuacan

En la vivienda azteca los muros se encontraban representados y ornamentados con rombos, sillares alineados y cuatrapeados de diferentes materiales como ladrillos, adobes o piedra. En la capilla de nuestra señora del refugio, construida a fines del SXIX fue construida con muros de mampostería en sus partes bajas y de tepetate y adobe, en los remates y pretiles. En la casa vernácula de Tepoztlán los materiales son de piedra mamposteada o bien de adobe. Se identifica la tierra arcillosa como el mejor elemento para fabricar adobes. Tanto en Tepoztlán como en Tlayacapán estos bloques de barro crudo llegan a adquirir una gran resistencia y duración, siempre y cuando estén debidamente preparados y protegidos. En el pueblo de Tlacayapan se encuentra el monte de “Palo”, patrimonio de los habitantes y especialmente de los alfareros, porque de él se extraen la mejor arcilla y barro de aquellos valles (López, 1987).



Fig. 3.5.2.1.48. Casa de adobe tradicional en proceso de demolición, en Chalmita. Foto: L. Meraz (Meraz et al., 2013).

En el pueblo de Chalmita, en México, la arquitectura tradicional en adobe y bajareque, cuya historia se puede remontar a la cultura prehispánica, ha desaparecido en su casi totalidad. El uso de tierra en las construcciones de Chalmita no ha estado sujeto a tratamientos especiales, aunque para períodos, de calor o frío intenso su uso amortigua el efecto de incomodidad. En cambio, la gran humedad presente en el período de lluvias, puede ser un factor contrario al uso de tierra en una construcción, las casas del pueblo de Chalmita siempre fueron de adobe, combinando estructuras de bajareque (posiblemente de tradición prehispánica), hasta hace unas décadas. La casa tipo de Chalmita presenta grandes similitudes con casas de poblaciones del centro de México: de un nivel, con cimientos de piedra alargados como protección, uso del adobe formando muros donde predomina el macizo sobre el vano, techo de una sola agua que baja al centro del predio, dinteles de madera en vanos, uso de morillos y tejas de barro en techumbre (Meraz *et al.,* 2013).



Fig. 3.5.2.1.49. Muro desarrollado con la técnica de adobe en Tepoztlán.

En la zona de Tepozotlán y Amatlán y alrededores se observa gran uso de la construcción por medio de adobes, en su manera tradicional. Se tiene registro de muchos casos de arquitectura vernácula con esta técnica. El muro de adobe se suele fundamentar en un murete de piedra y también es característico el introducir piedras entre las juntas de adobe con adobe.



Fig. 3.5.2.1.50. Muro desarrollado con la técnica de adobe en Amatlán.



Fig. 3.5.2.1.51. Muro desarrollado con la técnica de adobe en Amatlán

Michoacán.

“Poco a poco y como va pasando el tiempo la arquitectura tradicional de las comunidades rurales del estado de Michoacán, han desaparecido para ser remplazadas por una forma arquitectónica más contemporánea, esto tiene su origen en muchos y diversos factores” (Hernández, 2011).



Fig. 3.5.2.1.52. Arquitectura rural en Michoacán (Hernández, 2011).

Entre las regiones de la Ciénega de Zacapu, Cuitzeo, Chapala y el Bajío michoacano, podemos encontrar vestigios de grupos étnicos tales como: Nahuas, Otomís, Matlazincas, Tecos y Purépechas, estos último los que mayor aportación cultural tienen en esta región. Para la construcción de la vivienda utilizaban los materiales que la naturaleza les ofrecía, por lo tanto las fundaciones o cimientos eran de piedra, los muros de adobe con espesores de 30 cm. y las cubiertas de palma. Los revoques eran de barro y pintados. En los techos la paja se colocaba sobre una armazón de vigas de madera, con inclinación para el escurrimiento del agua, en algunos casos la paja fue sustituido por el “tejamanil” que es una lámina desgajada de sección triangular de madera de pino o abeto con medidas de 12 cm. por 90 cm.



Fig. 3.5.2.1.53. Sobrecimiento en Santiago Asajo, Michoacán (Hernández, 2011).

La cimentación se realiza con piedra braza de la región, asentada con arcilla, cuya profundidad varía entre 0.80 m y 1.00 m, sobre saliendo en altura variable sobre el terreno natural y que funciona como fundación o zócalo de los muros, cuya función es proteger a estos de la absorción de humedad por capilaridad y del impacto de la lluvia.



Fig. 3.5.2.1.54. Muro construido con técnica de adobe en Michoacán (Hernández, 2011).

Los muros están construidos con adobes, elaborado con tierra arcillosa, cuyas medidas son de 10 x 40 x 60 cm. La tierra usada para la fabricación de los adobes tiene propiedades plásticas aglutinantes, también cuenta con agregados inertes y fibras que le dan una mayor resistencia a la tensión. En la región se utiliza la arcilla caolinita y la fibra es zacate rojo, paja o espigas de grano como agregados. El espesor puede ser desde los 40 a los 60 cm, están asentados con la misma tierra arcillosa, son colocados a hilo y tizón, para posteriormente recibir un recubrimiento de la misma arcilla arcillosa. La cubierta está constituida por las vigas del tapanco, la tapa de tablón, las vigas largueros, aleros, caballetes, fajilla de madera y la cubierta que es de teja de barro.



Fig. 3.5.2.1.55. Muro construido con técnica de adobe en Michoacán (Hernández, 2011).

En Michoacán, los templos de la orden de los Franciscanos eran de modestas proporciones, sencillos y con preferencia por el uso del adobe. Los frailes no sólo se

encargaban de evangelizar, sino que, entre otras labores, formaban adobes etc. (López, 1987).

Tabasco

En Tabasco tenemos el caso del complejo arqueológico de La venta, ruina olmeca (800 a.c.), donde se documenta uso de material de tierra sin cocer (ladrillos y adobes, combinado con recubrimientos parcial de piedra acomodada (Mangino, 1990).

Oaxaca

En el valle de Oaxaca las edificaciones con adobe, carrizo, cantera y madera eran resultado del sistema constructivo tradicional (Aguirre, 2012). Se tienen ejemplos como el de la vivienda tradicional de la comunidad de Santa Maria Yahuiche, Sierra Norte de Oaxaca o en la comunidad de Ixtlan, Sierra norte de Oaxaca (Sanchez, 2013).



Fig. 3.5.2.1.56. Vivienda tradicional de la comunidad de Santa Maria Yahuiche, Sierra Norte de Oaxaca (Sanchez, 2013)



Fig. 3.5.2.1.57. Vivienda tradicional en adobe en la comunidad de Ixtlan, Sierra norte de Oaxaca (Sanchez, 2013)

Chiapas

Se tienen muchos ejemplos de construcción con tierra, sobre todo en base a adobe, en la arquitectura vernácula chiapaneca.

Vivienda tradicional con los adobes vistos, interior del Jardín Jaguar, Nabolom. Fuente: Jaqueline (Jiménez *et al,* 2013).



Fig. 3.5.2.1.58. Vivienda tradicional con los adobes vistos, interior del Jardín Jaguar, Nabolom. Fuente: Jaqueline Jiménez (Jiménez et al, 2013).

Mexicas y tlaxcaltecas como un componente de la estructura urbana de San Cristóbal ambos grupos indígenas eran expertos en la construcción con adobe, la cual difundieron en todas las tierras conquistadas.

Se encuentran numerosos casos de construcciones tradicionales con base en la construcción con tierra y en concreto se da mucho desarrollo de la técnica del adobe.



Fig. 3.5.2.1.59. Restos de la pintura de cal que protege a los adobes en las fachadas. Fuente: Jaqueline Jiménez (Jiménez *et al,* 2013).

Las paredes que correspondían a la técnica que se conoce genéricamente como bajareque, tenían una estructura de cañas o varas, cuyos intersticios eran rellenados de lodo revuelto con gran cantidad de fibras –principalmente paja–, tanto en sus fachadas como en el interior de las habitaciones. Los exteriores regularmente se revocaban o pintaban con cal para su protección de la lluvia (Jiménez *et al,* 2013).



Fig. 3.5.2.1.60. Construcciones tradicionales en tierra en San Cristobal de las Casas.

Se tiene muy ejemplo en Abrasolo - Ocosingo, famoso por su centenaria Iglesia construida en Adobe. Se dan el caso de técnicas de bahareque en casas pequeñas y compactas, donde los listones y postes se disponen para constituir la estructura, con protección del muro por medio de la cubierta volada. Sobre los listones espaciados se aplica paja y barro.



Fig. 3.5.2.1.61. Construcciones tradicionales en Bahareque en Abrasolo – Ocosingo.



Fig. 3.5.2.1.63. Construcciones tradicionales en Bahareque en Abrasolo – Ocosingo, Chiapas. Fuente: Varun Thautam.



Fig. 3.5.2.1.62. Construcciones tradicionales en Bahareque en Abrasolo – Ocosingo.



Fig. 3.5.2.1.65. Construcción en adobe en HUixpan, Chiapas. Fuente: Varun Thautam.



Fig. 3.5.2.1.64. Iglesia de 300 años construida en adobe en HUixpan, Chiapas. Fuente: Varun Thautam.

En Huixpan destaca la Construcción con adobe de la iglesia que se levanta en la plaza central de la población con casi 300 años de antigüedad. Los muros se revocan y pintan con cal.

Existen diferentes edificios en la zona centro de la población, en torno a la plaza principal, donde destaca la estructura y sistema constructivo en base a tierra, con muros masivos de hasta 50 cms., con cubiertas de madera ligera para cerrar. Las paredes están reforzadas con paja, pudiendo tener como 200 años de antigüedad, estando la mayoría de estos edificios en perfecto estado, a pesar de ser una región con fuertes lluvias.

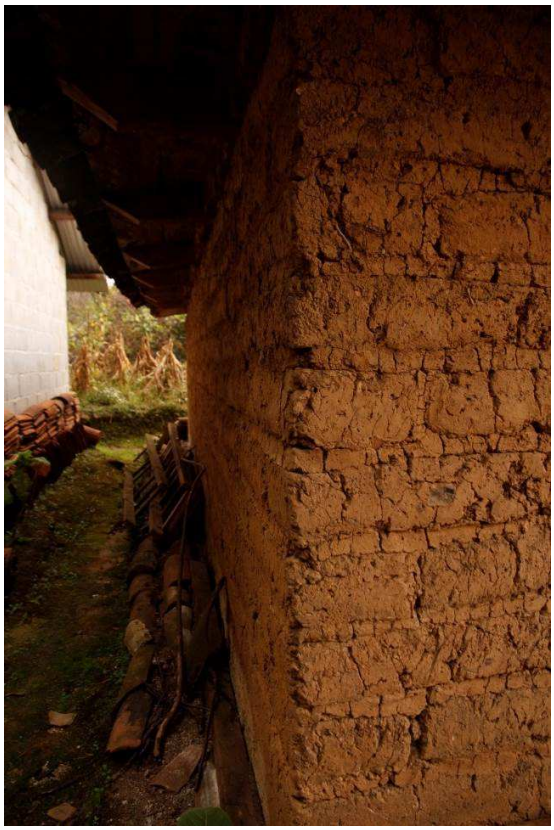


Fig. 3.5.2.1.66. Detalle deconstrucción con tierra en estado de deterioro en HUixpan, Chiapas. Fuente: Varun Thautam.



Fig. 3.5.2.1.67. Construcción con tierra en HUixpan, Chiapas. Fuente: Varun Thautam.

San Juan Chamula

Con reticencias al pasado, en San Juan Chamula se puede vivir la esencia de una población de Chiapas caracterizada por la construcción con tierra.

La mayoría de las construcciones son a base de bloques de adobe secados al sol sobre cimientos de piedra.

El asentamiento y los adoberos se establecen allí donde hay agua y suelo arcilloso. Los adobes son fabricados a mano con moldes de madera, secados por unos meses, utilizando, los adoberos, el resto del año para cultivas y trabajando la tierra para subsistir.

En un entorno donde la construcción se integra con el ecosistema circundante la construcción con tierra hace que se mimetice con el entorno con variaciones entre construcciones basadas en adobe y construcciones con la técnica de Bahareque.



Fig. 3.5.2.1.68. Construcción con bahareque en San Juan Chamula, Chiapas. Fuente: Varun Thautam.



Fig. 3.5.2.1.69. Construcción con adobe en San Juan Chamula, Chiapas. Fuente: Varun Thautam.



Fig. 3.5.2.1.70. Construcción con bahareque en San Juan Chamula, Chiapas. Fuente: Varun Thautam.



Fig. 3.5.2.1.71. Construcción con bahareque en San Juan Chamula, Chiapas. Fuente: Varun Thautam

En Chiapas también se encuentran las construcciones tradicionales denominadas Chukal Na Tzotzil, construido con paredes de adobe y cañas.

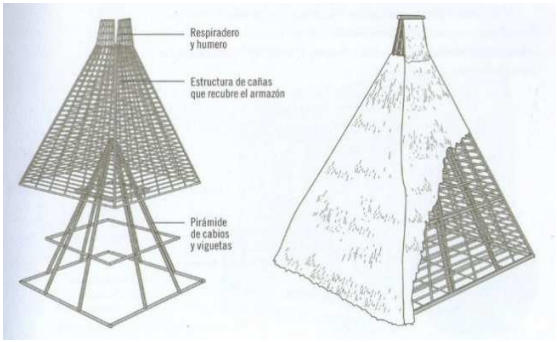


Fig. 3.5.2.1.72. Construcción Chukal Na Tzotzil, Chiapas. (May, 2011).

Casa tradicional Maya en Yucatán

Se trata de una estructura de choza de palos y paja, prototipo de la vivienda maya existente desde hace más de 2000 años. En la región maya denominada Puuc, actual estado de Yucatán. Entre un clima litoral de alisisios y de selva tropical monzónico.



Fig. 3.5.2.1.73. Trama de ramas base de la técnica de Bahareque en vivienda tradicional maya, Yucatán.

La construcción responde a una sociedad con cierto carácter nómada, por ello era una vivienda de fácil y rápida ejecución. Clima benévolo permite vida exterior que hace que la vivienda se reduzca a una única habitación que sirve de dormitorio. Vivienda maya ligada al ciclo de vida de la familia.



Fig. 3.5.2.1.74. Murete base del muro de bahareque con piedra caliza en vivienda tradicional maya, Yucatán.



Fig. 3.5.2.1.75. Trama de ramas base de la técnica de Bahareque, con relleno de barro, en vivienda tradicional maya, Yucatán.

La vivienda se asienta sobre plataforma de caliza y tierra apisonada, cercada por un murete de piedra de caliza de 50cms de espesor a modo de rodapié. Cerramiento independiente de la estructura. Materiales orgánicos provenientes de bosques aledaños. El muro perimetral es de Bajareque (Bambú y barro). Palos anclados a la tierra se atan entre sí con bejuco, Después el muro se reviste con lechada de cal por ambas caras, resultando un muro de entre unos 9 y 10 cms de espesor.

Un emparrillado de palos de madera forman la estructura de la cubierta apoyados en unos troncos-vigas. La cubierta es de hojas de palma o largas tiras de césped (zacate).



Fig. 3.5.2.1.77. Exterior de muro de bahareque en vivienda tradicional maya, Yucatán.



Fig. 3.5.2.1.76. Trama de ramas base de la técnica de Bahareque, con relleno de barro, en vivienda tradicional maya, Yucatán.



Fig. 3.5.2.1.78. Interior en vivienda tradicional maya, Yucatán.



Fig. 3.5.2.1.79. Acabado interior en vivienda tradicional maya, Yucatán.



Fig. 3.5.2.1.80. Acabado exterior en cal en vivienda tradicional maya, Yucatán.



Fig. 3.5.2.1.81. Aspecto exterior de vivienda tradicional maya, Yucatán.

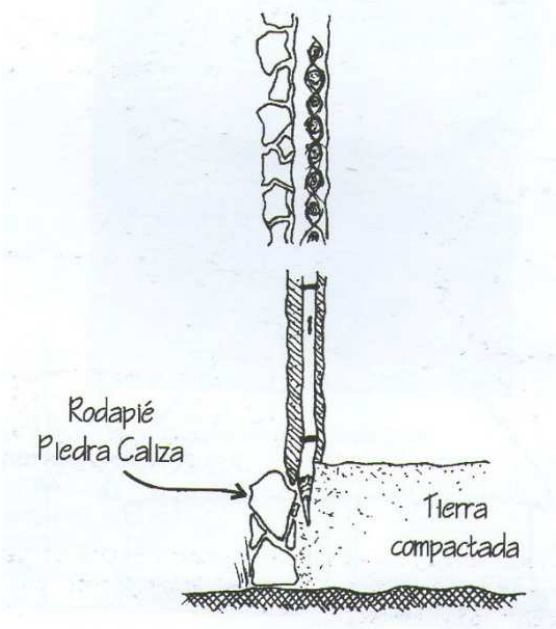


Fig. 3.5.2.1.82. Detalle constructivo de muro en vivienda tradicional maya, Yucatán.

Antecedentes de arquitectura y construcción en tierra contemporánea a nivel global

Actualmente, casi el 50% de la población vive en construcciones de tierra (Guillaud, 2008), mayoritariamente localizada en países en vía de desarrollo. Sin embargo, también se puede encontrar interés en la construcción con tierra en países desarrollados. Varios países ya tienen normativa en relación a la construcción con tierra (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012), como por ejemplo la normativa UNE 41410:2008, publicada en el 2010 por AENOR sobre definiciones, especificaciones y métodos de ensayo de los BTC. (Bestraten *et al.,* 2011).

La construcción con tierra durante la primera década del siglo XXI ha resurgido en todo el mundo como un material con propiedades sostenibles, de bajo impacto ambiental y de gran capacidad expresiva. Se ha experimentado un crecimiento a nivel de proyectos e investigaciones sobre el material relacionado con el aumento de número de asociaciones, instituciones, universidades y eventos alrededor de este sector. Los proyectos actuales han sabido modernizar las técnicas tradicionales de construcción con tierra para adaptarlas a las necesidades proyectuales y constructivas, siendo ampliamente reconocidos por su calidad. Algunos países han desarrollado normativas específicas, especialmente en aquellos lugares donde la tradición o la autoconstrucción ha derivado en un uso habitual de este material. Ejemplos de arquitectura contemporánea, ampliamente reconocidos y premiados, manifiestan la viabilidad técnica, estética y económica de la tierra como material actual de construcción. La búsqueda de nuevos materiales de construcción que aportan nuevas soluciones, sumado a la voluntad de hacer una arquitectura cada día más sostenible ha hecho emerger un material que se fue abandonando a lo largo del siglo XX. Este resurgir como material más ecológico todavía no es generalizado pero sin duda alguna se da en todo el mundo. No se localiza en un área geográfica concreta y su uso está claramente en expansión entre los países desarrollados. Este hecho es un incentivo para los países en vías de desarrollo, con una mirada atenta a recuperar su identidad constructiva. (Bestraten *et al.,* 2011).

Oriente Medio y África

En Egipto se cuenta con la excelente obra de construcción en tierra de Hassan Fathy (Barbeta, 2002). Estructuras con referencias a la construcción vernácula adaptada a las condiciones económicas y culturales de la actualidad.



Fig. 3.5.2.1.83. Mercado, Hassan Fathy. http://de.wikivoyage.org/wiki/Hassan_Fathy_Village#/media/File:NewBarisSoukBuilding.jpg



Fig. 3.5.2.1.84. Universidad en el Cairo, Hassan Fathy http://whc.unesco.org/en/activities/637/

El ingeniero Alain Masson, edifica la ciudad de Daoudiat, cerca de Marrakech, 2.700 alojamientos económicos. Cerca de allí en Ouarzazate, junto con Jean Hensens, desarrollaban en 1967 una manzana de vivienda social concebida en tapial con un sistema de encofrado metálico, que servía de molde incluso para las bóvedas (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.85. Mercado, Hassan Fathy. http://de.wikivoyage.org/wiki/Hassan_Fathy_Village#/media/File:NewBarisSoukBuilding.jpg

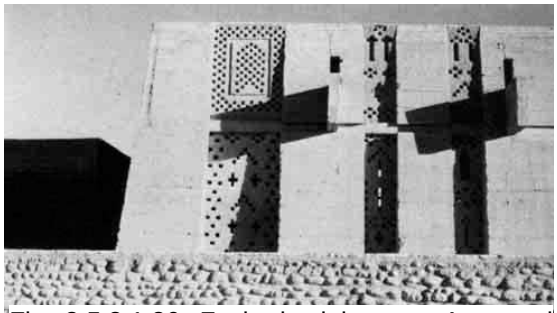


Fig. 3.5.2.1.86. Fachada del centro Artesanal Regional de Er Rachidia en Marruecos, del Arqto. Francés Jean Paul Ichter. 1979. (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.87. Fachada del centro Artesanal Regional de Er Rachidia en Marruecos, del Arqto. Francés Jean Paul Ichter. 1979. (Barbeta, 2002).

Centre de Santé et de Promotion Sociale. Laongo. Burkina Faso. Francís Keré. 2014

El proyecto Village Opera está orientado a proporcionar servicios básicos de salud y los recursos médicos para la población local. El diseño surgió de los puntos de vista diferentes de pie, sentado o individuos encamados incluidos los niños. Las ventanas se componen como marcos de cuadros, con cada vista individual centrada en una parte única del paisaje. En consonancia con la estética de los materiales y la ecología de la Opera Village, se utiliza arcilla y piedra de laterita donde la construcción de doble envolvente de las paredes de protección extra contra la lluvia. La madera de eucalipto localmente disponible, visto como un daño al medio ambiente, ya que contribuye a la desertificación, se utiliza para llenar los falsos techos y pasillos cubiertos del centro.

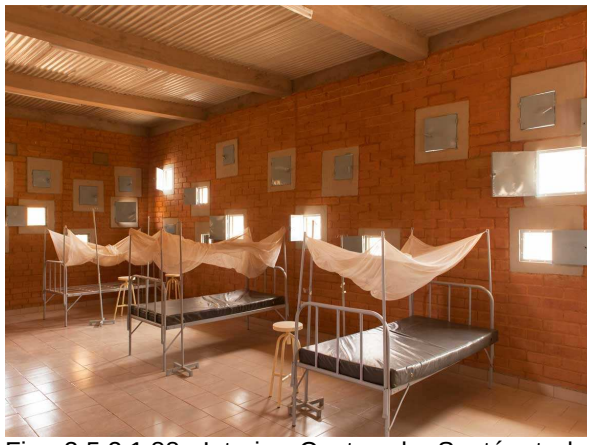


Fig. 3.5.2.1.88. Interior Centre de Santé et de Promotion Sociale.Francís Keré. http://www.kerearchitecture.com/projects



Fig. 3.5.2.1.89. Exterior Centre de Santé et de Promotion Sociale.Francís Keré. http://www.kerearchitecture.com/projects



Fig. 3.5.2.1.90. Exterior Centre de Santé et de Promotion Sociale.Francís Keré. http://www.kerearchitecture.com/projects

Primary School. Gando. Burkina Faso. Francís Keré. 2001

El diseño de la Escuela Primaria evolucionó de una larga lista de parámetros, incluyendo el costo, el clima, la disponibilidad de recursos y la viabilidad de la construcción. Con el fin de maximizar los resultados con los mínimos recursos disponibles, se utiliza principalmente una construcción híbrida de arcilla / barro. La arcilla es disponible en abundancia en la región, y se utiliza tradicionalmente en la construcción de viviendas. Estas técnicas tradicionales de construcción de arcilla fueron modificadas y modernizadas para crear una construcción más sólida estructuralmente en forma de ladrillos. Los ladrillos de arcilla tienen la ventaja añadida de ser barato, fácil de producir, y que también proporciona protección térmica contra el clima caliente. A pesar de su durabilidad, sin embargo, las paredes deben todavía ser protegidos de las lluvias perjudiciales con un gran techo de chapa sobresaliente. El techo de la escuela primaria se alejó del espacio de aprendizaje del interior sin embargo, y se introdujo un techo de arcilla perforada con amplia ventilación. A su vez, la huella ecológica de la escuela es muy reducido por el alivio de la necesidad de aire acondicionado.Tradicionalmente, los miembros de toda una comunidad de la aldea de trabajo en conjunto para construir y reparar viviendas en zonas rurales de Burkina Faso. De acuerdo con esta práctica cultural, de baja tecnología y técnicas sostenibles

se desarrollaron y mejoraron de manera que los aldeanos Gando podrían participar en el proceso. Los niños se reunieron piedras para la fundación de la escuela y las mujeres trajeron agua para la fabricación de ladrillos. De esta manera, las técnicas tradicionales de construcción se utilizaron junto con los métodos de la ingeniería moderna para producir la mejor solución constructiva de calidad al tiempo que simplifica la construcción y el mantenimiento de los trabajadores.



Fig. 3.5.2.1.91. Exterior Primary School. Gando. Burkina Faso. Francís Keré. http://www.kerearchitecture.com/projects



Edificio para la asociación Yeredemé de apoyo a jóvenes madres solteras, Taikiré, Mopti, Mali. Arquitectos: Fernando Martín Consuegra, Francisco Botella. 2005: El propósito de los arquitectos en la elección del sistema constructivo fue aprovechar las técnicas constructivas tradicionales del lugar, optimas en los aspectos de confort interior, y a la vez crear un referente duradero y alternativo a la construcción en hormigón. Partiendo de la construcción en adobe y madera, técnicas tradicionales arraigadas en la sociedad de Mali, los arquitectos han aportado innovaciones coherentes para aunar las cualidades económicas, sostenibles y de durabilidad. Para reducir el espesor de los muros estos se diseñaron en planta de manera que se equilibraran las fachadas interior y exterior mediante los muros perpendiculares a fachada, y se construyó un zuncho de hormigón armado en las cabezas de los muros. Este zuncho permite abrir grandes huecos en las fachadas a patio, y distribuye la carga de las vigas metálicas que disminuyen la luz del forjado. La impermeabilización de la cubierta se realiza con arcillas expansivas. Este sistema es efectivo en las condiciones de clima extremo de Mali al cerrarse las fisuras cuando se hidrata con la lluvia. En el revestimiento de los muros se utiliza el crepissage tradicionnel, consistente en una mezcla fermentada de barro y paja. La protección de barro permite proteger la estructura de adobe, al ser fácilmente reponible cada dos años con mano de obra y materiales locales.



Fig. 3.5.2.1.93. Muros de adobe y aberturas con celosias en el edificio para la asociacion Yeredeme, Mopti, Mali. Fuente: Fernando Martin

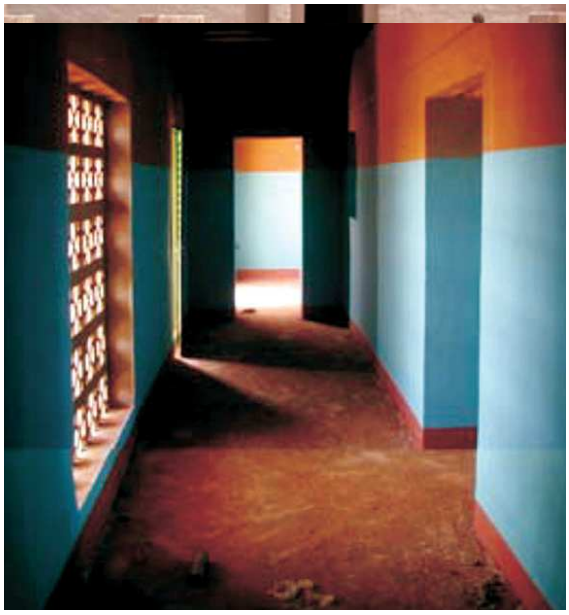


Fig. 3.5.2.1.94. Muros de adobe y aberturas con celosias en el edificio para la asociacion Yeredeme, Mopti, Mali. Fuente: Fernando Martin

Asia

En la India, desde hace varias décadas diferentes organismos están trabajando e investigando en la construcción con tierra: CBRI (Roorkee); ASTRA (Bangalore); Development Alternatives (New Delhi); Mud Village Society (New Delhi)



Fig. 3.5.2.1.95. Handmade School, Heringer y Roswag. http://www.worldarchitecture.org/world-buildings/ccfm/meti-handmade-school-in-rudrapur-building-page.html

Handmade School, Rudrapur, Bangladesh, 2005. Arquitectas: Anna Heringer y Eike Roswag, Lehm Ton Erde Martin Rauch.



Fig. 3.5.2.1.96. Handmade School, Heringer y Roswag. http://www.worldarchitecture.org/world-buildings/ccfm/meti-handmade-school-in-rudrapur-building-page.html

La construccion de esta escuela en Rudrapur hace una novedosa interpretacion de las tradiciones en construccion con tierra de esta region de Bangladesh. La naturaleza plástica de la tecnica del cob permitio a las arquitectas disenar espacios cueva para los juegos de los alumnos de la escuela. La planta baja consta de gruesos muros de cob, mientras que la segunda planta se construye con ligeras estructuras de bambu abiertas a las vistas, como una gran cubierta ventilada. (Bestraten et al., 2011).



Fig. 3.5.2.1.97. Construcciones experimentales contemporáneas con técnica de tapial en Craterre, Francia (Barbeta, 2002).

Europa

Francia (Barbeta, 2002)

La historia nos recuerda a arquitectos tan conocidos como Le Corbusier, que en los años 40 creó un proyecto para gente sin

recursos y damnificados por la guerra. Una tipología de viviendas tipo refugio denominadas. Les Villes Murondins. En estas se utilizaron tres técnicas constructivas, sin mano de obra especializada: adobe, tapial y bloque comprimido. La vivienda se solucionaba a dos aguas con muros de carga de tierra y vigas de madera. También diseñó los interiores con mobiliario de obra incluido. Posteriormente en 1947 elaboraba los planos de una ciudad completa, para edificar en tapial, en Sainte-Beaume cerca de Marsella. El proyecto no llegó a edificarse.



Fig. 3.5.2.1.98. Construcciones contemporáneas experimentales con técnica de btc en Craterre, Francia (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.99. Construcciones contemporáneas experimentales con técnica de tapial reforzado en Craterre, Francia (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.100. Construcciones contemporáneas experimentales con técnica de btc en Craterre, Francia (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.101. Construcciones contemporáneas experimentales con técnica de btc en Craterre, Francia (Barbeta, 2002).

Latinoamérica

Se tiene caso ejemplar con la organización ARIT, Arquitectura e Investigación en Tierra. Carrera 3 A nº30 Bogotá Colombia. Este organismo construyó en 1985 el proyecto de vivienda rural experimental Tabio-Cundinamarca, con bloques de tierra prensada. Para ello se rescató la prensa Cinva-ram, dándole un uso diferente para hacer el material más competitivo (Barbeta, 2002).Se utilizaron cúpulas y bóvedas ejecutadas en BTC, un nuevo sistema de bovedillas construidas con el mismo bloque, piezas de pavimento prensadas de tierra, e incluso se ejecutó el mobiliario con el mismo material.

En Colombia, despachos de arquitectura como el de Escala Urbana experimentan con conceptos donde se encuentro lo tradicional y vernáculo con lo contemporáneo, destacando su trabajo con tapial.



Fig. 3.5.2.1.102. Casa Mila. Construcción con técnica de tapial. Escala Urbana Arquitectura.

En Bolivia, durante los últimos diez años se ha realizado el proyecto Laka-Uta de viviendas bioclimáticas de adobe, en Lahuachaca, en la altiplanicie Boliviana. ëste ha sido llevado a cabo por arquitectos de ONGS Danesas, utilizando materiales autóctonos y recuperando el saber popular de las chozas cónicas de adobe (Barbeta, 2002).



Fig. 3.5.2.1.103. Laka-Uta de viviendas bioclimáticas de adobe, en Lahuachaca, Bolivia Barbeta, 2002).

En Chile se destaca la realización de dos edificios públicos realizados a base de adobe y cerchas de maderas, en los que ha participado el arquitecto Hugo Pereira destaca el hecho de ser espacios con luces y alturas propias de construcciones públicas y el buen comportamiento que presentaran ante el último gran sismo en Chile en 1985 (Barbeta, 2002).

Bodega en los Robles, San Fernando, Chile. José Cruz Ovalle. 2002

La masa edificio cada de estas bodegas se construye con materiales naturales, no sólo por un arcaísmo o ecologismo, sino desde una postura arquitectónica que plantea la obra desde el tacto, el olfato y el gusto, tal como los enólogos degustan el vino. La masa térmica de los adobes contribuye al control térmico dentro de las bodegas y sus cualidades acústicas permiten el uso de algunos espacios como salas de presentación o de cata de vinos.



Fig. 3.5.2.1.104. Muros de adobe protegidos por los aleros de la cubierta y los zócalos de hormigón y piedra en la Bodega Los Robles, San Fernando, Chile. Fuente: José Cruz Ovalle



Fig. 3.5.2.1.105. Casa en Solymar. Técnicas: BTC muro doble de 36 cm de espesor; paneles de fajina y techos verdes. December, 2010 – A home in Solymar – Techniques: Double-thick CEB wall (36 cm), lath panels & green roof (Rosario. 2012).

En Uruguay se dan trabajos de investigación y extensión realizados por parte del grupo Proyecto Terra Uruguay de la Udelar2 y del estudio de arquitectura de actuación profesional denominado Tierra al Sur3 desde el año 2007 al 2011. Las técnicas utilizadas fueron: mampuesto de adobe de tierra sin cocer (de 40 x 17 x 10 cm); BTC: Bloques de Tierra Comprimida; terrón;

paneles de fajina prefabricados (estructura de madera y embarrado en 3 capas); techos verdes y tierra alivianada (Rosario, 2012).

Universidad Indígena Chiquitana, San Ignacio de Velasco, Bolivia. Arquitectos: Sandra Bestraten Castells y Emilio Hormías Laperal, Càtedra Unesco de Sostenibilitat - UPC, Universitat Sense Fronteres. 2003: El programa impulsa la mejora de las técnicas de construcción locales. Los proyectos son desarrollados por voluntariado de la universidad. La transferencia de tecnología se consigue con la participación directa de la población local en la ejecución del edificio. Este edificio supone una actualización de las técnicas de la arquitectura tradicional del oriente boliviano basado en los materiales autóctonos: el adobe y la madera.

La combinación de muros de adobe de 40 cm de grosor que soportan la estructura de cubierta de cerchas de madera, con la incorporación de grandes lucernarios que permiten una ventilación por efecto Venturi, mejora la tipología tradicional aportando confort térmico y visual con un coste energético cero. La misma arcilla roja extraída de la excavación de las cimentaciones se utilizó para la producción in situ de los adobes de 40 x 20 x 10 cm. La estructura de cubierta, de 7 metros de luz, consiste en cerchas de madera que se apoyan en las vigas collar de madera que reparten la carga y la transmiten de forma homogénea a los muros de adobe. Para reducir el trabajo de mantenimiento se ha optado por la colocación de grandes aleros y porches. Además, los muros van revestidos con un revoco de tierra y cal.



Fig. 3.5.2.1.106. Muros de adobe, porche de entrada y lucernarios de cubierta en la Universidad Chiquitana, San Ignacio, Bolivia. Fuente: S. Bestraten y E. Hormias

Estados Unidos

Tanto Frank Lloyd Wright como Schindler elaboraron proyectos para ser construidos en adobe (1915-1945), residencias y viviendas en Taos, El Paso-Texas. Al Oeste de E.E.U.U., en New Mexico, después de la crisis de los 70, aparecen los actuales pioneros de la construcción en tierra (Barbeta, 2002).

Se tiene importante aporte con earthships, neumáticos con zuncho de acero rellenos de tierra para los muros.



Fig. 3.5.2.1.107. Construcciones Earthships. M. Reynolds. http://kirknielsen.com/project/earthships/



Fig. 3.5.2.1.107. Construcciones Earthships. M. Reynolds. http://kirknielsen.com/project/earthships/

Antecedentes y ejemplos de arquitectura contemporánea en México

En términos generales, cuando se habla de arquitectura en tierra en México nos referimos básicamente al adobe (block de tierra compactada o BTC); las técnicas constructivas como el bajareque o el tapial son menos utilizadas, especialmente este último. La arquitectura en tierra se ha empleado últimamente en mayor medida, calidad y variedad para grupos de habitantes con mayor poder adquisitivo. En los últimos 50 años las técnicas tradicionales de construcción con tierra han sido estudiadas ampliamente con la finalidad de mejorarlas y es así como han aparecido técnicas modernas de construcción con tierra como son: los bloques de tierra comprimida (BTC), el bajareque tecnificado, la tierra vertida, etc. (Meraz *et al.,* 2013).

La sustitución del adobe por el cemento en México: El desarrollo de la industria productora de cemento, México es un gran productor de cemento, existe una gran presión comercial del uso del cemento en México es la existencia de empresas como CEMEX (Cementos Mexicanos), que se encuentra como la tercera empresa más importante a nivel mundial, el uso del cemento en la construcción del cemento más económico y práctico, en relación al uso de la tierra arquitectura en adobe es considerada inferior, poco práctica y hasta insalubre. De hecho, se le considera sinónimo de pobreza y atraso, y que no resulta conveniente en cuestiones sísmicas (Meraz *et al.,* 2013).

Hoy en día las construcciones con tierra y madera han venido recuperando su valor histórico y cultural (Aguirre 2012). En la última década surgen varias iniciativas de recuperación de la tradición constructiva con tierra, aplicando mejoras tecnológicas. Se busca incentivar el prestigio del material constructivo (Caeiro, Guerrero, 2013).

Estado de México

Casa de adobe contemporáneas. Caso Chalmita. (Meraz *et al.,* 2013): En Chalmita es común encontrar casas de descanso nuevas que utilizan el adobe en su construcción, costeadas por grupos que económicamente las pueden erigir y mantener. Pueden ser grandes mansiones, medianas o pequeñas casas; pueden estar integradas a un desarrollo urbano formando secciones aledañas de los pueblos o bien estar dentro de ellos, o en su proximidad. Existen aquellas que su terreno es muy grande y estar cerca de los pueblos, pero también las encontramos en el campo aisladas. Las casas de adobe combinan el sistema constructivo tradicional con otros sistemas o detalles basados en el uso del cemento u otro material moderno.



Fig. 3.5.2.1.108. Casa Acantilado, Chalmita. (Meraz *et al.,* 2013).



Fig. 3.5.2.1.109. Casa de Avena. Chalmita. (Meraz *et al.,* 2013).

Casos:

- Casas de adobe antiguas reutilizadas: las intervenciones han sido mínimas; generalmente cambian algunos acabados pero, sorprendentemente, el respeto a las características de estas casas es predominante.



- Casa de adobe construidas con sistemas tradicionales: se siguen con más cercanía los principios de la casa tradicional = uso del adobe de manera estructural y formal.

Fig. 3.5.2.1.110. Quinta El Dalai, fachada poniente. (Meraz *et al.,* 2013).

- Casas de tierra alternativas: buscan modos de vida alternativos a menudo producto de una educación universitaria. En su realización han utilizado pacas de este cereal, combinadas con tierra, para formar sus muros. En este caso, la tierra es un elemento importante pero no predominante. Dichas casas podrían pertenecer más a un tipo de casa construida en madera que en tierra. Al tener a la madera como elemento estructurador, la tierra combinada con las pacas de avena es un elemento de cierre, permitiendo grandes ventanales dobles alturas y otras peculiaridades que el adobe no permite. En estas casas, sin embargo, se tienen que generar también grandes aleros y otros elementos de protección, pues los muros de tierra-avena son sensiblemente más vulnerables que el adobe. La calidad espacial y formal de estas casas es más libre y orgánica. Conveniencia económica y la idoneidad al período húmedo de Chalmita de estas casas.

- Casas de adobe y hormigón: Quinta el Dalai fig., en ésta, se ha procurado combinar ambos sistemas, pero no mezclados. La casa presenta una parte completa hecha en hormigón porque, dadas las decisiones de proyecto que buscaban un mínimo de área construida (80 m2 en total) y la construcción de una torre que no podía construirse con adobe. La parte más social de la casa, el salón, se diseñó en adobe. Se trata de un gran cuarto (4 x 5 ms), construido usando las técnicas tradicionales del adobe: cimientos de piedra, muros de carga, techo a un agua en madera y teja, muros de adobe que no han sido aplanados (revocados) etc. Para crear armonía se optó por cubrir la totalidad de la superficie de la torre, construida con concreto, con un revoque (aplanado) que contiene básicamente la misma tierra con que fueron hechos y unidos los adobes.

Chiapas

Fabricación del adobe en la región. Talleres que todavía elaboran adobes, ladrillos y tejas, y a los que se les conoce genéricamente bajo el nombre de “tejerías”. La materia prima que usan para hacer los adobes se extrae del propio sitio pero que se complementa con arena fina del río a la que la comunidad le da el nombre de “lama”. A la mezcla de barro para la fabricación de los adobes le denominan “tercia” o “batida” y generalmente se conforma por 0.3m3 de tierra (66%) y 0.15m3 de arena (33%). Además se le agrega medio costal de juncia y 200 litros de agua. La tercia se elabora mezclando cuidadosamente los materiales en seco. Para la fabricación de los adobes, se utiliza un molde de madera con dimensiones de 45 x 30 x 15cm El secado de los adobes en su posición de desmolde depende de las condiciones del clima y puede tardar de tres a cinco día (Jiménez *et al.,* 2013).



Fig. 3.5.2.1.111. Proceso de restauración de la Quinta del Obispo, San Cristóbal de las Casas. Fuente: Luis Guerrero (Jiménez *et al.,* 2013).



Fig. 3.5.2.1.112. Mezclado de la tierra y la arena en seco. Fuente: Jaqueline Jiménez. (Jiménez *et al.,* 2013).

Cimentaciones de piedra poseen zócalos que sobresalen del pavimento entre 30 y 50cm. Sobre esta cimentación se desplantan los muros adobe, los cuales se traslapan aproximadamente 20cm para conseguir mayor continuidad en la transmisión de esfuerzos y mejor comportamiento ante eventos sísmicos. Los adobes más comunes

miden entre 40 y 45cm de largo, 20 a 30cm de ancho y con espesores de 12 a 15cm. Los adobes se suelen dejar a la vista en los muros perimetrales pero en las fachadas principales y en los espacios interiores se enjarran y pintan con cal. (Jiménez et al., 2013)

Las Cañadas, Veracruz

Una comunidad relativamente moderna de las personas que viven de la tierra. Las Cañadas es un ejemplo ejemplar de arquitectura creativa e inspiradora construido con medios mínimos. El ferrocemento Tierra y materiales reciclados establecen una paleta única para los hogares, lugares de la comunidad, sanitarios ecosan, aulas y dormitorios.



Fig. 3.5.2.1.113. Construcción en tierra en Las Cañadas. Fuente: Varun Thautam.

Hay mucho que aprender de la arquitectura y de las personas que comparten espacios dentro de esta comunidad.



Fig. 3.5.2.1.114. Construcción en tierra en Las Cañadas. Fuente: Varun Thautam





cos para
ierra esta

Fig. 3.5.2.1.115. Construcción en tierra en Las Cañadas. Fuente: Varun Thautam

Fig. 3.5.2.1.116. Construcción en tierra en Las Cañadas. Fuente: Varun Thautam Cuernavaca

Tapial. Tierra Compactada Arquitectos



Fig. 3.5.2.1.117. Construcción con tapial. Tierra Compactada Arquitectos.

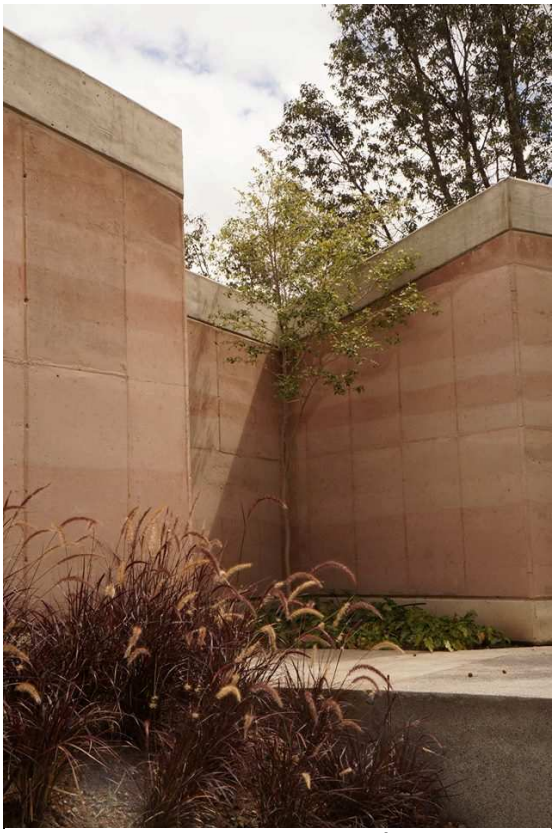


Fig. 3.5.2.1.118. Construcción con tapial. Tierra Compactada Arquitectos.



Fig. 3.5.2.1.119. Construcción con tapial. Tierra Compactada Arquitectos.



Fig. 3.5.2.1.120. Construcción con tapial. Tierra Compactada Arquitectos.

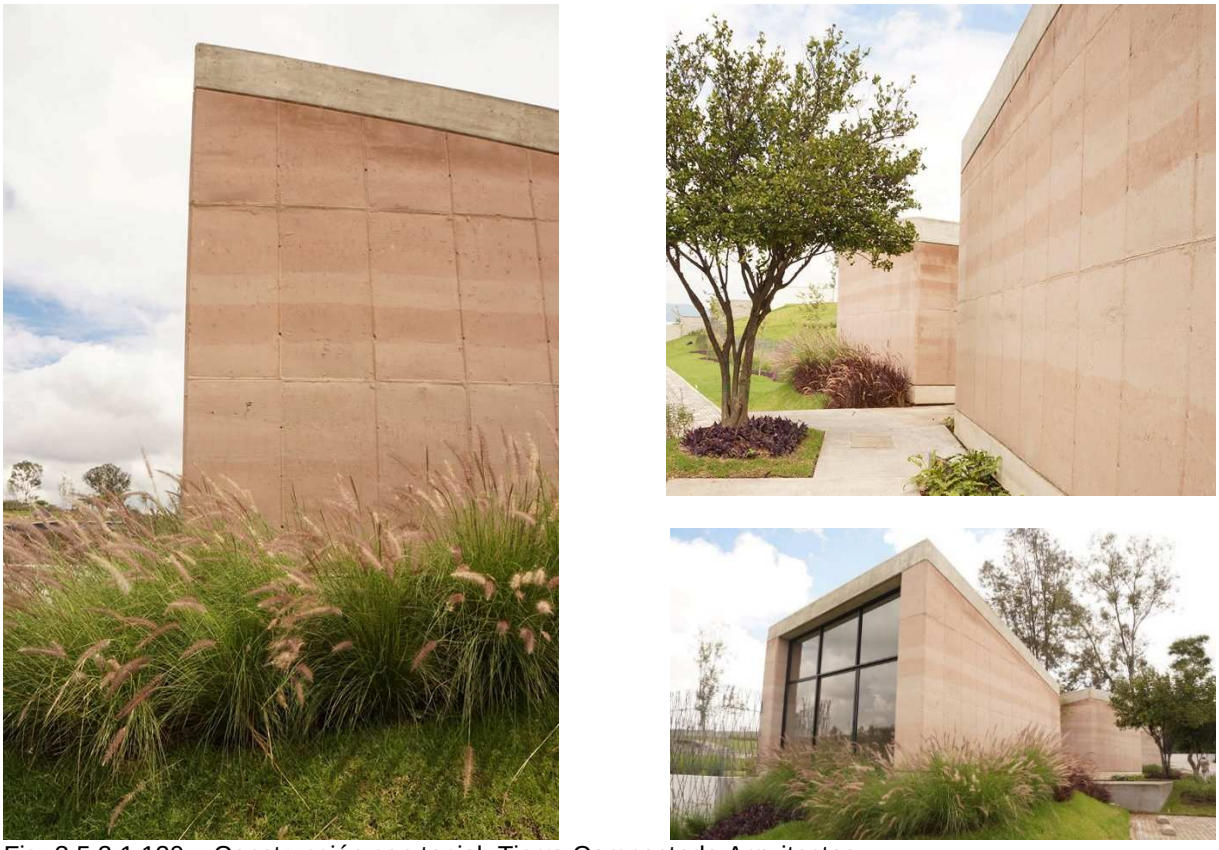


Fig. 3.5.2.1.120. Construcción con tapial. Tierra Compactada Arquitectos.

Casa Estudio La Purísima. La Purísima, Querétaro, MX. Arquitectos: Gabriel Pernalete Blanco, Fernando Tepichin Jasso. Fotografías: Gabriel Pernalete Blanco. 2010.

Mención Honorífica en la XII BAM. se definió un sistema constructivo que tuviera arraigo en su imagen e identidad del sitio, siendo muros de tierra apisonada el sistema seleccionado.



Fig. 3.5.2.1.121. Construcción con tapial. Tierra Compactada Arquitectos. Fotografías: Gabriel Pernalete Blanco http://blogs.edificando.es/articulos/arquitectura/3343-casa-de-tierra--menci%C3%B3n-honor%C3%ADfica-en-la-xii-bam..html

El edificio está conformado por cuatro cuerpos en torno al área de vestíbulo y servicios. El cuerpo central es cubierto por una losa de concreto maciza que da rigidez estructural a los muros de tierra que lo contienen. Los muros de tierra envuelven los espacios de recámaras, estudio y la estancia, los cuales son cubiertos por losa de vigueta y bovedilla vista.





Fig. 3.5.2.1.122. Construcción con tapial. Tierra Compactada Arquitectos. Fotografías: Gabriel Pernalete Blanco http://blogs.edificando.es/articulos/arquitectura/3343-casa-de-tierra--menci%C3%B3n-honor%C3%ADfica-en-la-xii-bam..html

Casa Sabinos en Querétaro. Juan Carlos Loyo Arquitectura. Querétaro, México. 2012. Fotografías: Juan Carlos Loyo. El clima semi-seco llevó al arquitecto al uso de métodos pasivos, y, al igual que a espacios vernáculos, donde hay muchos recursos para



Fig. 3.5.2.1.123. Casa Sabinos en Querétaro. Juan Carlos Loyo Arquitectura. Fotografías: Juan Carlos Loyo. http://noticias.arq.com.mx/Detalles/13724.html#.VMAnq9KG-So

usarse: orientación, masa térmica, ventilación cruzada, materiales hechos a manos y otros métodos probados.



Fig. 3.5.2.1.124. Casa Sabinos en Querétaro. Juan Carlos Loyo Arquitectura. Fotografías: Juan Carlos Loyo. http://noticias.arq.com.mx/ Detalles/13724.html#.VMAnq9KG-So



Fig. 3.5.2.1.125. Casa Sabinos en Querétaro. Juan Carlos Loyo Arquitectura. Fotografías: Juan Carlos Loyo. http://noticias.arq.com.mx/Detalles/13724.html #.VMAnq9KG-So

Casa Tierra. Serrano Monjaraz Arquitectos. México Distrito Federal. 2012. Fotografías: Pedro Hiriart

El sistema de construcción de Casa Tierra se realizó con bloques de tierra procesados (PEB) hechos del suelo del mismo lote. Este sistema fue seleccionado empezando por el costo y la energía eficiente, resistencia al fuego y a las plagas, prácticamente insonorizadas, durable, estructuralmente firme y estéticamente agradable. PEB proporciona completa libertad arquitectónica y está hecho de materia prima natural de fácil acceso no tóxico. Comparado con otros sistemas este es más flexible y no afecta el ancho de las paredes. Se ha



Fig. 3.5.2.1.126. Casa Tierra. Serrano Monjaraz Arquitectos. Fotografías: Pedro Hiriart. http://www.archdaily.mx/mx/02-328288/casa-tierra-serrano-monjaraz-arquitectos



Fig. 3.5.2.1.127. Casa Tierra. Serrano Monjaraz Arquitectos. Fotografías: Pedro Hiriart. http://www.archdaily.mx/mx/02-328288/casa-tierra-serrano-monjaraz-arquitectos

presionado el suelo con 3% de concreto y 7% de cal.

Tamul / Laboratorio de Arquitectura [mk]. Real de Juriquilla, Juriquilla, Querétaro, México. 2012. Fotografías: Julio Martin.

En este ejercicio arquitectónico, la directriz generadora más importante fue el material utilizado y cómo reinterpretarlo.



Fig. 3.5.2.1.128. Tamul / Laboratorio de Arquitectura [mk]. 2012. Fotografías: Julio Martin. http://www.archdaily.mx/mx/625471/tamul-laboratorio-de-arquitectura-mk



Fig. 3.5.2.1.129. Tamul / Laboratorio de Arquitectura [mk]. 2012. Fotografías: Julio Martin. http://www.archdaily.mx/mx/625471/tamul-

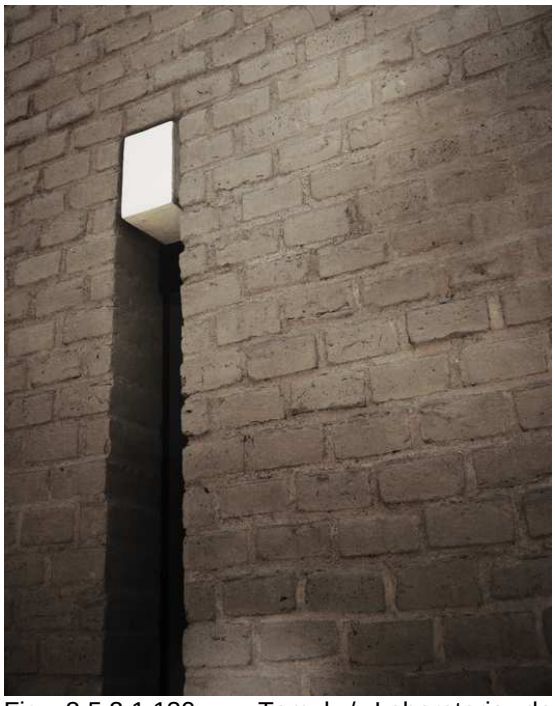


Fig. 3.5.2.1.130. Tamul / Laboratorio de Arquitectura [mk]. 2012. Fotografías: Julio Martin. http://www.archdaily.mx/mx/625471/tamul-laboratorio-de-arquitectura-mk

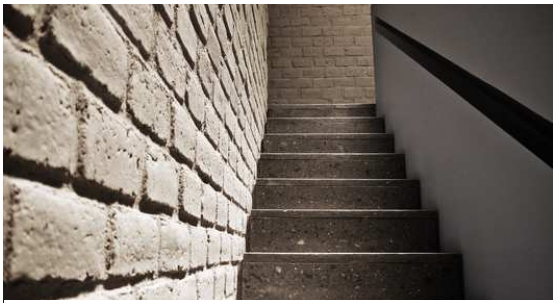


Fig. 3.5.2.1.131. Tamul / Laboratorio de Arquitectura [mk]. 2012. Fotografías: Julio Martin. http://www.archdaily.mx/mx/625471/tamul-laboratorio-de-arquitectura-mk

Escuela de Artes Plásticas de Oaxaca / Taller de Arquitectura Mauricio Rocha. Oaxaca, México. 2008. Fotografía: Luis Gordoa, Sandra Pereznieto.

La escuela fue concebida con dos tipologías de edificios, los primeros, los edificios de piedra de tres metros de altura que generan la contención contra los taludes. La segunda tipología es la de los edificios exentos a los taludes, todos ellos orientados al norte, a excepción de la galería y el aula magna (norte-sur), construidos en tierra compactada (mezcla de tierra con 15%de cemento), procedimiento que no solo nos ayudaba a la plástica y carácter del edificio (un sistema orgánico y lleno de accidentes que alimenta la riqueza de cada muro) que queríamos lograr sino que además resolvía exitosamente los tiempos requeridos de obra así como una excelente climatización natural.



Fig. 3.5.2.1.132. Escuela de Artes Plásticas de Oaxaca / Taller de Arquitectura Mauricio Rocha. Fotografía: Luis Gordoa, Sandra Pereznieto. http://www.arquitour.com/escuela-de-artes-plasticas-de-oaxaca-taller-de-arquitectura-mauricio-rocha/2012/08/

El espesor de estos muros (de 60 a 70 cms) logra crear un microclima óptimo para las condiciones extremas de la ciudad de Oaxaca así como un excelente control acústico. Además del sistema constructivo, los talleres se diseñaron con accesos esbeltos en sus costados y enormes ventanales al norte que permiten el flujo cruzado del viento, dotándolos de la mejor calidad lumínica y extendiendo el espacio interior a través de un pórtico a un espacio de iguales proporciones pero abierto como un espacio de trabajo al aire libre. Estos patios fueron una premisa importante para conformar una planta ajedrezada donde el vibrado de masa-vacío en los distintos andadores se convirtió en la conformación de recorridos y fugas visuales siempre distintas.



Fig. 3.5.2.1.133. Escuela de Artes Plásticas de Oaxaca / Taller de Arquitectura Mauricio Rocha. Fotografía: Luis Gordoa, Sandra Pereznieto. http://www.arquitour.com/escuela-de-artes-plasticas-de-oaxaca-taller-de-arquitectura-mauricio-rocha/2012/08/

Gimnasio en Oaxaca. João Boto M. Caeiro.

La materialidad del edificio funde técnicas vernáculas de Oaxaca con los recursos de la tecnología moderna. Adobe, piedra, madera bambú, tejas, ladrillos, cal, concreto, acero y láminas, se combinan de manera armónica y respetuosa del potencial y calidad de cada material. Se trataba de la conjunción de la presencia de conocimientos ancestrales y de su transferencia intergeneracional a partir de una tradición basada en la práctica misma. Para sustentar “científicamente” la propuesta fueron escogidas varias tierras y analizadas en laboratorio para concluir que la eligió Don Julio era la mejor. Se utilizó estiércol de caballo, aserrín y arcilla negra que después de mezclada se dejó madurar tres días para poder producir los bloques.



Fig. 3.5.2.1.134. Gimnasio en Oaxaca. João Boto M. Caeiro. (Caeiro, 2014).

3.5.2.2 Construcción con tierra e innovación tecnológica

La construcción con tierra y el uso de materiales arcillosos ha dado un paso adelante en los procesos de fabricación. Con la industrialización de los materiales de tierra se mejoran las características naturales del material y se garantizan unas calidades óptimas para su empleo y puesta en obra, reduciendo los tiempos de ejecución. En los últimos tiempos se ha desarrollado la prefabricación del tapial y la introducción en taller de sistemas de instalaciones dentro de los muros (Bestraten *et al.,* 2011).

En la última década se han publicado en Scopus casi 10 veces más que en la década anterior, lo que denota interés científico por transformar la industria de la construcción en más sostenible (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012). Los materiales de tierra sin cocer son materiales que proveen una alternativa sostenible y saludable como reemplazo de los materiales convencionales de mampostería (Lawrence *et al.,* 2008). El cambio de tendencia en el interés científico por la construcción con tierra ha originado también un aumento en el número de normativas y códigos de regulación respecto a ella (Cristelo *et al.,* 2012).

La ausencia de industria que desarrolle estas tecnologías es una limitación para el avance en el uso de estas técnicas de tierra. El camino de la construcción con tierra de hoy en adelante, pasa por trabajar en la investigación en varios campos: la industrialización y mecanización para la optimización de procesos; la adición de materiales que aporten estabilización y protección frente a la humedad; la introducción de aligerantes que no comprometan la resistencia del material; y las posibilidades de incorporación de residuos de diferentes industrias (cenizas volantes, escorias siderúrgicas, escombros de obras). (Bestraten *et al.,* 2011).

Existe diferente nivel de desarrollo en la técnica. Interés en Asia, Medio Oriente, África y Latinoamérica en su vinculación con la vivienda social, en Europa el interés debido al aspecto ambiental y Estados Unidos, Australia, Francia y Alemania muestran

un énfsis en el desarrollo tecnológico Hoy día hay un interés especial en el desarrollo tecnológico de la construcción con tierra (Del Río y Sáinz, 2010).

Aplicado a la vivienda social, autoconstrucción, autoconstrucción con asistencia técnica, ya sea en la fase de proyecto o en la ejecución, vinculada a familias o organizaciones como asociaciones, cooperativas etc. La arquitectura de tierra contemporánea se ha visto influida en parte por los desarrollos científico-tecnológicos globales de las últimas décadas. Avances posibles a partir del conocimiento en profundidad del material. Una de las innovaciones más importantes es el BTC. (Del Río y Sáinz, 2010)

Se dan propuestas de innovación con el uso de técnicas mixtas (Caballero, 2012):

- Paja-arcilla. Al igual que la tierra compactada se necesitan cimbras en donde se pueda compactar una mezcla de paja con suficiente arcilla líquida para que las pajas individuales se adhieran entre sí y se unan por medio de la compactación. Este método se utiliza generalmente para muros de relleno ya que se requiere una estructura que soporte el techo. Se requieren también refuerzos horizontales cada 60 cms. que prevengan un ocasional volteo de muro.

- Pajareque. Esta técnica es una abstracción del tradicional bajareque y la variación es que solamente utiliza refuerzos verticales entre los cuales se teje un entramado con rollos de paja y lodo. Es igualmente una técnica de relleno y a diferencia de la paja-arcilla que utiliza cimbra y por tanto el resultado son líneas rectas, el pajareque permite hacer formas curvas.

- Pacas de paja. Las pacas se cuatrapean como si fueran ladrillos y se requiere una cadena de repartición de cargas que permita tanto la distribución uniforme del peso del techo, como la conexión entre el techo y el cimiento que es muy importante para efectos de vientos y sismos. Su principal enemigo es la humedad y tiene ciertas limitaciones limitaciones de espacio por el ancho de los muros, sin embargo esto se ve compensado con lo económico y fácil de la técnica.

Gernot Minke introduco la técnica de mangueras rellenas de barro (Minke, 2001)



Fig. 3.5.2.2.1. Construcción con mangueras rellenas de barro. (Minke y Mhkle, 2001).



Fig. 3.5.2.2.2. Construcción con mangueras rellenas de barro. (Minke y Mhkle, 2001).







Fig. 3.5.2.2.3. Construcción con mangueras rellenas de barro. (Minke y Mhkle, 2001).

Capilla de la Reconciliación. Berlín, Alemania. Arquitectos: Reiterman y Sassenroth. Construcción del tapial: Lehm Ton Erde, Martin Rauch. 2000



Fig. 3.5.2.2.4. Capilla de la Reconciliación. Arquitectos: Reiterman y Sassenroth. Construcción del tapial: Lehm Ton Erde, Martin Rauch (Bestraten, 2001).

El proyecto inicial se basaba en el uso de una doble piel de un muro de hormigón y otro de vidrio. Esta propuesta fue rechazada por la comunidad por considerar estos materiales representativos de la opresión ejercida por el muro que dividía la ciudad. Finalmente, la sustitución de los materiales por muros de tierra y celosía de madera hicieron posible el proyecto. Referente a nivel europeo, dado que se trata del primer edificio público con estructura portante de tierra construido en los últimos 150 años en Alemania. Los muros interiores de tierra apisonada son de 7,20 metros de alto, 0,60 m de espesor y 43 m de longitud. La forma ovalada del conjunto tiene diámetros de entre 10 y 14 metros y soporta las cargas de la cubierta. Se trata de una mezcla de arcilla y gravas de diversas granulometrías con un pequeño porcentaje de fibras de lino añadidas. Para los muros se utilizaron 390 toneladas (160 m3) de tierra mezclada con escombros de la anterior iglesia. Toda la tierra se mezcló de forma homogenea según la muestra seleccionada y fue vertida en los encofrados. La arcilla con su humedad natural se fue colocando en capas de 30 centímetros de grosor en los encofrados y se compacto después a unos 8 centímetros. (Bestraten *et al.,* 2011).

Centro de Visitantes en Eden Project, Cornwall, Reino Unido. Arquitecto: Grimshaw Architects. Construcción del tapial: RamCast, Rowland Keable. 2001.

Los largos muros de 45 m sutilmente curvados de tapial, dan la bienvenida a los visitantes, conduciéndolos a través de una calle parcialmente cubierta por unas estructuras tensadas, definida por un lado con la pared de tapial vista. Los muros de tierra no tienen función portante, sino únicamente de cerramiento; aunque por su resistencia podrían haber soportado correctamente las cargas. Situados bajo el alero de la cubierta y sobre un zócalo de hormigón, los muros se coronan con una ventana corrida que aporta ligereza al conjunto. De este modo, permite que se construyan los muros de tierra una vez ya ejecutada la cubrición, reduciendo el control durante la ejecución ya que es importante evitar que la tierra se humedezca en exceso, más de lo requerido durante el proceso de obra. La sección trapezoidal de los muros consigue una mayor estabilidad del elemento aunque dificulta su compactación. La tierra utilizada estaba formada por arcillas de baja expansividad y un alto contenido en áridos. (Bestraten *et al.,* 2011).

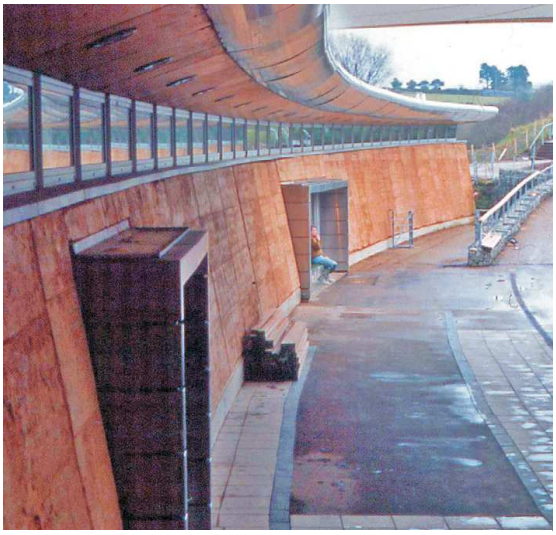


Fig. 3.5.2.2.5. Centro de Visitantes en el Eden Project, Cornwall, Reino Unido. Fuente: Rowland Keable, Ram Cast CIC (Bestraten *et al.,* 2011).



Fig. 3.5.2.2.6. Centro de Visitantes en el Eden Project, Cornwall, Reino Unido. Fuente: Rowland Keable, Ram Cast CIC (Bestraten *et al.,* 2011).

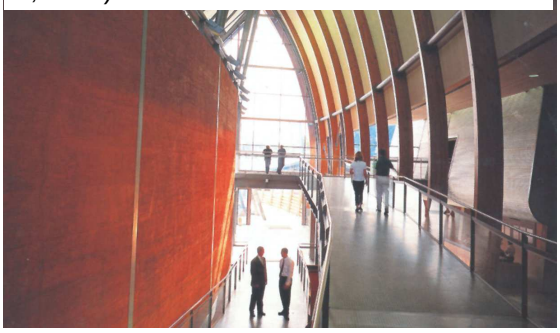


Fig. 3.5.2.2.7. Muros de tapial y estructura mixta en el Centro Nacional del Vino, Adelaide, Australia. Fuente: University of Adelaide (Bestraten *et al.,* 2011).

Centro Nacional del Vino, Adelaide, Australia. Arquitectos: Grieve Gillette y Cox. Constructor: Mitchel Builders. 2002

Muros de tapial con estructura portante embebida en los propios muros. Aunque estos no soporten el peso de la cubierta pueden ejercer la función de arriostramiento general de la estructura. Los muros de tapial del Centro tienen la estructura metálica embebida en el interior como evidencian las pertinentes juntas estructurales entre materiales. Con aproximadamente 10 metros de altura y 36 metros de longitud, están considerados como los mayores muros de tierra del hemisferio sur. (Bestraten *et al.,* 2011).

Hall del Bodhi Mandala Zen Center, Jemez Springs, Nuevo México, EE. UU. Arquitectos: Predock Frane Architects. 2003.

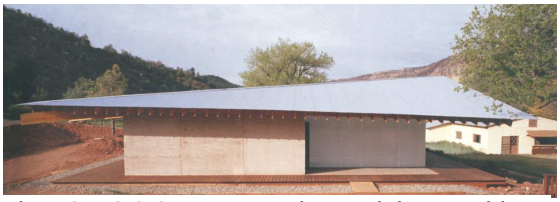


Fig. 3.5.2.2.8. Muros de tapial y cubierta paraboloide hiperbólica en el Bodhi Mandala Zen Centre, Jemez Springs, Nuevo México. Imagen: Predock Frane Architects (Bestraten *et al.,* 2011).

Nuevo México es el epicentro de la construcción con tierra en Norte América pero la mayoría de edificaciones tradicionalmente se han construido con adobe. Situado en una zona de clima extremo, el edificio se protege de los saltos térmicos gracias a una de las mejores bondades de la tierra: su comportamiento térmico. Los muros de tapial tienen unas propiedades de inercia térmica excelentes, que pueden mantener temperaturas interiores confortables sin necesidad de calefacción o refrigeración mecánicas con el consecuente ahorro energético. (Bestraten *et al.,* 2011).

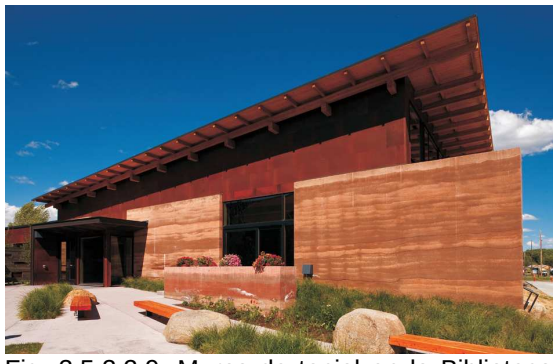


Fig. 3.5.2.2.9. Muros de tapial en la Biblioteca Sublette County, Pinedale, Wyoming, EE. UU. Fuente: Carney Architects (Bestraten *et al.,* 2011).

Biblioteca Sublette County , Pinedale, Wyoming, EE. UU. Arquitectos: Carney Architects Construcción del tapial: Terra Firma Builders. 2008

Caso de incorporación de aislamiento termico en el tapial, para combinar los beneficios de la masa térmica y mejorar la transmitancia: El sistema de tapial utilizado se denomina Sirewall, (tapial estabilizado y con aislamiento), una patente de Terra Firma Builders. Este sistema en sandwich tiene la particularidad de incluir barras de refuerzo de acero corrugado para fijar el aislamiento de poliestireno extruido de 10 cm de ancho en el interior del tapial, recubierto por una hoja exterior de tierra de 17,5 cm de ancho y otra interior de 25 cm. La transmitancia térmica del aislamiento interior es de 0,03 W/m2oC, lo que sumado a la inercia térmica de la tierra garantiza el confort necesario para la biblioteca. La mezcla de la tierra utilizada esta formada por una selección de tierras con una buena granulometría. Contenía un 10% de cemento portland y óxido de hierro para realzar el color ocre.

La mezcla se compacto mediante un pisón neumático con una cabeza de 10 cm de diámetro y el contenido de humedad se controlaba mediante el drop test. La mezcla se compacta por capas de 15 cm de altura hasta completar los muros de 4 metros de altura media. (Bestraten *et al.,* 2011).



Fig. 3.5.2.2.10. Detalle del muro en la Biblioteca Sublette County. Fuente: Carney Architects (Bestraten *et al.,* 2011).

Centro para la Tecnología Alternativa, Machynleth, Gales, Reino Unido. Arquitectos: Pat Borer and David Lea. Construcción del tapial: RamCast, Rowland Keable. 2010

Impresionantes muros de 7,2 metros de altura y 50 cm de espesor, soportan las cargas de la cubierta. La forma curva de 15 metros de diámetro de los muros encareció notablemente el coste de los encofrados. Con el propósito de ahorrar energía y cemento en la construcción, se proyectó el salón de actos con muros de tapial y el resultado es un edificio con unas propiedades higrotérmicas. (Bestraten *et al.,* 2011).

Deepanam School, Auroville, India. Auroville Earth Institute. Cátedra Unesco en Arquitectura de tierra. 1995

La sala polivalente de la escuela Deepanam de Auroville, fue construida en 1995 y representa la oportunidad de mostrar como la técnica de bóvedas Nubias, realizadas tradicionalmente con tierra, puede utilizarse para espacios de grandes luces. La bóveda se realizó con bloques de tierra comprimida y estabilizada mediante el sistema Auram de prensas manuales desarrollado en Auroville. El micro-ajuste de la tapa asegura bloques muy precisos, con menos de 1 mm de tolerancia en su altura. Esta homogeneidad de las piezas permite ahorrar mortero. Los bloques solamente necesitan entre 0,5 y 1 cm de mortero de tierra estabilizada para su agarre. Las medidas mas habituales del BTC son 10 x 15 x 30 cm. La altura de los bloques Auram se puede ajustar en incrementos de 5 mm, para conseguir alturas desde 5 hasta 10 cm. (Bestraten et al., 2011).



Fig. 3.5.2.2.11. Muros de cob y cubierta captadora de energia solar termica en el Pabellon de Servicios del Eden Project, cornwall, Reino Unido. Fuente: Abey Smallcombe (Bestraten *et al.,* 2011).

Pabellón de Servicios de Cob en Eden Project, Cornwall, Reino Unido. Arquitectas: Jackie Abey y Jill Smallcombe.

El cob es un sistema tradicional de construcción con tierra utilizado durante cientos de años en el sudeste del Reino Unido. Para las arquitectas Jill Smallcombe y Jackie Abbey, el cob es una técnica con cualidades esculturales excepcionales. Su textura y resistencia les ha permitido explorar en cuestiones de forma, ligereza, escala y contraste. Realzando sus cualidades orgánicas, el pabellón de servicios en el Eden Project se realizó con muros curvados de cob, protegidos debidamente con un zócalo y el gran alero de la cubierta de captación solar. Se decidió fabricar una mezcla de la arcilla de caolín y arcilla roja de Devon que se sabía que era mucho más duradera. El cob consistía en una mezcla de un 40% caolín y 60% de arcilla roja de Devon. La arcilla de caolín venia de restos del pozo de Imerys en Melbur. La arcilla roja Devon fue extraída de las excavaciones de un vertedero a las afueras de Crediton. El material es la combinación de dos materiales residuales de la zona. La mezcla de arcillas se humedeció hasta alcanzar la plasticidad necesaria y se mezcló mecánicamente. Posteriormente se agregó a la mezcla aproximadamente un 2,1% de paja de cebada. Segun los ensayos realizados, el cob inicial tenía una densidad de 1.890 kg/m3 con una cantidad de agua de aproximadamente el 15%. (Bestraten *et al.,* 2011).



Fig. 3.5.2.2.12. Vista exterior de vivienda bloques de tierra alivianada, revestimiento de madera y techos verdes en Punta Rubia (Rocha) - Arq. Javier Márquez, 2006. Imagen: I. Ferrari. (Ferreiro, 2013).

En Uruguay tenemos interesantes ejemplos de arquitectura Contemporánea con tierra e innovación: si bien la tierra fue el material con el que se erigieron las primeras construcciones de este país y una forma de asegurar la vivienda en el medio rural hasta hace menos de 100 años fue dejando de usar dicho material. Es a partir del año 1985 cuando algunos arquitectos uruguayos comenzaron a pensar otra vez en la tierra como un material válido para construir. Entre 1990 y 2000, algunas de las construcciones con tierra realizadas en esos años, se

convirtieron en referencias, contribuyendo para la aceptación y difusión de la tecnología en cuestión. Se da la incorporación cada vez más habitual de algunos elementos que modifican la estética de la vivienda rural que se mencionaba anteriormente. Introducción en la arquitectura de tierra de lenguajes estéticos contemporáneos. Muchas veces la propuesta consiste en dejar como acabado interior revoques de tierra cruda y se recubre el exterior para protegerlo del desgaste provocado por el viento y las lluvias de esta parte del mundo (Ferreiro, 2013).

Casa s-low. Sistema innovador de bioconstrucción modular con entramado de madera y tapial. (Estévez y Martín-Lara, 2013).

Sistematización de dos sistemas sistemas constructivos milenarios y extendidos por todo el mundo, el sistema de entramado de madera y el de muros de tapial. El sistema constructivo de la Casa S-Low está basado en el sistema de entramado de madera americano Platform Frame. Los cerramientos se realizan con tapial, y la cimentación que los sostiene, que es corrida, se ejecuta con hormigón o mampostería de piedra. La cubierta que utilizamos es plana, transitable y ajardinada que permite su uso recreativo (Estévez y Martín-Lara, 2013).



Fig. 3.5.2.2.13. Preparación de encofrado perdido (Estévez y Martín-Lara, 2013)



Fig. 3.5.2.2.14. Preparación de encofrado perdido (Estévez y Martín-Lara, 2013)

El entramado resultante funciona como una estructura espacial de planos horizontales y verticales de diafragma que reparten las cargas uniformemente a través de todos los muros, ya sean cargas verticales de peso, como horizontales de viento. Este sistema permite montar en 4 días una estructura de 150m2, lo que supone una ventaja competitiva importante en la reducción de los plazos de construcción. Por supuesto toda la madera proviene de explotaciones sostenibles con sello SCF y los tableros están libres de formaldehído (Estévez y Martín-Lara, 2013).



Fig. 3.5.2.2.15. Muro de tapial en construcción (Estévez y Martín-Lara, 2013).

Cerramiento de tapial: Después de realizar el montaje de la estructura de madera, que quedará en el interior del edifi cio, se inicia el cerramiento exterior que será un muro de tapial estabilizado. Se encofra la cara exterior del muro mediante el sistema de encofrado del SBM S_Low dejando un espacio de 50cm entre la estructura del entramado y el encofrado exterior, que será el espesor del cerramiento. De esta manera la estructura del edifi cio será también el encofrado perdido del muro de tapial, mientras que el encofrado exterior se va desplazando a medida que se va levantando el cerramiento exterior de tapial (Estévez y Martín-Lara, 2013).



Fig. 3.5.2.2.16. Muro de tapial en construcción (Estévez y Martín-Lara, 2013).

En cuanto al proceso de preparación de los módulos se piensa en las dos posibilidades de fabricación; montaje en taller para su posterior transporte a obra o de ensamblaje “in situ”. Ello dependerá lógicamente del volumen de edifi cación y de los medios disponibles que se contemple en cada proyecto.

En cuanto al proceso de preparación de los módulos se piensa en las dos posibilidades de fabricación; montaje en taller para su posterior transporte a obra o de ensamblaje “in situ”. Ello dependerá lógicamente del volumen de edificación y de los medios disponibles que se contemple en cada proyecto.

Construcción de los muros: Se continúa con el ensamblado y colocación de todos los módulos de pared y de suelo hasta que prácticamente quede completada la estructura del edifi cio, tanto en el caso de una como en el de dos plantas. Se recuerda que dicha estructura es portante a todos los efectos, por lo que esta fase de la construcción es la que requiere un buen control de calidad. Llegados a este punto es cuando se procede a colocar paneles de encofrado recuperable longitudinal con los correspondientes encofrados recuperables de cierre transversal y de esquina.



Fig. 3.5.2.2.17. Muro de tapial en construcción (Estévez y Martín-Lara, 2013).

Construcción de los muros

Se continúa con el ensamblado y colocación de todos los módulos de pared y de suelo hasta que prácticamente quede completada la estructura del edifi cio, tanto en el caso de una como en el de dos plantas. Se recuerda que dicha estructura es portante a todos los efectos, por lo que esta fase de la construcción es la que requiere un buen control de calidad.



Fig. 3.5.2.2.18. Prototipo ya construido e instrumentalizado para el estudio de su comportamiento termohigrométrico. Fuente: Allepuz, Poza. (Estévez y Martín-Lara, 2013).



Fig. 3.5.2.2.19. Muro de tapial en construcción (Estévez y Martín-Lara, 2013).

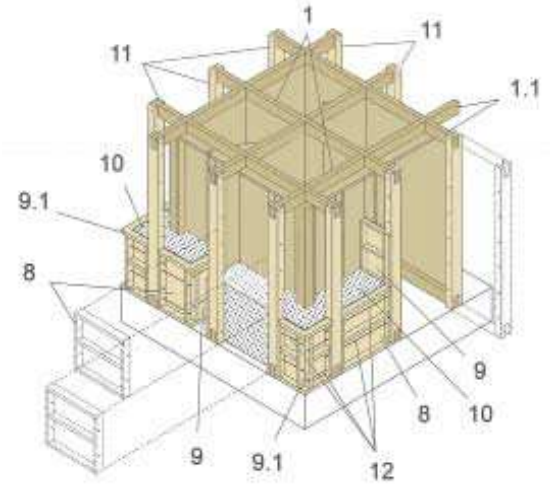


Fig. 3.5.2.2.20. Detalles constructivos del sistema S-Low (Estévez y Martín-Lara, 2013).



Fig. 3.5.2.2.21. Proyecto de equipamiento educativo en Viana, construido con el sistema S-Low. Casa S-Low (Estévez y Martín-Lara, 2013).

3.5.2.3 Construcción con tierra, prefabricación e industrialización

Paneles de entramado prefabricado.

Casa in Arruda dos Vinhos / Plano B. Entramado hecho de madera de eucalipto. Espacio intersticial de los elementos de madera se rellena de tierra amasada con aserrín. En el interior igual pero con listón de pino revocado con cal aérea. En el exterior se cubre con placas de corcho revestido de chapas de policarbonato alveolar. La tierra y las virutas no tienen características térmicas fabulosas por si mismas, pero en conexión con los 5cms de corcho y la impermeabilización del policarbonato se obtiene un buen resultado.



http://www.archdaily.com/48307/casa-in-arruda-dos-vinhos-plano-b/



Fig. 3.5.2.3.2. Casa de Arruda dos Vinhos, de los arquietctos PlanoB. http://www.archdaily.com/48307/casa-in-arruda-dos-vinhos-plano-b/

Concebido como un ejercicio de la yuxtaposición de materiales para originar un nuevo cuerpo, el proyecto utiliza preexistente materiales que se encuentran en una estructura que los vecinos del sitio como los componentes básicos para el nuevo sistema constructivo en ruinas (Archdaily, 20xx).



Fig. 3.5.2.3.3. Casa in Arruda dos Vinhos / Plano B. http://www.archdaily.com/48307/casa-in-arruda-dos-vinhos-plano-b/

La firma se centró en el desarrollo de un complejo de edificios de la piel y trabajó para integrar los métodos de construcción tradicionales con materiales contemporáneos. La madera que se encuentra en el edificio anterior se aplicó en el marco estructural de la casa, mientras que la piedra de las antiguas murallas se utiliza en el sistema de cimentación. La casa es también un experimento de "hágalo usted mismo", donde los residentes juegan un papel importante en la construcción de la cabina.



Fig. 3.5.2.3.4. Casa in Arruda dos Vinhos / Plano B. http://www.archdaily.com/48307/casa-in-arruda-dos-vinhos-plano-b/

Al asumir el uso de materiales industriales - asfalto, hormigón, de policarbonato - en combinación con materiales naturales - madera, tierra y piedra - esta casa es un ejemplo interesante de la práctica sostenible ", manteniendo un enfoque crítico hacia el proyecto como un espacio para la reflexión sobre las cualidades expresivas de arquitectura.



Fig. 3.5.2.3.5. Casa in Arruda dos Vinhos / Plano B. http://www.archdaily.com/48307/casa-in-arruda-dos-vinhos-plano-b/

Tapia prefabricada

Francia 1968-87, el constructor Nicolás Meunier ideó un sistema de bloques de tapia prefabricados, puesto en práctica en Montbrison, Loira en los 90. (Del Río y Sáinz, 2010)



Fig. 3.5.2.3.6. Bloques de tapial prefabricado (Del Río y Sáinz, 2010).

El bloque de tapia prefabricado se produce en el mismo lugar de la obra, con encofrados de diferentes tamaños, luego se compacta y se iza ayudándose de una grua. Se coloca sobre lecho de cal. El tamaño máximo de los bloques es de 2,20m y una altura de 1,00m, con espesor de 50cms (Del Río y Sáinz, 2010).

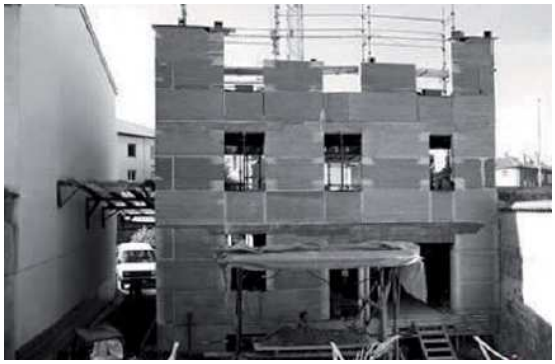


Fig. 3.5.2.3.7. Bloques de tapial prefabricado (Del Río y Sáinz, 2010).

Tecnobarro y quincha metálica.

Sistema constructivo mixto, donde existe una estructura portante de acero y un material de relleno que es una mezcla de tierra y paja. Conceptualmente hablando, el tecnobarro es una evolución de la quincha tradicional, sustituyendo el entramado de madera por un entramado de acero (Del Río y Sáinz, 2010).



Fig. 3.5.2.3.8. Casa en Peñalolén, Tecnobarro. MarceloCortés. http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=208



Fig. 3.5.2.3.9. Detalle constructivo Tecnobarro. Marcelo Cortés. http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=208

Presenta dos modalidades: la primera denominada como quincha metálica, con estructura en base a perfiles de acero entre los cuales se suelda una malla metálica, sobre la cual se aplica la mezcla de tierra y paja. La segunda, denominada “tecnobarro”, la estructrura es en base a la misma malla metélica, sin perfiles de apoyo, plegándose la malla cada 10 cms o más dependiendo del caso, logrando un panel estructural tipo estereométrico que luego se rellenda completamente con tierra y paja, lo que le da consistencia y resistencia a la estructura (Del Río y Sáinz, 2010).



Fig. 3.5.2.3.10. Detalle constructivo Tecnobarro. Marcelo Cortés.http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=208

A los valores propios de la tierra, se aporta libertad formal, productividad, economía y prefabricación. El sistema se basa en la mezcla entre las características de la tierra-compresión y acero-tracción, con lo que se logra la asismicidad de la obra de tierra (Del Río y Sáinz, 2010).





Fig. 3.5.2.3.11. Detalle constructivo Tecnobarro. Marcelo Cortés.http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=208



Fig. 3.5.2.3.12. Casa en Peñalolén. Marcelo Cortés.http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=208



Fig. 3.5.2.3.13. Casa Batuco. Marcelo Cortés.http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=208



Fig. 3.5.2.3.14. Casa Batuco. Marcelo Cortés.http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=208



Fig. 3.5.2.3.15. Casa Batuco. Marcelo Cortés.http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=208



Fig. 3.5.2.3.16. Casa Batuco. Marcelo Cortés.http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=208



Prefabricados en base a tierra y suelos arcillosos. BTC bloque de tierra comprimida – BTC (Célia Neves y Ana Paula Milani, 20xx)

El bloque de tierra comprimida, generalmente llamado BTC, es el elemento de la albañilería hecho con tierra (suelo) compactada en el moldeo por compresión o prensado, seguido por el desmolde inmediato. Para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del BTC como su resistencia a la compresión y a la acción abrasiva del viento, impermeabilidad, durabilidad, puede utilizarse la estabilización granulométrica, que consiste en la mezcla de proporciones de diferentes tierras y la estabilización química, en que se agrega un aditivo químico a la tierra, generalmente aglomerante tipo cemento o cal. Es posible fabricar BTC de diferentes formas y tamaños, siendo usual el BTC macizo y el BTC con huecos, ambos con y sin encajes (figura 1).

El BTC puede ser usado en cualquier tipo de construcción substituyendo los bloques cerámicos o de concreto convencionales, sea en albañilería para cerramiento o mampostería portante, siempre que se observen las capacidades resistentes establecidas en el proyecto. Las paredes

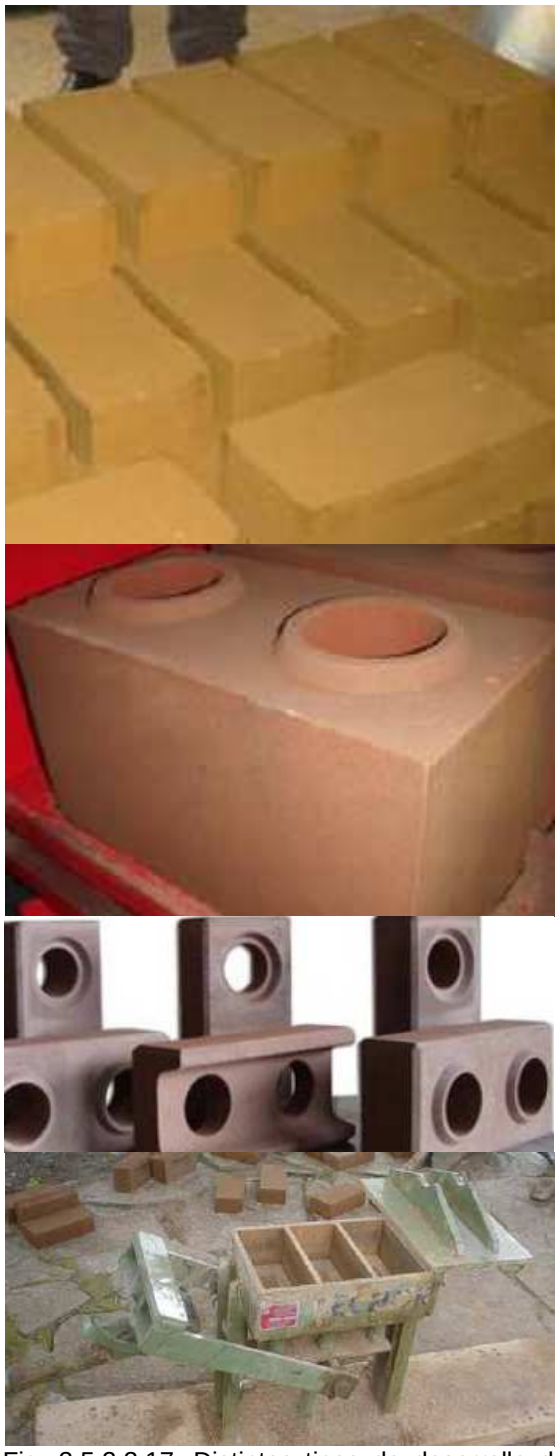


Fig. 3.5.2.3.17. Distintos tipos de desarrollo d bloques BTC (Célia Neves y Ana Paula Milani, 20xx)

tanto pueden estar con el mampuesto a la vista (cuando estén protegidas de la lluvia), como cubiertas, pudiendo recibir revestimiento de mortero, diversos tipos de pintura o revestimiento cerámico. Además, presenta otras ventajas, tales como:

- Fácil de fabricar.

- Mantiene la regularidad de las dimensiones.

- Posibilidad de control eficiente de la resistencia a la compresión y otros parámetros.

Materiales: La bibliografía recomienda el uso de tierra con un porcentaje de arena superior al 50% para la fabricación del BTC. La arena es responsable de la estructuración interna (resistencia) del bloque, mientras que la arcilla responde a la aglutinación o cohesión de las partículas de la tierra. Sin embargo, la arcilla también es responsable del efecto de retracción del material durante el secado y la aparición de grietas en los bloques. Para corregir esto se opta por una estabilización granular o una estabilización química con la adición de aglomerantes como cemento, cal o asfalto, entre otros.





Fig. 3.5.2.3.18. Fabricación y puesta en obra del BTC (Célia Neves y Ana Paula Milani, 20xx)



Fig. 3.5.2.3.19. Técnicas: BTC muro doble espesor 36 cm; paneles de fajina; techo verde; techo madera; torta de barro y teja asfáltica. Obra terminada. (Rosario, 2012).

Sistema semi-prefabricado de paneles de tierra-paja.



Fig. 3.5.2.3.20. Proceso constructivo con panel semiprefabricado. Arq. José Luis Mazzeo

En Uruguay, José Luis Mazzeo desarrolla esta tecnología intermedia, no industrialización a gran escala. Pensado para vivienda económica: tablas de encofrado, módulos 50x50cms. Rellenos de tierra-paja. Las posibilidades que nos ha brindado éste sistema es que se pueden ejecutar en un lugar donde tengamos la infraestructura necesaria, el elemento se puede fabricar con anticipación a la obra, con secado natural con suficiente tiempo. Permite el montaje en seco, clavando los paneles entre si y a la estructura principal. Permite trabajos de preobra y generación de empleos. Conceptos básicos para la economía de una obra, como la racionalización, y la velocidad de obra. El espacio se basará en el módulo 50x50, para no realizar cortes en obra y optimizar el material, asegurando un montaje rápido y precisión que otorga la coordinación modular prevista. Posibilidad de realizar la construcción en 6 días: estructura de madera y una cubierta superior de quinchado en los 3 primeros días, y en los dos días siguientes realizamos el montaje de paneles.

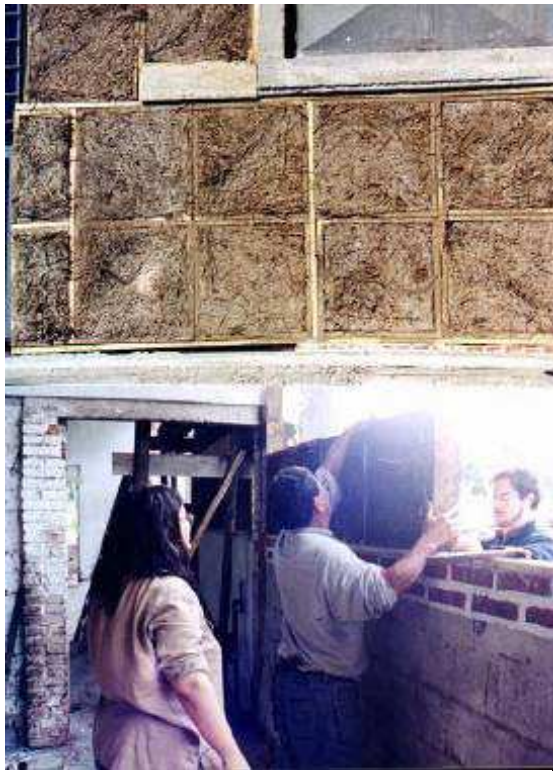


Fig. 3.5.2.3.21. Proceso constructivo con panel semiprefabricado. Arq. José Luis Mazzeo.

Paneles prefabricados de Fajina



Fig. 3.5.2.3.22. Vivienda construida con panel prefabricado. De Fajina (Rosario, 2012).

Prototipo Vaimaca en Montevideo (paneles prefabricados de fajina). En este proyecto se traslada a obra el 100% de los materiales. Se monta un taller de componentes de paneles de madera a cargo de las mujeres del grupo. En forma coordinada y con el asesoramiento técnico, un grupo realiza los cimientos, la colocación de palos verticales y la estructura de madera del techo. Luego se montan los paneles prefabricados, junto a las aberturas y se realizan las jornadas de embarrado (Rosario, 2012).

Panel prefabricado de quincha



Fig. 3.5.2.3.23. Fabricación de panel prefabricado de quincha.

La Quincha es un sistema constructivo tradicional de Sudamérica que consiste fundamentalmente en un entramado de caña o bambú recubierto con barro. Estos paneles se basan en la semi-industrialización de dicha técnica tradicional.

Materiales, tecnologías, sistemas constructivos y soluciones habitacionales de bajo coste: quincha prefabricada (Instituto nacional de investigación y normalización de la vivienda (ininvi). Perú).

Descripción del sistema: Origen: quincha tradicional peruana. Poco peso: ventaja en zonas sísmicas. Autocostrucción: fácil capacitación. Creación de micro-talleres

Elementos: Paneles prefabricados: bastidores de madera + bambusas trenzadas (carrizo, caña o bambú). Se montan y fijan a sobrecimientos, Viga solera + Revoco con barro y paja + Techo liviano sobre viga solera.



Fig. 3.5.2.3.24. Puesta en obra de panel prefabricado de quincha.









Fig. 3.5.2.3.25. Prácticas demostrativas (Ramón, Aguirre, 2012).

Sistema de muros textiles rellenos

Sobre estructura de columnas delgadas de madera clavadas al suelo, se fija yute dentro de la estructura y se rellena con tierra y pómez. Igual, el muro terminado se pinta con una lechada de cal para evitar la putrefacción. Los elementos de este sistema se pueden fabricar de hasta 10m para luego doblarse y enrollarse, facilitando el transporte (Gernot Minke, 2001).

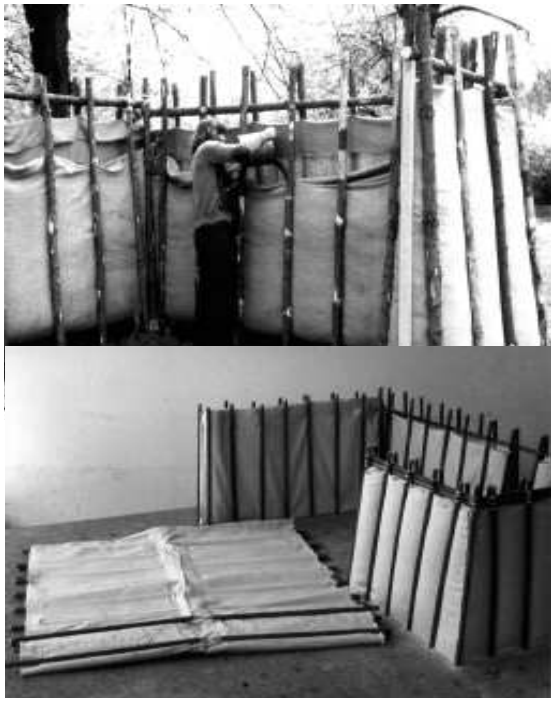


Fig. 3.5.2.3.26. Sistema de muros textiles prefabricados rellenos de tierra.

Sistemas de panel de tapial reforzado.

PROYECTO DEL FEB desarrollado en 1978 desarrollado por medio de un sistema de paneles reforzados con bambú en su interior.

Los paneles eran de 80cms de ancho por una altura de alto de tapial reforzado con bambú con un encofrado de metal de T de 80cms de ancho, 40 cms de altura y entre 14 y 30 cms de espesor.



Fig. 3.5.2.3.27. Sistema panel de tapial prefabricado reforzado. Prototipo de una vivienda antisísmica de bajo costo con tapial reforzado, Guatemala 1978.

Adobones y paneles prefabricados ligeros de barro y paja (Minke, 1998).

Alternativa con elementos prefabricados de mayor escala para una mano de obra alta e intensiva. Los adobones son adobes de dimensiones mayores y más ligero para facilitar su puesta en obra.

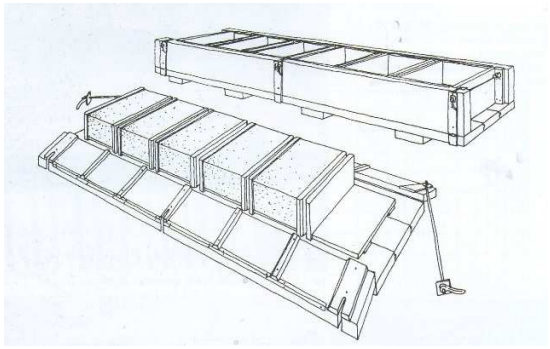


Fig. 3.5.2.3.28. Adobones (Minke, 1998)

El bloque puede ser de hasta 15x24x30cm., de barro apisonado aligerado con paja, con un peso de 9,5kg.

El arquitecto alemán Sylvester Dufter usó bloques alivianados con paja de 50x60x30cm, con un peso de 26kg. Este tipo de bloques se fabrican en taller y luego pueden ser usados hasta en proyectos de autoconstrucción (Minke, 1998).



Fig. 3.5.2.3.29. Muros de bloques grandes de barro alivianada con paja (Minke, 1998)

Se han utilizado paneles prefabricados de 6 a 12 cms de espesor de 30x60cm hasta de 62.5x100cm como elementos no portantes, con una densidad de entre 800kg/m3 a 1000kg/m3 (Minke, 1998).

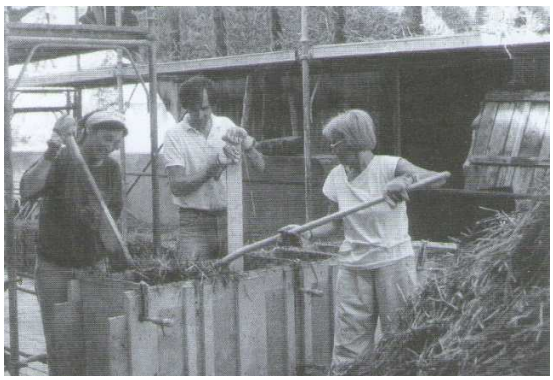


Fig. 3.5.2.3.30. Fabricación de bloques grandes de barro alivianada con paja (Minke, 1998)

La empresa alemana Breidenbach elaboró un panel extremadamente ligero de 550kg/m3, realizado con esteras de caña revocadas con barro y cubiertas con tela de yute (Minke, 1994).

La empresa “Karphosit” creó un panel alivianado de 62.5x25x10 producido con arcilla en polvo y paja, con una densidad de 950kg/m3.

La empresa alemana “Terra limes” desarrolló un panel que consistía en un entramado de madera de 1 metro de ancho y hasta 3 metros de altura, relleno con barro alivianado que podría ser montado con grua.

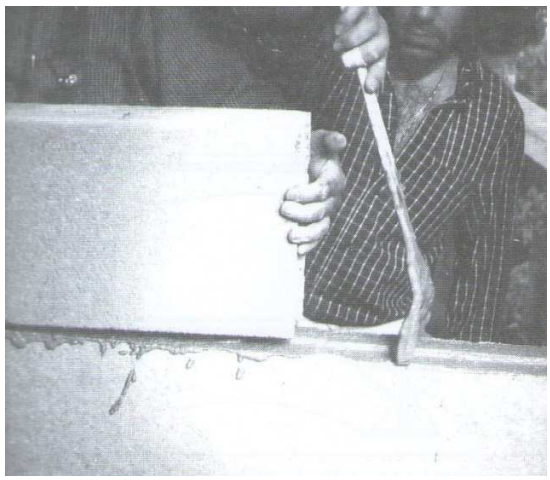


Fig. 3.5.2.3.31. Colocación de panel Karphosit (Minke, 1998).

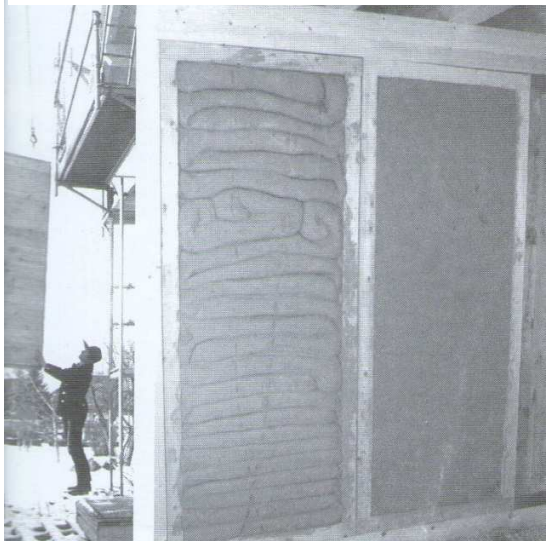


Fig. 3.5.2.3.32. Puesta en obra de panel de entramado de madera con barro alivianada con paja (Minke, 1998).

Panel semi-prefabricado mixto de paja y tapial con marco de madera

Sistema mixto donde la paja aporta el aislamiento térmico y el tapial la inercia térmica. La caja de madera en la que se comprimen los materiales está diseñado como un elemento modular que se puede construir similar a una pared de ladrillo. Los módulos de madera evitan el encofrado del tapial y la estructura de madera adicional a la paja (Ciurilenau y Horvarth, 2012).

El compartimiento de tierra apisonada tiene que ser de 30 cm de ancho o más. La anchura de la capa de la paja es dependiente del coeficiente de transferencia de calor calculado, U, para la pared exterior. La longitud de la caja, 110 cm, se genera por la capacidad de las tablas de madera para resistir la presión de la tierra apisonada. También es el doble de la anchura de la caja,

que es de 55 cm. La altura de la caja es la mitad del parapeto ventana estándar, 90 cm, por lo que, dos módulos son necesarios antes de crear una abertura de la ventana.



Fig. 3.5.2.3.33. Panel semiprefabricado mixto de paja y tapial con marco de madera (Ciurilenau y Horvarth, 2012)

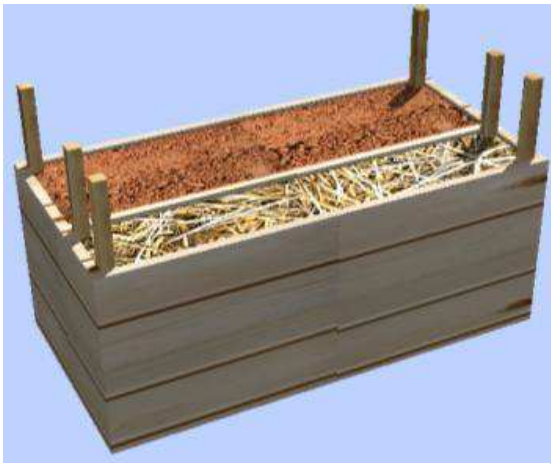


Fig. 3.5.2.3.34. Panel semiprefabricado mixto de paja y tapial con marco de madera (Ciurilenau y Horvarth, 2012).

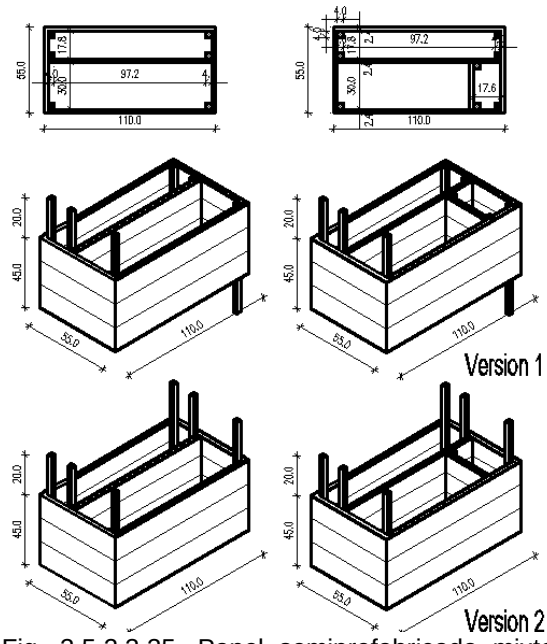


Fig. 3.5.2.3.35. Panel semiprefabricado mixto de paja y tapial con marco de madera (Ciurilenau y Horvarth, 2012)

Se propone como elemento modular, donde la caja de madera tiene dos funciones: uno para el material que ofrece la resistencia de la pared (tierra apisonada) y uno para el material con propiedades aislantes (paja). Los módulos están diseñados para ser capaz de formar una pared estructural rígido y para que se permita el uso de mano de obra no profesional. El coste de la pared modular es dos o tres veces menor que el costo de una acumulación casa con materiales comunes.

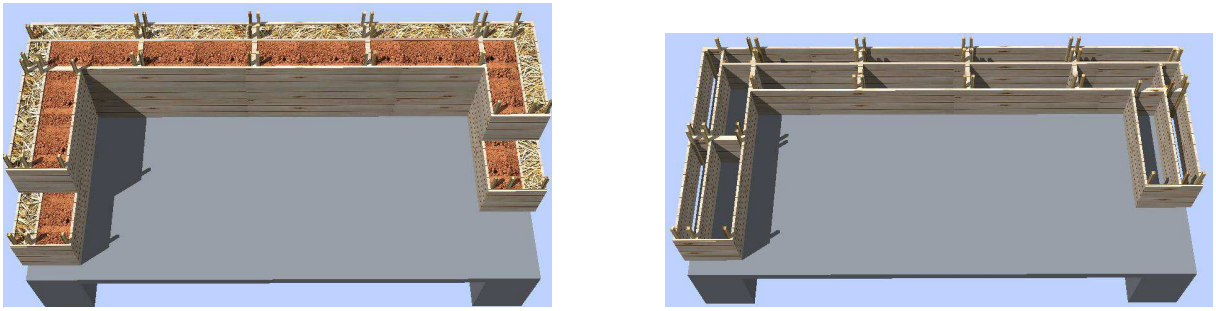


Fig. 3.5.2.3.36. Panel semiprefabricado mixto de paja y tapial con marco de madera (Ciurilenau y Horvarth, 2012)

Paneles prefabricados con cáñamo.

Paneles rígidos compuestos de fibra de cáñamo y tierra. Su espesor puede ser de 12 ó 14 cm y sus formas pueden adaptarse a las necesidades de cada proyecto, posibilitando distintas piezas como paneles de cerramiento, paneles con huecos para puertas y ventanas, dinteles, etc. Las piezas son resistentes a la intemperie por lo que pueden funcionar como muros de fachada.



Fig. 3.5.2.3.37. Panel prefabricado mixto de paja y cáñamo (www.cannabric.com)



Fig. 3.5.2.3.38. Panel prefabricado mixto de paja y cáñamo (www.cannabric.com).

Panel de tapial industrializado (Von Mag y Rauch, 2011).

La del tapial es un tipo de construcción pensada para su ejecución en obra. Está reconocido de forma general que esta técnica de construcción necesita de una intensiva cantidad y capacidad de trabajo. Un sistema más racionalizado de ejecución solo es posible de manera limitada con la ayuda de máquinas de construcción convencionales desarrolladas por la industria moderna. Estas condiciones básicas de ejecución han sido en las últimas décadas una limitación importante para el uso intensivo del tapial. Ha tenido que ser a partir de una mirada ecológica y la búsqueda de alternativas más sostenibles para el mundo de la construcción, que el



Fig. 3.5.2.3.39. Fabricación de paneles de tapial industrializados (Von Mag y Rauch, 2011).



Fig. 3.5.2.3.40. Fabricación de paneles de tapial industrializados (Von Mag y Rauch, 2011).

tapial ha resurgido con una interesante perspectiva de futuro.



Fig. 3.5.2.3.41. Fabricación de paneles de tapial industrializados (Von Mag y Rauch, 2011).

La prefabricación del tapial tiene ventajas decisivas respecto al trabajo in situ, propias de las técnicas racionalizadas: La producción se puede realizar independientemente del tiempo exterior, evitando interrupciones e imprevistos durante la ejecución, se pueden calcular los rendimientos de ejecución con gran precisión, optimizando los métodos de trabajo, se reducen los tiempos de trabajo en obra, se mejora la planificación de la obra y la coordinación de las intervenciones en la misma, reduciendo los tiempos de entrega del conjunto edificado, se mejoran los procesos de control de calidad y así como la calidad final de la pieza (dosificaciones, grado de compactación, textura de acabado). De este modo se hace posible una óptima introducción de procesos constructivos industrializados. Los métodos de trabajo pueden ser asimismo optimizados y racionalizados a través de esta construcción en módulos.

El tapial prefabricado permite un alto grado de individualización gracias a la posibilidad de optimizar en taller aspectos dimensionales, flexibilizando el proceso. Una de las dificultades que presenta el tapial es su transporte, dado que la falta de ductilidad del material exige condiciones de empaquetado, almacenaje, carga, descarga y traslado muy cuidadosos. Aun así la práctica ha demostrado que este aspecto no es un problema. Piezas prefabricadas de hasta 7.000 kg fueron transportadas a largas distancias, superiores a los 800 km.

El transporte de materiales a grandes distancias plantea grandes dudas ecológicas. En los países en vías de desarrollo, con difíciles condiciones de infraestructuras, en especial de transporte, el prefabricado juega un papel relevante sólo donde existen las vías de transporte. Por contra, lo que puede ser interesante en estos países es la transferencia de la tecnología: tecnología de fabricación móvil en forma de máquinas fácilmente transportables. De este modo es posible utilizar el material y la fuerza de trabajo local y aumentar significativamente la calidad debido a la mayor facilidad en su ejecución.



Fig. 3.5.2.3.42. Fabricación de paneles de tapial industrializados (Von Mag y Rauch, 2011).



Fig. 3.5.2.3.43. Paneles de tapial industrializados (Von Mag y Rauch, 2011).

Características del tapial prefabricado: La tierra del tapial y las mezclas con la misma son principalmente solubles al agua. Esto hace de la materia del tapial un elemento totalmente reciclable las veces que sea necesario sin que se produzcan pérdidas de calidad en el material que lo compone. El tapial tiene la capacidad de intercambiar humedad de forma muy rápida con el ambiente, absorbiéndola y cediéndola con rapidez. En relación al fuego la tierra tiene un muy buen comportamiento tanto en resistencia al fuego y tienen una muy buena capacidad de aislamiento acústico. Su porosidad y textura superficial le proporcionan un relativamente buen comportamiento a la absorción acústica. La esta capacidad de absorción de agua es muy importante evitar sistemática y cuidadosamente la humidificación continua del materia. Al exterior, hay que contar siempre con una calculada erosión natural del material tapial. Debido a la sequedad del material y a su comportamiento activo a la humedad, no pueden anidar microorganismos, bacterias o

mohos. Una buena elección del material trabajado correctamente, unido a una buena solución de los detalles constructivos, es la solución a las problemáticas de erosión superficial por la lluvia o heladicidad del interior del material. Debido a su capacidad de absorber y emitir agua se disuelven las sales del interior del material y transportan a la superficie.

El tapial tiene un excepcional y hasta el momento no superado balance energético. El tapial se encuentra en cualquier parte del mundo y es 100% reciclable y no genera problemas de deposición. El tapial no tiene fecha de caducidad.

3.5.2.4. Características, ventajas y desventajas de la construcción con compuestos de tierra y arcillosos

Ventajas de la construcción con compuestos de tierra y arcillosos

- Los procesos de producción son sencillos, sin necesidad de cocciones que generan combustiones y un alto consumo energético. No se producen emisiones toxicas durante el proceso de transformación ni durante su vida útil. El impacto paisajístico en la producción se puede reducir a cero. Es el material más accesible al hombre (Barrionuevo, 2011). Los materiales de tierra y arcillosos pueden absorber contaminantes (Minke, 2001; Zami y Lee, 2010).

- Buen rendimiento térmico y por lo tanto energético = Eficiencia energética a la hora de garantizar el confort interior (Minke, 2001; Zami y Lee, 2010; Morton, 2008; Maini, 2007; Lima *et al.,* 2012; Piattoni *et al.,* 2011; Delgado y Guerrero, 2006). Buena conductividad térmica, del adobe 0,45-0,8W/mºC, del bloque de tierra comprimida 0,75-1,1 W/mºC, o del tapial con 0,7W/mºC en comparación del concreto con 1,6 y el ladrillo cerámico macizo con 1.8-2.0 W/mºC, ladrillo cerámico perforado con 1,4-1,6 W/mºC (Neila, 2005). - La construcción con tierra y compuestos arcillosos, aporta inercia térmica que ayuda a mantener constante la temperatura interior en climas con variaciones térmicas amplias (Pineda *et al.,* 2007). Un compósito de arcilla como recubrimiento interior en clima mediterráneo provee una significativa mejora del confort

interior lo que conlleva un ahorro de energía de operación para climatización (Liuzzi *et al.,* 2013).

- La energía incorporada primaria en la construcción en base a tierra puede ser la mitad de una construcción convencional, e igual puede suceder con la producción de emisiones de CO2 equivalente (Lourenço, 2002). De la tierra 0,45MJ/kg y 0,023kgCO2/kg en comparación con el concreto con 0,86MJ/kg y 0,13kgCO2/kg, del bloque de concreto con 0,67-0,81MJ/kg y 0,061-0,098kgCO2/kg y el ladrillo cerámico con 0,2-4MJ/kg y 0,22kgCO2/kg (Hammond y Jones, 2008).

- Eficiencia en el costo (Zami y Lee, 2010; Minke, 2001; Morton, 2008; Walker *et al.,* 2005; Maini, 2007), aunque esto depende de varios factores como la técnica usada, los costos de puesta en obra, el proceso de estabilización, la durabilidad y la necesidad de reparación (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012).

- No se requieren complejas tecnologías ni profesionales muy especializados para su puesta en obra (Zami y Lee, 2010; Minke, 2001; Maini, 2007) y esto hace que se potencie la autoconstrucción (Minke, 2001; Zami y Lee, 2010).

- Posibilidad de creación de empleo descentralizado (Sanya, 2007; Zami y Lee, 2010)

- La construcción con tierra no puede considerarse que consuma materiales no renovables, pero no consume tanta cantidad de materia prima como materiales tradicionales como el ladrillo (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012). Abastecimiento de material casi ilimitado o con disponibilidad en grandes cantidades en la mayoría de las regiones (Bestraten *et al.,* 2011; Zami y Lee, 2010). Es un material con posibilidad de extracción y producción local, lo que ayuda a la reducción de consumo de energía y emisiones de CO2 por transporte. La construcción con tierra puede reusar millones de toneladas de residuos de suelo y otros materiales como el yeso producidos en la ciudad (Morton, 2008).

- Respecto a los residuos, los materiales en base a tierra o compuestos arcillosos pueden ser depositados en el medio sin suponer una amenaza ambiental, por lo que se puede considerar que no se genera residuo (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012; Bestraten *et al.,* 2011). Los materiales de tierra pueden ser reusados fácilmente sin afectar al medio ambiente mediante molienda y mojado, o devuelto a la tierra (Marín *et al.,* 2011). Fácil demolición (Bestraten *et al.,* 2011). En caso de un material estabilizado con cemento o cal, u otro estabilizante, la proporción del estabilizante recomendada (5-10%) es suficientemente baja como para no suponer ningún riesgo para el entorno natural, por lo se permite la regeneración de suelos y de la masa vegetal (Bestraten *et al.,* 2011). El empleo de materiales reciclados ayuda a reducir algunos de los grandes impactos medioambientales derivados de la actividad humana, el ingente consumo de recursos materiales y la masiva generación de residuos (Alba *et al.,* 2012). La construcción con tierra puede reusar millones de toneladas de residuos de suelo y otros materiales como el yeso producidos en la ciudad (Morton, 2008).

- No se producen emisiones tóxicas durante el proceso de transformación ni durante su vida útil (Bestraten *et al.,* 2011). La construcción con tierra no está asociada con los efectos adversos de la existencia de componentes volátiles orgánicos (VOCs), contribuyendo a la calidad del aire interior (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012).

- Capacidad de regulación de la humedad interior (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012; Liuzzi *et al.,* 2013; Allison y Hall, 2010; Ashour *et al.,* 2011; Hall y Allison, 2009; Liuzzi *et al.,* 2010), ecualizando esta, siendo capaz de mantener esta dentro de los rangos de confort de entre 40% y 60% (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012). Mejor comportamiento higrotérmico en comparación con materiales convencionales de construcción (Allison y Hall, 2010; Hall y Allison, 2011; Oti *et al.,* 2010; Millogo *et al.,* 2008; Minke, 2001; Oti *et al.,* 2009; Parra-Saldivar y Batty, 2006). Edificios construidos en tierra logran un equilibrio de la humedad del ambiente interior más rápido que otros materiales convencionales (Minke, 2001).

- Muy buen comportamiento ante el fuego (Zami y Lee, 2010; Walker, 2005). Material considerado incombustible, que no propaga el fuego y no emite gases tóxicos

en caso de incendio. Resistencia al fuego considerada de REI90 para espesores iguales o mayores a 150mm (Bestraten *et al.,* 2011).

- Cualidad de aislamiento acústico debido a su densidad y masa (Zami y Lee, 2010; Bestraten, 2011; Lima *et al.,* 2012; Piattoni *et al.,* 2011; Delgado y Guerrero, 2006). Para una pared de entre 150 y 1200 mm de espesor, el aislamiento frente al ruido aéreo varía entre 49 y 70 dB, cumpliendo con la normativa española actual para ello (Bestraten et al., 2011).

- A pesar de tener una resistencia a compresión baja, el adobe por ejemplo de 60kg/cm2 (Pineda *et al.,* 2007), se pueden usar sin problema en la edificación como materiales no portantes (Lima *et al.,* 2012), teniendo solvencia suficiente si se usan como elementos autoportantes independientes a la estructura principal del edificio (Bestraten *et al,* 2011).

Posibles desventajas de la construcción con tierra

- La absorción de agua puede hacer perder estabilidad del adobe en ambientes húmedos, lo que supone un problema. La absorción de agua es afectada por el tipo de concentración de agentes tenso-activos. Cuando un agente tenso-activo no se usa en la mezcla, estos materiales pueden absorber mucha agua (Pineda et al., 2007). Una de las principales deficiencias en la construcción con tierra sin estabilizar es los daños por absorción de agua (Marín *et al.,* 2011).

- Menor durabilidad que la mayoría de los materiales convencionales de construcción. Necesidad de alto mantenimiento (Zami y Lee, 2010). Aunque existen construcciones en tierra de más de cientos de años de antigüedad, es algo sobre lo que hay que prestar atención. El mayor mecanismo responsable de la erosión de la tierra como material de construcción es la energía cinética del impacto de la lluvia (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012).

- Puesta en obra y trabajabilidad intensiva (Zami y Lee, 2010; Pacheco-Torgal y Jabali, 2012), que puede conllevar un bajo rendimiento económico.

- Mal comportamiento sísmico (Zami y Lee, 2010).

- No facilidad en el revoco, enlucido y terminación (Zami y Lee, 2010).

- No es un material homogeneizado y estandarizado (Zami y Lee, 2010).

- Limitaciones estructurales, normalmente se necesitan grandes grosores de pared para su buen uso (Zami y Lee, 2010). Baja resistencia a compresión, aunque suficiente como para ser utilizado en muros de carga (Bestraten *et al.,* 2011). Valores para esfuerzos de tracción, flexión y cortante mínimos (entre 0,02 y 0,1 N/mm2), lo que conlleva, según su función estructural, un armado (Bestraten *et al.,* 2011). La resistencia y comportamiento mecánico muchas veces depende de la geometría y tamaño del elemento constructivo en tierra (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012).

El futuro de la construcción con tierra está en la investigación en la industrialización y mecanización para la optimización de los procesos, la investigación en la adición de materiales que aporten estabilización, tema que se aborda más adelante, y protección frente a la humedad, introducción de aligerantes que no comprometan la resistencia del material y las posibilidades de incorporación de residuos de diferentes industrias (cenizas volantes, escorias siderúrgicas, escombros de obras,…) (Bestraten *et al.,* 2011).

3.5.2.5 Caracterización de la tierra o suelo arcilloso

Caracterización de la tierra/arcilla

La posible aplicación o no de la tierra como material de construcción en el siglo 21 depende del conocimiento de las propiedades química, física y mecánicas del suelo (Manzano *et al.,* 2007).

Caracterización de los tipos de suelo/arcilla:

- Distribución granulométrica: Contenido de arcilla, de limo, arena y grava (Cristelo *et al.,* 2012; Guillaud, 2008). Se determina con respecto a los estándar ASTM C136 (2001) y ASTM D1140 (2000) (Marín *et al.,* 2011).

- Cohesión: Capacidad de las partículas a aglutinarse juntas y resistencia a flexión en la fracción gruesa. Por medio del test resistencia a compresión seca y el test de cohesión (Guillaud, 2008).

- Límites de Atterberg (Límite líquido y límite plástico) (Cristelo *et al.,* 2012). Límites de consistencia según ASTM D4318 (2000) (Marín *et al.,* 2011). Plasticidad que conlleva una mejor trabajabilidad y adecuado contenido de agua (Guillaud, 2008).

- Espectroscopia de impedancia (Impedance spectroscopy): para definir la configuración de la tierra modificada (Manzano *et al.,* 2007). Método experimental para medir las propiedades eléctricas de los materiales y sus interfaces (Pineda *et al.,* 2008). La medición de impedancia es un método no destructivo para caracterizar materiales en electroquímica, física y geofísica. Esta técnica se usa para hacer correlaciones entre parámetros eléctricos y permeabilidad, difusividad y porosidad. Se usa también este método para relacionar los parámetros eléctricos con resistencia mecánica y la reducción de absorción de agua, asociada a la porosidad capilar (Pineda *et al.,* 2008).

- Difracción de rayos X: permite determinar al grupo al que pertenece la arcilla que se está analizando (Manzano *et al.,* 2007; Manzano *et al.,* 2011) y el espaciado/distancia interplanaria, con lo que se puede deducir la susceptibilidad para absorber agua y para ser susceptibles de ser expansivas.

- Test de potencial Z: sirve para medir el tamaño de partícula de arcilla y su carga superficial y determinar la posibilidad de mezclar las partículas de arcilla con emulsiones que ayuden a estabilizar la tierra. (Manzano *et al.,* 2007; Manzano *et al.,* 2011).

- Espectro de Infrarrojos (IR): para conseguir evidencia cualitativa de la absorción de ciertos agregados como la amina o ácidos grasos en la superficie de las partículas de arcilla y de su permanencia después de repetidos lavados y de la radiación UV (Pineda *et al.,* 2007).

- Microscopía de Escaneo Electrónico (SEM): para determinar la morfología de la arcilla, el suelo o la arcilla arenosa.

Caracterización de los compuestos de base arcillosa

- Parámetros de compactación según los test Proctor: contenido óptimo de agua según norma BS 1377, 1990, q nos permite clasificar el suelo según la norma ASTM. D2487-11, 2011 (Cristelo *et al.,* 2012; Guillaud, 2008).

- Retracción: propiedad del suelo de cambiar de volumen en la presencia de agua (Guillaud, 2008).

- Estudio de susceptibilidad a la absorción y desorción de agua (Manzano et al., 2007). Absorción de agua según norma ASTM C67 (2003). Existen modelos físicos-matemáticos para establecer la capacidad de absorción de agua (Pineda *et al.,* 2007), que permiten determinar la concentración óptima de aditivos tenso-activos como para prevenir su uso.

- Estudios de porosidad, permeabilidad y capilaridad: que indican posibilidades de degradación por infiltración de lluvia de agua etc. (Guillaud, 2008).

- Resistencia a la erosión (Guillaud, 2008).

- Test de resistencia del adobe las condiciones climáticas y a la radiación UV.

- Test de resistencia mecánica: Test de resistencia a compresión. UNE-EN 196-1. ASTM C67-07 Testing brick and structural clay (ASTM, 2007) y módulo de ruptura a flexión, según estándar ASTM C67 (2003).

- Conductividad térmica: que mide el flujo de estado estable de calor, según ASTM C177 (1997) (Marín *et al.,* 2011).

3.5.3 Estabilización de un compuesto arcilloso

3.5.3.1 Estabilización de un compuesto arcilloso

La construcción contemporánea en tierra se puede englobar en tierra estabilizada y tierra sin estabilizar, prescribiéndose la tierra estabilizada como una solución adecuada para la crisis de vivienda urbana y la sostenibilidad medioambiental y siendo necesaria para cumplir con los estándares necesarios requeridos en el mercado (Zami, Lee, 2010).

Según Guillaud (2008), la tierra estabilizada implica la modificación de las propiedades del sistema tierra-agua-aire, habiéndose identificado alrededor de 130 diferentes agentes estabilizadores, incluyendo el cemento, la cal y el bitumen (Lal, 1995) y concluye que no existe ningún estabilizador ideal que se pueda aplicar indiscriminadamente. El uso de estabilizadores no es nuevo, se han utilizado por siglos diferentes tipos de aceites, jugos de plantas, estiércol de animal etc. (Hossain y Mol, 2011). El registro más antiguo de estabilización de tierra con paja o bloques de tierra data del 4600 a.C. en Grecia (Guillaud y Houben, 1994). Cronistas señalan como en el virreinato en Perú, se estabilizaba la tierra con cal y en algunos casos se impermeabilizaba con una película de jugo de cactus. Se constata la capacidad aglutinante e impermeabilizante del jugo de cactácea, en concreto del gigantón (echinopsis peruvieanus), cactus San Pedro (Barrionuevo, 2011). Aunque la estabilización de la tierra es bastante antigua, no fue hasta 1920 que se hizo una aproximación científica y todavía no se ha realizado un bagaje suficiente de investigación sobre el tema (Zami y Lee, 2010).

Existe diferencia sobre la concepción de la estabilización, donde se puede considerar que no sólo añadiendo estabilizadores se pueda conseguir una estabilización, por un lado, y por otro, que la estabilización debe ser permanente (Zami y Lee, 2010). La estabilización de la tierra consiste en cambiar las características del suelo como para mejorar sus características mecánicas y físicas. El objetivo de la estabilización es el de reducir la plasticidad, mejorar la trabajabilidad y la resistencia a

la erosión (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012). La tierra también se tiende a estabilizar para evitar las fracturas por retracción en el proceso de secado, disminuir la resistencia a erosión, y con ello, lograr mayor durabilidad (Reddy, 2007). La estabilización de suelos de baja capacidad portante puede ser un camino económico para reforzar el uso de la tierra en la edificación (Hossain y Mol, 2011). No existe mucha investigación sobre la rentabilidad de la tierra estabilizada (Zami y Lee, 2010).

Procedimientos de estabilización:

- Estabilización mecánica: compactación que provoca cambios de densidad, resistencia mecánica, compresibilidad, cohesión, permeabilidad y porosidad.

- Estabilización física: se actúa sobre la textura, mezclando diferentes tipos de fracciones de granulometría, corrigiendo la proporción de arcilla y arena. Tratamientos de secado, congelación, tratamiento eléctrico, tratamiento de electro-osmosis para mejora las cualidades de drenaje etc.

- Estabilización química: se añaden materiales o químicos para modificar las propiedades físico-químicas de la tierra, creando matrices con las que aglutinar y abrigar los granos. Una reacción físico-químico puede conllevar la formación de un nuevo material, como una puzolana resultante de la reacción entre la arcilla y la cal.

A través de la adición de fibra vegetal como refuerzo se puede conseguir estabilizar el suelo y lograr cualquier propuesta geométrica de manera más fácil y mejorar la durabilidad. La fibra vegetal, por adhesión o ayudando a aglutinar el suelo (Miraki *et al.,* 2007), previene la fractura del suelo resultante de la retracción. Las fracturas por retracción son debidos al rápido y no uniforme secado (Manzano et al., 2007). Aunque la fibra vegetal puede servir como estabilizador y ayuda en evitar las fracturas por retracción y aportar aislamiento térmico y reducir el peso (Minke, 2001), su uso puede afectar la resistencia a compresión (Binici et al., 2005), donde influye el tamaño del elemento constructivo y el ratio de las dosificaciones. En la mayoría de los casos es necesario la combinación de estabilizadores químicos (Ceniza volante, Cal, Cemento,…) con el refuerzo de la fibra, pues mientras los estabilizadores mejoran la

estabilidad del suelo, al mismo tiempo empeoran la ductilidad del compuesto, y la fibra, en este sentido ayuda a reducir la fragilidad del compuesto (Hejazi et al., 2012).

Una de las técnicas más extendidas consiste en la mezcla con aglutinantes cementicios como los basados en cemento o cal, que aglutinan las partículas de suelo juntas por medio de una reacción química. El cemento tiene una reacción principalmente hidráulica, necesita sólo agua para reaccionar y aumentar la resistencia, y la cal puzolánica, necesita agua y material puzolánico. El cemento es, por ejemplo, uno de los estabilizadores más ampliamente utilizados en BTC. El cemento reacciona químicamente con el agua y también con ciertas partículas finas de tierra (Lima *et al.,* 2012).

El ratio de uso del estabilizador depende del tipo de tierra que se esté usando, si hay mucha arcilla en el suelo, al menos se requiere un 6% de cemento. Si la tierra es muy arenosa, el ratio tiene que ser superior. Si la tierra tiene una buena composición, un 4% puede ser suficiente (Lima *et al.,* 2012).

Cemento mejor que cal en términos de mejora de resistencia mecánica, pero con la cal se llegan a resultados adecuados. Si la fracción de arcilla es importante, caso de los suelos usados para la construcción con tierra, la mejora química es muy efectiva debido a la reacción entre los componentes cálcicos de la cal con el suelo puzolánico. Es necesario como mínimo una fracción de 10% de arcilla en el suelo para que se pueda estabilizar con cal (Cristelo *et al.,* 2012)

La producción del cemento Portland es la mayor en volumen en la tierra siendo responsable del 5% de las emisiones de CO2 totales (Gartner y MacPhee, 2011). La tierra estabilizada con cemento puede causar contaminación aérea y que se necesitan más estudios con estabilizantes no basados en el cemento portland (Zami y Lee, 2010), pudiéndose analizar la estabilización con cal, yeso y residuos puzolánicos alumino-silicatos (Pacheco-Torgal y Jabali, 2012). La disminución de las emisiones de gases derivadas de la producción de cemento pueden agruparse en dos vertientes: 1) las orientadas a aumentar la eficiencia del proceso, y 2) las enfocadas a adición de

materiales activos no calcinados compatibles con el producto cementante, lo que disminuye el consumo de combustibles fósiles (Galván, 2008).

Los problemas que se tienen en la construcción con tierra por la absorción de agua pueden ser solventados estabilizando la tierra con pequeñas adiciones de cal, que mejora muchas de las propiedades del suelo y se produce un material de construcción mejorado (Mckinley *et al.,* 2001). El único inconveniente en el uso de la cal para estabilizar la tierra son los problemas de durabilidad, como han reportado algunos investigadores (Wild *et al.,* 1998). Se han reportado numerosos trabajos de como corregir la durabilidad de los suelos estabilizados con cal (Wild *et al.,* 1999; Okagbue y Yakubu, 2000; Sivapullaiah y Lakshmikantha, 2005; Yilmaz y Berrin, 2009).

El uso apropiado de la cal puede producir materiales eficientes para la construcción, con ahorros respecto al cemento por el diferencial en precio y rendimiento entre ambos productos. Existen beneficios del regreso al uso de cal en la industria de la construcción, entre otros: su producción requiere temperaturas inferiores a la del cemento y menos energía durante su calcinación, lo que implica menor emisión de gases de efecto invernadero; mínima contracción, lo que evita agrietamientos; los morteros de cal resisten algún grado de acomodamiento en la mampostería; deterioro causado por los álcalis contenidos en el cemento, lo cual no se presenta e en los morteros de cal; menor conductividad térmica; mayor impermeabilidad, y mejor adherencia para materiales de mampostería comparado con productos basados en cemento (Shi, 2001).

La cal está regulada por la Norma Mexicana NMX-C-003-ONNCCE-1996, que establece que la cal hidratada para la construcción se clasifica en cuanto a su composición química en tipo único y en un mismo grado de calidad, con un contenido mínimo de 80% en la suma de CaO + MgO en base no volátil, y un máximo de 5% de MgO. El territorio mexicano cuenta con una extensa área con bancos de calizas. México es el 6º productor mundial de cal con 6.5 millones de toneladas/año y el 76% de esta cal es usada en la industria de la construcción (Galván, 2008).

Se puede mejorar el producto incorporando hidraulicidad mediante la adición de puzolanas naturales a la cal: se acelera el proceso de carbonatado, y se adquiere una mayor resistencia a la compresión. Se han publicado estudios sobre la estabilización con cal, cemento y ceniza volante (fly ash), pero no existe tanta literatura sobre estudios alrededor de la estabilización de suelos arcillosos expansivos mediante yeso (Marín, 2011). Vroomen (2007) apunta las ventajas de la tierra estabilizada con yeso basado en la comparativa con el adobe y la construcción con concreto, concluyendo que el material llega a ser de bajo costo, con una durabilidad media y emisiones de CO2 nula, donde la energía requerida para la producción es baja.

Actualmente se da bastante uso de estabilizadores como bitumen, asfalto y resinas.

Estabilizadores con propiedades puzolanas pueden ligar partículas de suelo juntas y reducir la absorción de agua por parte de las partículas de arcilla (Hossain y Mol, 2011). La adición de materiales puzolánicos y polímeros puede mejorar las propiedades de los compósitos, como el caso de uso exitoso de ceniza volante, escoria, humo de sílice, metacaolín (Toledo *et al.,* 2003). El uso de polímeros (látex p. ej.) también puede mejorar las propiedades físico-mecánicas de la pasta cementicia (Stancato *et al.,* 2005).

Autores proponen la mezcla con componentes sintéticos (Manzano *et al.,* 2007) o surfactantes químicos (Pineda *et al.,* 2007) para reducir la absorción de agua y para aumentar la resistencia a compresión. Para reducir la absorción de agua se pueden agregar cualquier elemento catiónico o componente orgánico con fuertes enlaces eléctricos dentro de la formulación de la arcilla. El añadido de emulsiones asfálticas mejora la resistencia a compresión y rebaja la absorción de agua y además esta sustancia no se degrada con rayos UV (Pineda *et al.,* 2007). El agregado de emulsiones busca provocar un efecto de dispersión de la arcilla con el propósito de que al consolidarse los bloques de arcilla, pudiera existir un mejor acomodo de éstas, en consecuencia la propiedad mecánica de resistencia a compresión se incremente, y la absorción disminuya (Manzano *et al,* 2011).

Ventajas de la estabilización en la construcción con tierra (Zami y Lee, 2010):

- Mejora de problemas habituales de la tierra ante la humedad y la lluvia. Mejora de los problemas con respecto a la erosión por lluvia.

- Mayor durabilidad

- Menor necesidad de mantenimiento.

- Mayor resistencia a compresión, a la abrasión y mejor comportamiento mecánico.

- Mayor posibilidad de estandarización del material.

- Abre el campo de posibilidad de no sólo ser construcción in situ, si no de trabajar con materiales y elementos constructivos prefabricados e industrializados.

Se ha demostrado que un compósito estabilizado con cal reduce en un 30% la conductividad térmica y la difusividad térmica en un 20% (Liuzzi *et al.,* 2013).

- La construcción contemporánea con tierra estabilizada sigue siendo sostenible ambientalmente en comparación con los materiales convencionales como los ladrillos, tabiques, concreto etc.

- Reducción de fracturas por retracción.

- Mejora de los poderes aglutinantes de la matriz.

3.5.3.2 Estabilización de compuestos arcillosos a partir de materiales puzolánicos

Diferentes normas internacionales (ASTM 618-78, EN 197) definen las puzolanas como “materiales silíceos o silico-aluminosos que por sí mismos poseen poca o ninguna actividad hidráulica, pero que finamente divididos y en presencia de agua pueden reaccionar con hidróxido de calcio (Ca(OH))2 a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

Clasificación según características genéticas (Massazza, 1998): Puzolanas naturales (Rocas Piroclásticas, Materiales de origen mixto y Rocas clásticas) y puzolanas artificiales (Cenizas volantes, Cenizas de residuos vegetales, Esquistos arcillosos calcinados, Sílice activa, Materiales activados térmicamente, Escorias de altos hornos ácidas, Arcillas calcinadas).

Las puzolanas naturales son todas aquellas que no necesitan procesos de transformación para su activación. La puzolanas naturales calcinadas o artificiales comprenden a los materiales que necesitan modificaciones químicas y mineralógicas para exhibir su actividad puzolánica, por ejemplo los residuos agroindustriales (Villar Cociña *et al.,* 2011).

Actividad puzolánica: Posibilidad de una puzolana de reaccionar con la el hidróxido de calcio para formar compuestos hidráulicos. Esto depende de varios factores, principalmente de sus propiedades puzolánicas. Es importante evaluar velocidad y tiempo de esta reacción. Esto determina su posible empleo. Las puzolanas reaccionan con el hidróxido de calcio (Ca(OH)2), dando lugar a productos hidratados, silicatos y aluminatos cálcicos (Villar Cociña *et al.,* 2011).

Factores de mayor incidencia en actividad puzolánica: Tamaño de partícula o finura, morfología de la superficie de la partícula, naturaleza amorfa, contenido de sílice y alumina reactiva, pH de la solución y composición química (Taylor, 1997; Larby y Bijen, 1990; Malhotra y Dave, 1999).

El problema teórico fundamental es calcular la velocidad de la acción o actividad puzolánica, esto se puede hacer por medio del análisis de la cinética de reacciones en estado sólido y sus parámetros, lo que supone campo de investigación por cubrir (Villar Cociña *et al.,* 2011).

Caracterización de las puzolanas:

- Microscopia de escaneo electrónico (SEM): para determinar la morfología y microestructura (Cristelo *et al.,* 2012).

- Difracción de rayos X (XRD): para determinar la composición mineralógica (Marín *et al.,* 2011)

- Espectroscopia de dispersión energética (EDS): para determinar la composición química (Cristelo *et al.,* 2012).

- Fluorescencias de rayos X mediante espectrómetro: para determinar la composición química, con lo que se puede clasificar según la ASTM que clase de ceniza o puzolana es (Marín *et al.,* 2011):

- Masa específica (Lima *et al.,* 2012).

- Densidad de masa unitaria (Lima *et al.,* 2012).

- Máxima dimensión de grano (Lima *et al.,* 2012).

- Módulo de finura (Lima *et al.,* 2012).

Métodos y evaluación de la actividad puzolánica, evaluación y caracterización de la actividad puzolánica: se contemplan puntos de vista químicos, físicos y mecánicos, y se establecen evaluaciones cualitativas y cuantitativas. Todos los métodos se basan en la reacción del material puzolánico en sistemas puzolana-cal y puzolana-cemento. Existe disparidad de criterios acerca de cómo evaluar las propiedades puzolánicas, y discrepancia con origen en el mecanismo y en la cinética de las reacciones puzolánicas que son muy complejas y no estudiados con la profundidad requerida. Es por esto que se desconocen las características esenciales del proceso de reacción. El estudio cinético de las estas reacciones contribuirá a un mejor entendimiento del problema y mejor evaluación de las puzolanas. Las constantes de velocidad de reacción dan un índice muy exacto acerca de la reactividad de los materiales. La evaluación cinética de la actividad puzolánica abre un futuro muy prometedor desde el punto de vista científico (Villar Cociña *et al.,* 2011).

Los métodos pueden ser clasificados como métodos directos e indirectos (Moreau y Gliland, 1950). Los directos monitorean indirectamente la cal no reaccionada

durante la reacción puzolánica con el tiempo de reacción, como es el caso del método conductimétrico (Greenberg, 1961). Otros métodos indirectos se basan en el comportamiento de la resistencia a la compresión a medida que ocurre la reacción (Malhorta, 1999). Los métodos directos se basan en la medida de la cantidad de Hidróxido de Calcio (HC) que ha reaccionado con la puzolana. Se usan técnicas como Termogravimetría (TG), análisis térmico diferencial (ATD), difracción de rayos X (DRX) y análisis calorímetro. Los resultados obtenidos por estas técnicas suministran información del potencial puzolánico del material y pueden ser usados para estudiar la cinética de la reacción HC-puzolana.

- Determinación de la velocidad de consumo de Ca(OH)2 como medida del progreso de la reacción.

- Establecimiento de posibles avances de la reacción puzolánica a partir de la evaluación de la estructura de poros en las pastas.

- Identificación y evolución de las fases hidratadas con el tiempo de reacción.

Caracterización de mezclas con puzolanas:

- Microscopia de escaneo electrónico (SEM): para determinar la morfología y la microestructura creada (Cristelo et al., 2012). También sirve para entender la hidratación del cemento y el aglutinamiento del aglutinante con los componentes del material (Lima *et al.,* 2012)

- Espectroscopia de dispersión energética (EDS): para determinar la composición química (Cristelo *et al.,* 2012).

- Microscopía óptica (OM): permite distinguir los minerales que componen el material mediante la información que provee debido al color (Lima *et al.,* 2012)

- Análisis de dispersión de energía por rayos X (EDX): para determinar la microestructura característica y obtener el análisis elemental semicuantitativo de los cristales en diferentes zonas de la aplicación (Marín *et al.,* 2011)

- Test de resistencia a compresión sin confinar (UCS test): para comprobar la efectividad de las mezclas después de un tiempo (Cristelo *et al.,* 2012). Resistencia a compresión según NBR 8491 (Lima *et al.,* 2012) y módulo de ruptura, Test a flexión, según estándar ASTM C67 (2003).

- Resistencia a compresión diagonal y axial después de 28 días. NTE E0.80, RILEM TC76-LUMB1, RILEM TC76-LUMB6. (Lima *et al.,* 2012)

- Test de absorción de agua a 14 días NBR 8492 (Lima *et al.,* 2012).

3.5.3.3 Puzolanas cenizas a partir de residuos agro-industriales

Se ha estudiado el potencial del uso de residuos industriales para la estabilización de suelos con resultados bastante prometedores como escoria de altos hornos, ceniza volante (CV), ceniza de cáscara de arroz, arena de fundición, escoria de fundición, polvo de horno de manufacturación de cemento etc. El uso de polvo de hornos de manufacturación de cemento puede ser una económica oportunidad de disposición de estos materiales con su apoyo al medioambiente.

Se ha estudiado la combinación de CV con cal y cemento portland. El uso de estos materiales puede ayudar a la reducción de los residuos, del uso de cemento, lo que representa un ahorro de energía, de costos y emisiones de gases de efecto invernadero. Se dan buenos resultados en resistencia a compresión y a tensión, módulo de elasticidad, así como en términos de resistencia al agua, absorción de agua y retracción (Hossain y Mol, 2011). Autores proponen la sustitución del cemento por materiales como la ceniza volante, ceniza de la cáscara de arroz o residuos de minas de carbón en mezclas con otros químicos (Karade, 2010; Mathur, 2005). Investigaciones previas plantean la estabilización por medio de la aplicación geopolímeros (activación alcalina) que puede ser con puzolanas como las cenizas volantes (Cristelo *et al.,* 2011; Cristelo *et al.,* 2012).

Se han llegado a estudiar la influencia de superplasticidad del concreto y la reacción entre Na2O y la ceniza según diferentes ratios usados. Según estudios se

concluye que la aplicación de la activación alcalina de la ceniza volante para la estabilización del suelo, y particularmente su aplicación donde hay compactación, no se da fácilmente. La técnica de activación alcalina tiene complicaciones adicionales cuando es usada con suelos, desde que el suelo trae una adicional configuración de relaciones intrínsecas y compromisos delicados. En esto influencia el máximo tamaño de partícula, que debería ser minimizado antes de hacer la mezcla con la ceniza, aunque faltan estudios sobre esto. El uso de estos aditivos no está justificado por cuestiones de tiempo, problemas que da y costo. Sólo si la cuestión del tiempo es importante el uso de calcio hidratado puede ser una solución para incrementar los niveles de resistencia más rápidamente, aunque se comprometa la resistencia máxima a alcanzar. Se tiene que mejorar la concentración sólido: líquido, para ver que concentración alcalina se usa. El ratio Na2O: ceniza es decisivo, que debería ser minimizado para obtener mayores valores de resistencia. Se puede mezclar la ceniza volante y el suelo mediante polvoreado y vibrado, evitando la energía de compactación empleada en el caso de muros de tierra comprimida (Cristelo *et al.,* 2012).

Puzolanas cenizas a partir de residuos agrícolas

Se puede considerar factible técnicamente la aplicación del uso de residuos agrícolas en la producción de componentes de tierra, para evitar el uso de materiales cerámicos a partir de combustión, evitando contaminación ambiental con ello. Usando residuos como reemplazo a los materiales convencionales se ofrece una contribución ambiental sustancial (Lima *et al.,* 2012). La acumulación de residuos agrícolas no gestionados, especialmente en los países en desarrollo ha incrementado la preocupación ambiental. Reciclar diferentes tipos de residuos en materiales de construcción es una solución viable para solucionar los problemas de contaminación y de conservación de los recursos naturales para la generaciones futura (Madurwar *et al.,* 2013).

Es muy importante el estudio y desarrollo de cualquier tecnología, procedimiento o método que puede ayudar reutilizarlos de manera eficiente (Villar-Cociña *et al.,* 2008).

Con la calcinación de materiales orgánicos se da una descomposición térmica y se produce una ceniza en un tamaño de partícula fina que mezclado con cal se obtiene un material con propiedades aglutinantes (Biricik *et al.,* 1999).

En los últimos años, el uso de los residuos sólidos procedentes de la agricultura como puzolanas en la fabricación de morteros y hormigón mezclado ha sido el foco de nuevo investigación (Ordóñez *et al.,* 2002; Al-Akhras *et al.,* 2002; Cook y Suwanvitaya; Ramaswamy *et al.,* 1983; Chandrasekhar *et al.,* 2006). De hecho, la adición al hormigón de las cenizas procedentes de la combustión de residuos sólidos agrícolas es, en la actualidad, una práctica frecuente debido a la actividad puzolánica de las cenizas hacia la cal (Villar-Cociña, *et al.,* 2008). El comportamiento y durabilidad, en general, del concreto es mejorado con la adición de residuos agrícolas calcinados (Madurwar *et al.,* 2013). Se han probado diferentes residuos agrícolas (Ramaswamy *et al.,* 1983; Villar-Cociña *et al.,* 2008; Ganesan *et al.,* 2007): ceniza de cáscara de arroz, médula de coco, aserrín, gránulos de corcho, ceniza de paja de trigo, ceniza de bagazo de caña, ceniza de paja de caña de azúcar, etc.

Las plantas obtienen minerales y silicatos del suelo en su proceso de crecimiento. Materiales inorgánicos, en especial silicatos, son encontrados en grandes proporciones en plantas de crecimiento anual como el arroz, el trigo, el girasol, etc. (Biricik *et al.,* 1999).

Las condiciones de activación (temperatura y tiempo de retención en horno) son fundamentales en la actividad puzolánica del producto obtenido (Boateng y Skeete, 1990; Khangaonkar *at al.,* 1992; Frías *et al.,* 2007; Frías y Villar-Cociña, 2007; Payá, 2001; Sánchez de Rojas *et al.,* 1999; Wang *et al.,* 2001; Martirena *et al.,* 1998; Payá *et al.,* 1995). El parámetro común para determinar si se usa un material residuo agrícola como material puzolánico depende de contenido de silicio.

Fairbairn et al., 2010, desarrolló un estudio del potencial reducción de emisiones de CO2 según la metodología desarrollada por United Nations Framework Convention on CLimate Change (UNFCCC) y dieron resultados de que con la ceniza de bagazo de

caña de azúcar mezclada con cemento se reduce las emisiones de CO2 y generalmente mejora el comportamiento de los materiales cementicios.

Productos o compósitos para la construcción con uso de residuos agrícolas son más baratos, tienen conductividad térmica más bajo y son más durables, más ligeros y medioambientalmente más amigables que los materiales convencionales (Madurwar *et al.,* 2013).

- Ceniza de bagazo de caña de azúcar (BA): se puede usar como reemplazo del cemento en el concreto. BA como añadido mineral efectivo y puzolana con un ratio de 20% de cemento hasta el 50% (Amin, 2011). 20% de sustitución de cemento con BA como óptimo. BA fue estudiado por (Ganesan *et al.,* 2007; Chusilp et al., 2009; Rukzon y Chindaprasirt, 2012; Akram *et al.,* 2009). Incorporaciones por encima del 30% no sólo mejora la resistencia a la penetración de clorhoridos si no también la resistencia a compresión (Madurwar *et al.,* 2013)

- Ceniza de cascarilla de arroz (RHA): se usa como reemplazo de cemento que aumenta las propiedades mecánicas del concreto. (Ramasamy y Biswas, 2008; Xu *et al.,* 2012; Tashima *et al.,* 2004) y reduce la absorción de agua del concreto (Tashima *et al.,* 2004). Nair *et al.,* 2006 examinó la resistencia a largo plazo y concluyó con la sugerencia de que es un material asequible para vivienda rural en la India. Memon *et al.,* 2011 investigó el RHA como agente modificador de la viscosidad en concreto y vio lo apropiado de su uso en concreto de bajo coste.

- Cenizas de residuos de bambú (BLAash): estudios sobre las propiedades puzolánicas de estos desechos industriales son muy escasos. Línea muy novedosa a nivel mundial. Villar-Cociña *et al.,* 2008, han iniciado pioneros estudios sobre el comportamiento puzolánico de las cenizas de bambú, mostrando los primeros parámetros cinéticos. Se estudia la cinética de reacción puzolánica entre el hidróxido de calcio (CH) y cenizas de hojas de bambú, calcinadas a 600 º C (BLAsh) y se aplica un método de actividad puzolánica (método de conductividad) basado en la medición de la conductividad eléctrica de la solución BLAsh/CH. Se cuantifica como procede la

reacción y este último sobre los parámetros cinéticos mediante la aplicación de un modelo matemático cinético-difusivo, permitiendo el cálculo de los parámetros cinéticos de la reacción puzolánica, lo que permite cuantificar la actividad puzolánica de los materiales. Los resultados muestran las buenas propiedades puzolánicas de las cenizas de hojas de bambú calcinado a 600ºC. La correlación entre los valores de energía libre de activación y las constantes de velocidad de reacción se encuentran en correspondencia con los estudios teóricos sobre los valores de procesos reportada en la literatura (Villar-Cociña *et al.,* 2008).

3.5.3.4 Puzolanas como ceniza a partir de la calcinación de paja de cereal

Paja de cereal, residuo subproducto agrícola

A nivel mundial existe una alta producción de cultivos herbáceos cereales, sobre todo de trigo, cebada y maíz, con la paja como el subproducto más conocido y utilizado (Bowyer, y Stockmann, 2001). Actualmente estos residuos son incinerados o depositados en el campo y esto puede ocasionar varios problemas ambientales como la contaminación del aire, la emisión de gases con efecto invernadero y la ocupación de terreno fértil (Karade, 2010). Además, la biodegradación de los residuos lignocelulósicos en los vertederos emite metano, un gas efecto invernadero 72 veces más perjudicial que el CO2 y a veces el compostaje y la quema de estos residuos no es posible por legislación (Leliveld y Crutzen, 1992).

La paja, que es el tallo y material fibroso de la planta de cereal (Minke y Mahlke, 2005), es un material lignocelulósico generado en grandes cantidades como residuo de los cultivos de cereal. Después de la recolección del grano, una gran cantidad de paja queda disponible como residuo (Karade, 2010). Se ha reportado que la paja de cereal tiene una microestructura más complicada que la madera, con una gran variedad de tamaño y tipo. Según estudios la paja de cereal puede contener un 45% de celulosa, un 28% de hemicelulosa un 18% de lignina y entre un 8 y 10% de cenizas (Halvarsson *et al.* 2004).

La paja ha sido utilizada desde la antigüedad en la construcción, en cubiertas, como material fibroso refuerzo en el adobe, en muros continuos de tierra para alivianarlos, etc. Hoy día se puede llegar a nuevas formas de uso de estas fibras, de manera estandarizada, de fácil puesta en obra, que gracias a una nueva homogeneización pueda posicionarse en el exigente sector de la edificación, sin ignorar los estándares de durabilidad y confort de la vivienda construida, donde el uso de residuos agro-industriales puede tener una contribución vital (Mathur, 2005).

Durante las dos últimas décadas se han publicado varios informes sobre el uso de residuos lignocelulósicos, incluido la paja de cereal, en la producción de compósitos de matriz inorgánica como el cemento portland, yeso o magnesita (Karade, 2010). La paja de cereal tiene características geométricas y mecánicas adecuadas como para hacer paneles con matrices cementicias, pero con problemas con la hidratación del cemento, teniendo en cualquier caso los requerimientos mecánicos, físicos y de durabilidad mínimos como para ser utilizado (Soroushian *et al.,* 2004). El añadido de paja a un compósito ayuda a disminuir la factura por retracción y el tiempo de curado, y mejora la resistencia a compresión dentro de un ratio adecuado de dosificación, además de mejorar el comportamiento mecánico del compósito (Li, 2005), mejorando la resistencia a cortante, la resistencia a flexión y la ductilidad (Bouhicha *et al.,* 2005). Las fibras son embebidas en la matriz y absorben el esfuerzo a cortante a modo de resistencia a tracción (Jamshidi et al., 2010; Ghiassian *et al.,* 2008; Abtahi *et al.,* 2008).

Ceniza de paja de cereal como material puzolánico

Ya se ha estudiado la producción de material puzolánico a partir de cenizas de paja de cereal (Biricik *et al.,* 1999). La calidad del material depende del tiempo de calcinación, de la temperatura de calcinación, tiempo de enfriamiento y las condiciones de molienda.

Para la calcinación de la paja Biricik et al., 1999 probaron con calcinación a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación, 300, 400, 500, 700, 800, 900 y 1000ºC y tiempos de 1, 2, 3, 4, 5, 8, 24 y 30 horas. Para determinar el contenido de

SiO2 y ceniza, se quema la paja a 575º +-25 en hornos eléctricos. Cuando la temperatura de calcinación es de 800ºC parte de la estructura amorfa se convierte en estructura cristalina. La adecuada temperatura de quema fue determinada entre 570 y 670 ºC por 5 horas. En estas condiciones el color gris y blanco indica una quema completa.

Biricik et al., 1999 llegaron a que la paja de trigo tiene 8,6% de ceniza y el contenido de sílice de la ceniza es del 73%, que la paja quemada a 570 y 670 ºC tiene propiedades puzolánicas y que las propiedades puzolánicas de la ceniza quemada a 670 es mayor. Finalmente concluyen con que la ceniza obtenida de la paja de trigo puede ser usada como material puzolánico.

Bensted y Munn (Bensted y Munn, 2000) amplían el estudio de Biricik et al., confirmando que la ceniza de la paja de cereal (CPC) es rica en contenido silicio y demuestra puzolanidad, confirmando que parece tener similitudes con el RHA en su comportamiento puzolánico. Añaden como el proceso de calcinación para la CPC es crítico. El proceso de calcinación debería de ser el óptimo como para maximizar el reparto aleatorio de grupos de SiO4, AlO4 y FeO4 dentro de la estructura desordenada de la ceniza y minimizando el contenido en minerales y estructuras cristalinas.

Bensted y Munn (Bensted y Munn, 2000) hace una comparativa de la CPC con la escoria de altos hornos. Con varios activadores como el cemento portland, la cal, el sulfato de calcio la escoria puede montar compuestos cementicios, resultando un cemento hidratado que gana resistencia a compresión adecuada a los 28 días, además de tener baja permeabilidad. En el caso de puzolanas como el metacaolín, ceniza de combustible pulverizado, cáscara de cacahuate calcinada o CPC es la presencia de álcalis lo que imparte propiedades cementicias a la puzolana. Mejoran la resistencia a los 28 días, bajan la permeabilidad, la temperatura de fraguado y por lo tanto el agrietado por temperatura y mejora la durabilidad en estructuras de concreto.

El hidróxido alcalino NaOH y el KOH, más que el hidróxido de calcio, insta al comienzo de la actividad puzolánica. El contenido alcalino del CPC es alto, con altos

contenidos de K 5,85% y de 1,83% de Na según (Biricik *et al.,* 1999). Para considerar la CPC como un sustituto del cemento en un futuro es importante que el contenido de álcalis no sea fácilmente movible y por lo tanto no sujeto a ser una solución que se pierda con el tiempo. Los álcalis de la CPC deberían ser en su mayoría atrapados y por lo tanto no propensos a ser rápidamente separados mineralógicamente. En este caso sí se puede convertir en un buen sustituto del cemento, y sería la manera de emplear y convertir en producto lo que actualmente es un residuo.

Se necesitan más estudios para terminar de satisfacer los puntos antes enunciados.

Otro estudio destaca como la CPC bien quemada y bien molida puede ser una puzolánica muy activa en condiciones de curado adecuadas (Al-Akhras y Abu-Alfoul, 2002). En esta investigación se estudia el aporte de las CPC en morteros autoclavados, donde la reacción puzolánica guía la formación de silicato de calcio hidratado que es la responsable de la resistencia del concreto. Se produce CPC a 650ºC calcinado por 20 horas con una gravedad específica de 1.97. Se utilizaron 3.6%, 7.3% y 10.9% de CPC reemplazando en peso a la arena. Se obtuvieron como resultados que el uso de CPC incrementa la resistencia mecánica del mortero bajo condiciones de curado de autoclavado. El reemplazo de 7.3% lleva a productos más hidratados (Silicato de Calcio Hidratado) (Al-Akhras y Abu-Alfoul, 2002).

3.5.4 Refuerzo fibroso del compuesto arcilloso. Fibras Vegetales. Paja de cereal

3.5.4.1 Refuerzo fibroso

Las fibras son estructuras unidimensionales sólidas y flexibles con una longitud normalmente muy superior a su diámetro. Las fibras pueden dividirse en dos grupos: fibras naturales (Vegetales, animales, minerales) y fibras artificiales (Celulósicas y no celulósicas) (Cobreros, 2009).

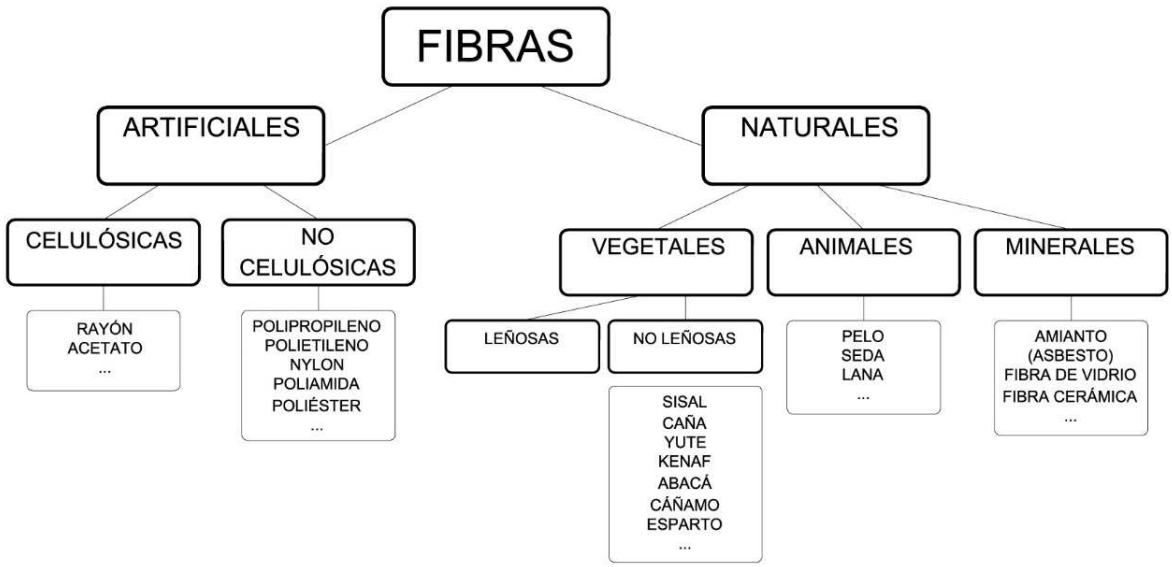


Fig. 3.5.4.1.1. Esquema de fibras artificiales y naturales.

Dentro de las fibras naturales nos encontramos también con las “fibras animales” que incluyen pelo, lana, seda, etc., pero estas son menos recomendadas para usos industriales sino están perfectamente limpias, ya que los contaminantes, tales como la grasa, debilitan la adherencia entre la fibra y la matriz (Stulz y Mukerji, 1993).

3.5.4.2 Refuerzo fibroso por medio de fibras vegetales

Hay que incentivar el manejo de los residuos o materiales renovables para poder alcanzar una tasa de reciclabilidad alta y así una cantidad máxima utilizable del capital natural de que disponemos (Cuchí, 2009). La industria de la construcción apenas presta atención a productos o materiales de construcción naturales y renovables, salvo en la promoción del uso de madera certificada como sostenible. (Cobreros, 2009).

Las fibras vegetales son estructuras compuestas básicamente por Lignina y Celulosa, sólidas, flexibles, largas y muy delgadas. Las ligninas son los componentes que impermeabilizan y proporcionan dureza y resistencia a las paredes de muchas células vegetales. La celulosa es el principal compuesto de la pared celular de las plantas y una de las moléculas biológicas más abundantes del planeta, es elemento

esencial en la estructura fibrosa y aporta resistencia a tracción y flexibilidad. Las paredes de las células jóvenes de las plantas son exclusivamente de celulosa, y a medida que envejecen, van acumulándose otras sustancias como la propia lignina (Cobreros, 2009).

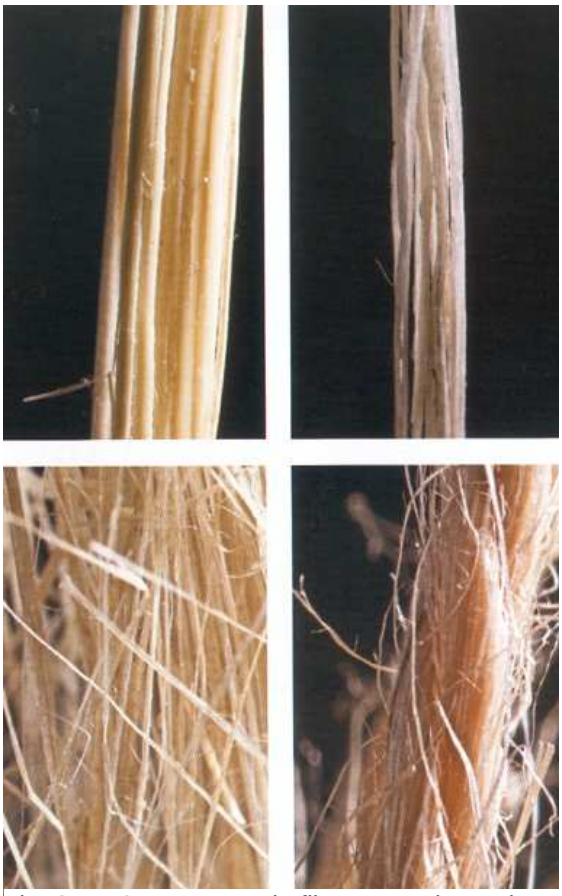


Fig. 3.5.4.2.1. Imagen de fibra vegetal tratada

Dentro de la clasificación de fibras vegetales tenemos las fibras vegetales leñosas y las fibras vegetales no leñosas que, además de su procedencia, se diferencian básicamente en la proporción contenida de Lignina y Celulosa. La característica principal de muchas plantas que nos proporcionan fibras no leñosas, es que se han adaptado a lugares geográficos y climáticos donde la flexibilidad es necesaria, y donde un tallo rígido ofrecería demasiada resistencia rompiéndose con facilidad. Estas plantas suelen crecer muy rápidamente y desarrollan tallos y hojas largos y resistentes (Monserrat, 2009).

Las fibras vegetales también pueden dividirse en tres grupos según la parte de la planta de donde proceden (Reyes, 2009): fibras procedentes del tallo o tronco (Paja de Cereales, Caña, Lino, Cáñamo, Yute…), fibras de las hojas (Sisal, Henequen, Abacá,…) y fibras procedentes de la Semilla (estopa de coco, Cáscara de arroz…).

Los aspectos comunes de estos materiales vegetales (a base de celulosa y lignina) son su renovabilidad, su baja resistencia a compresión y al impacto, y su poca durabilidad. Las fibras solas generalmente son demasiado débiles para soportar su propio peso, pero en grandes cantidades, cuando son torcidas, entrelazadas, empaquetadas o comprimidas, pueden ser empleadas para diversas aplicaciones

estructurales y no estructurales en la construcción (Stulz y Mukerji, 1993). Un reducido número de especies nos proporcionan fibras útiles para crear muchos objetos de usos diferenciados con una diversidad de formas todavía mayor. Nuestros antepasados aprovecharon las adaptaciones naturales experimentadas por algunas plantas que tenían cerca y, a través de cientos de generaciones, nos han legado los conocimientos necesarios para manipularlas (Monserrat, 2009).

Hoy día existe una tecnología basada en la eficiencia y en el aprovechamiento de los recursos naturales más próximos, que sigue siendo importante a pesar de la competencia de las fibras sintéticas (Martí, 2009).

Ventajas generales en el uso de fibras vegetales en la construcción: Según la FAO, en el 2004, es un recurso renovable, con poco consumo de energía para su elaboración, obtención y producción. Generalmente son materiales abundantes disponibles localmente, baratos (o incluso sin costo) (Stulz y Mukerji, 1993). Puede obtenerse mediante inversiones de bajo presupuesto, aunque la utilización de maquinaria agrícola hace aumentar los costos de producción y el consumo de combustible (Cobreros, 2009). Según la FAO en el 2004, tienen una menor generación de residuos (contaminación del aire, de las aguas y producción residuos sólidos) que los productos sintéticos industrializados. Aunque se pueden admitir una contaminación relativamente alta de las aguas en la manufacturación de algunas fibras vegetales, esta es en parte producida por compuestos biodegradables. Además de biodegradables, son reciclables, dependiendo el tipo de matriz en las que se incorporen, permiten por ello el cierre de los ciclos materiales y el método de obtención se puede considerar saludable y ecológico, teniendo una buena resistencia específica, especialmente en solicitaciones a flexión, proporcionando buenas propiedades térmicas, acústicas y aislantes en sus diferentes aplicaciones (Cobreros, 2009).

Desventajas (Cobreros, 2009): Poca durabilidad. Vulnerabilidad a los agentes biológicos (atracción y anidamiento de insectos, roedores, aves, y desarrollo de hongos y descomposición). Tienen un alto grado de absorción, que produce importantes variaciones de peso y volumen, acelerando el deterioro, afectando a la durabilidad, y

creando condiciones de insalubridad. Baja resistencia a la acción del viento, al impacto y a la acción del fuego. No existe una homogeneidad constatable en sus propiedades, que dependen de factores como el clima o el método de obtención. En principio el costo de obtención y producción es casi nulo, dependiendo de la producción y de las políticas económicas, y esto puede afectar a la continuidad de suministros. Baja aceptabilidad debido a la idea generalizada de que estos materiales son inferiores, empleados sólo para viviendas de pobres.

Existen referencias científicas sobre el uso de fibras vegetales para fabricar elementos de construcción desde principios del siglo XX, pero es a partir de la década de los 60 donde se aprecia un aumento en el estudio del uso de fibras vegetales para la construcción. A nivel mundial existe un mayor interés en regiones como Norteamérica, donde se puede apreciar en los últimos años un incremento en la industria de compuesto hechos con pajas de cereales, o Brasil, que es sin duda el país con mayores experiencias en el uso de fibras vegetales en la construcción, aunque existe interés científico a lo largo y ancho del planeta. En Europa, en ciertos países como Suecia, Alemania, Austria principalmente, pero también En Europa, la escasez de fibras de madera y el incremento de su precio, así como la búsqueda de un sustituto para el amianto y otros materiales sintéticos, como material fibroso aplicado en materiales de construcción, ha dado lugar a diversos estudios e investigaciones al respecto (Bowyer y Stockmann, 1998). Existen innumerables publicaciones sobre el tema que han aparecido de forma constante en “Cement and Concrete Composites”, Cement and Concrete Research” y “Construction and Building Materials” (Reyes, 2009)

Los sistemas de producción de fibra han demostrado la capacidad para cubrir las demandas a nivel global. Sin embargo existen problemas de producción y abastecimiento a niveles locales/regionales, con la gestión de recursos convencional, que pueden provocar una situación crítica en un futuro inmediato y a largo plazo. Dentro de las posibilidades de obtención de fibras mediante explotaciones agrarias tenemos explotaciones/sistemas de cultivos leñosos y la alternativa, objeto de estudio, como son los cultivos agrícolas herbáceos extensivos e industriales que cuentan con una importante producción (Youngguist, 1996).

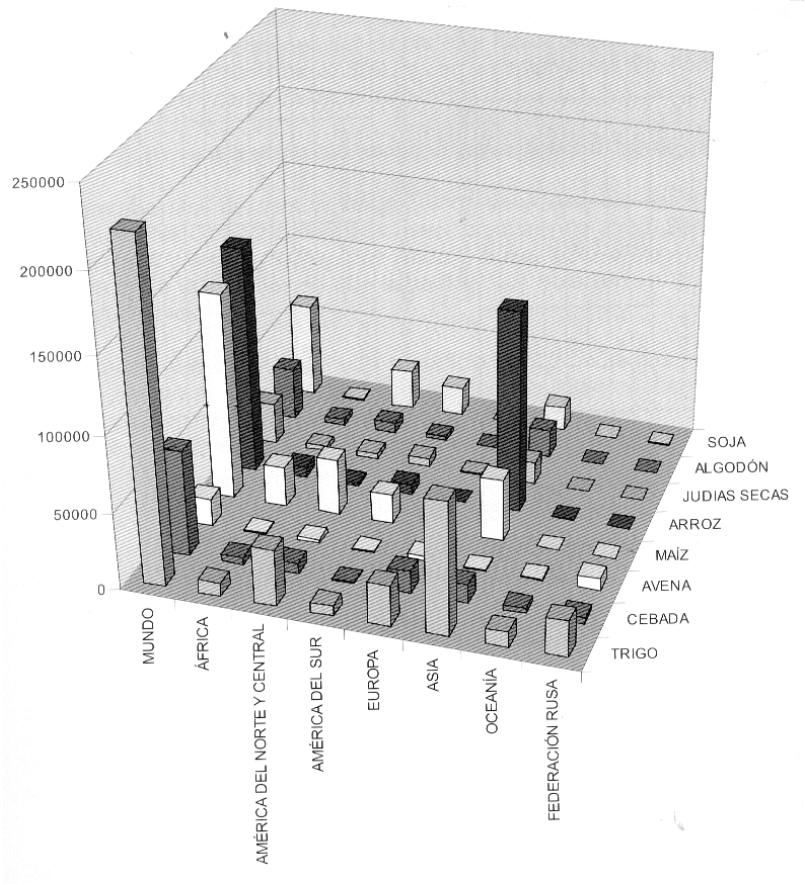


Fig. 3.5.4.2.2. Superficies de los cultivos herbáceos más cultivados a nivel mundial. En miles de hectáreas (Youngguist, 1996).

Para un buen desarrollo comercial de las fibras vegetales, debe haber una fuente de recursos garantizada a largo plazo. Para asegurar una fuente continua de fibra vegetal, la producción agrícola debe estar bajo un sistema dinámico de gestión de la tierra cuya meta sea una agricultura sostenible y la promoción de ecosistemas sanos (Rowell *et al.* 1997). El desafío es cómo equilibrar toda la demanda de fibra y las necesidades ecológicas de la tierra simultáneamente. Muchos países, entre ellos

muchos en vías de desarrollo, no tienen reservas adecuadas de bosque para cubrir sus necesidades básicas de leña, de madera industrial, de madera aserrada, de componentes a base de madera del edificio etc. Sin embargo, muchos de estos países disponen de grandes abastecimientos de materiales lignocelulósicos disponibles como productos o subproductos agrícolas en cosechas anuales (Youngguist, 1996). Técnicamente hablando, casi cualquier fibra agrícola se puede utilizar en construcción. Sin embargo, llega a ser más difícil utilizar ciertas clases de fibras cuando se imponen las restricciones en calidad y economía (Rowell *et al.* 1997).

Fibras vegetales como material de construcción. Productos y subproductos agrícolas

La idea de usar fibras vegetales procedentes de la biomasa para producir materiales útiles para el hombre es bastante antigua (Díaz, 2004). El uso de productos o subproductos agrícolas como materia prima industrial tampoco es nuevo y ha tenido una variedad de propósitos. El interés en usar subproductos de la cosecha agrícola para hacer elementos constructivos data de 1900s. Se han dado un buen número de investigaciones a mediados de los años setenta y existe un esfuerzo centrado en este tema en los últimos años (Bowyer y Stockmann,).

Actualmente, solamente una cantidad determinada de fibra puede ser extraída de los bosques sin el agotamiento de los suelos. Hasta que nuestros bosques se hayan recuperado necesitamos desarrollar otros medios alternativos de suministrar fibra (Brown, 2009). En torno al 50% de los bosques naturales de todo el mundo está disponible en periodo de cosecha, con cerca de un 10% de crecimiento anual. La Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO), prevé un 26 por ciento de aumento en demanda industrial de la madera, y 15 el por ciento de aumento en el consumo de leña para el período 1996 a 2010 (Bowyer y Stockmann,). Nunca antes ha habido tanta demanda sobre el sistema de recursos de fibra a nivel mundial. El crecimiento económico y el desarrollo en todo el mundo han generado necesidades sin precedentes de productos manufacturados forestales (Youngguist, 1996).

Tanto por un crecimiento demográfico como por el aumento de la demanda de madera, debido conjuntamente a un aumento a nivel mundial de demanda de paneles aglomerados, se dará un descenso de la cantidad de bosque per cápita. Así, se estima que la producción forestal actual no será suficiente como para dar respuesta a este aumento demográfico. Nuestros sistemas de producción de fibra globales demuestran tener capacidad de encontrar respuesta a estas demandas a nivel global, pero no a niveles locales o regionales. Una solución a este problema es aumentar la intensidad de la gestión en los bosques naturales del mundo. Una segunda opción, para aumentar la fuente fibra de madera, que ha recibido mucha atención y crítica en últimas décadas, es el establecimiento de áreas extensas de explotaciones forestales de alto rendimiento. En esta búsqueda por abrir el campo de posibilidades de materiales sostenibles, existe un interés creciente en usar fibras vegetales procedentes de productos y subproductos de actividades agrícolas para complementar o sustituir la madera natural y la explotación de bosques. Fibras vegetales lignocelulósicas no leñosas o en combinación con fibras de madera u otros materiales pueden ser usadas con este fin. Sin embargo, se puede hacer difícil usar ciertas clases de fibras cuando hay imposición y restricciones en calidad y en rentabilidad económica (Cobreros, 2009).

En este contexto internacional, también existe un especial interés en encontrar un material fibroso natural sostenible y no tóxico para sustituir el uso del amianto o asbesto, una vez que se tiene constancia de los perjuicios que este material conlleva para el ser humano. El asbesto o amianto se utiliza, con unas excelentes características de resistencia y durabilidad, como material de reforzamiento para la fabricación de tejas y paneles de fibro-cemento, pero ha sido prohibido en la mayor parte de los países del mundo por sus efectos nocivos sobre la salud. El asbesto puede ser reemplazado por refuerzo de fibras sintéticas y fibras de celulosa, y parcialmente por fibras vegetales naturales como las de sisal, coco, o fique (Cobreros, 2009).

Según la FAO, 2209, las fibras procedentes de los vegetales no son actualmente los materiales fibrosos más utilizados para la fabricación de objetos de nuestra cotidianidad o para la fabricación de materiales industriales o de construcción, en parte

debido a la competencia existente de las fibras sintéticas. Desde el decenio de 1960 ha aumentado el uso de fibras sintéticas, y las fibras naturales, entre ellas las vegetales han perdido participación en el mercado. Actualmente se producen alrededor de 30 millones de toneladas de fibras naturales al año en todo el mundo.

La producción, procesamiento y exportación de las fibras vegetales son de gran importancia económica para muchos países en vía de desarrollo y vital para la subsistencia y la seguridad alimentaria de millones de pequeños agricultores y procesadores. Estos, afrontan el reto de crear y mantener mercados en los que puedan competir con eficacia contra las fibras sintéticas. Es necesario desarrollar nuevas tecnologías que contribuyan a disminuir los costos de los materiales de construcción y minimizar el impacto ambiental en el uso o y la producción de materiales no naturales. En este sentido, el bagazo, la paja de cereal, tallos de maíz, tallos de algodón, cáñamo, el sisal, el bonote, kenaf (cáñamo de Guinea) y cáscaras de arroz, entre otros, parecen tener muy buena perspectiva de desarrollo (Cobreros, 2009).

Hasta qué punto la utilización de fibras naturales genera beneficios ambientales frente a fibras sintéticas en aplicaciones industriales y en edificación, depende en parte de las posibilidades de sustitución de las distintas fibras en el proceso de elaboración, de la necesidad de energía del proceso de producción, de los resultados del producto y del tiempo de vida funcional, incluidas las opciones de eliminación de residuos (Martinez y Xavier, 2001). Estos aspectos suelen ser más cuidados cuando se está trabajando con el producto en si del cultivo o cosecha para la obtención de la fibra o utilidad. De los cultivos de los que se obtienen las fibras como productos, puede obtenerse, al mismo tiempo, residuos o subproductos de los que se puedan obtener otras utilidades. Un plan de gestión de residuos orgánicos o de tratamientos de subproductos agrícolas, debe tener como objetivo convertir los residuos en recursos (Cobreros, 2009).

El ciclo de la materia en los ecosistemas naturales los residuos procedentes de la vegetación herbácea, arbustiva, trepadora y arbórea, así como los generados por la fauna, tiende a ser cerrado. En los sistemas agrícolas convencionales el ciclo de la

materia se ve fuertemente alterado por las exportaciones de biomasa realizadas, por lo que es necesario restituir al suelo los nutrientes minerales mediante técnicas de fertilización orgánica y/o mineral (Martinez y Xavier, 2001). Con el fin de minimizar la pérdida de utilidad del suelo, la biomasa vegetal restante (residuos) debe poder ser devuelta directa o indirectamente al suelo.

Las fibras procedentes de explotaciones agro-industriales, como productos o subproductos, pueden desempeñar una función importante en aplicaciones para la construcción como recurso renovable alternativa para este aumento de demanda de fibras de madera en sus diferentes formatos de aplicación (Cobreros, 2009).

En un momento en el que la industrialización ha derivado en un aumento de la producción agrícola, y por lo tanto de los productos o subproductos derivados de la misma, existe un creciente interés en usar estas fibras vegetales como fuente de recursos para la elaboración de materiales de construcción sostenibles, materia orgánica disponible, por lo tanto, en abundancia y a muy bajo costo procedente de un entorno local y natural, por ello con un bajo impacto ambiental y un bajo coste energético para su obtención. Usando el concepto de reciclaje más allá de la propia construcción: Subproductos o productos agrícolas, que esencialmente no tienen nada que ver con la construcción, pero que, con tratamiento y procesamiento adecuado, o unidos con otros materiales, puede sustituir o incluso mejorar la calidad de los materiales de construcción convencionales (Stulz y Mukerji, 1993).

Aporte del uso de refuerzo fibroso por medio de fibras vegetales

Hasta qué punto la utilización de fibras naturales genera beneficios ambientales frente a fibras sintéticas en aplicaciones industriales y en la edificación, depende en parte de las posibilidades de sustitución de las distintas fibras en el proceso de elaboración, de la necesidad de energía para dicho proceso de producción, de los resultados del producto, y del tiempo de vida funcional, incluidas las opciones de eliminación de residuos. Componentes de edificación procedentes de materiales

agrícolas alcanzan la misma calidad que otros productos a base de madera o materiales sintéticos no naturales (FAO, 2004).

Las plantas, de donde proceden las fibras vegetales, han desarrollado la capacidad de capturar energía solar y utilizar esa energía en su crecimiento y producción. Cosechar ciertas fibras, requiere menos de 10% de la energía utilizada en la producción de fibras de polipropileno por ejemplo. Las fibras vegetales se puede considerar que tienen emisiones neutrales de dióxido de carbono. El fomento de la utilización de recursos renovables, como materiales de construcción sin consecuencias con respecto a la emisión de CO2, sólo puede considerarse sostenible si no origina una deforestación más rápida (FAO, 2009).

Las fibras vegetales son un recurso renovable por excelencia. Además, al procesarlas se crean residuos que pueden ser reciclados o re-utilizados en materiales compuestos o como fuente de energía. Y al final de su ciclo de vida, las fibras vegetales son 100% biodegradables, al contrario que los materiales sintéticos las fibras naturales pueden degradarse mediante microorganismos o compostaje, por lo que se puede cerrar el ciclo de los flujos materiales (Cobreros, 2009). En el proceso de manufacturación de las fibras se generan residuos (contaminación del aire y de las aguas y producción de residuos sólidos) pero es siempre menor que en el caso de los productos sintéticos. Se admite la existencia de una contaminación relativamente alta de las aguas en el proceso, pero se tuvo en consideración que estaba formada por compuestos biodegradables a diferencia de la evacuación de productos químicos persistentes, como por ejemplo los metales pesados que se encuentran en los residuos líquidos de las plantas químicas. Por consiguiente, el tratamiento de aguas residuales para la producción de fibras naturales resultaría técnicamente más sencillo y económico. La producción de cultivos de fibras presenta efectos variados sobre el medio ambiente, en lo que respecta a las necesidades de fertilizantes y plaguicidas. Debe señalarse que los residuos de cosecha pueden presentar contenidos variables de las materias activas utilizadas en los tratamientos fitosanitarios del cultivo. Estos residuos pueden llegar a ser altamente problemáticos. Igualmente, los residuos de

cosecha pueden presentar un mal estado fitosanitario como resultado de la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de procedencia que deben ser tenidos en cuenta en el momento de considerar su posible tratamiento y gestión ulterior. El principal impacto ambiental de estos materiales es el producido por el combustible que se utiliza para transportarlo. Pero si se obtienen de una fuente local el impacto es bajo (Cobreros, 2009).

La mayoría de los beneficios para el medio ambiente de los productos de fibras se acumulan durante la fase de utilización y depende del tipo de aplicación. Para una misma resistencia mecánica requerida, no es tan ventajoso utilizar fibras lignocelulósicas frente a fibras sintéticas o minerales, no obstante, si se consigue la misma rigidez y resistencia, la fibra lignocelulósica puede ofrecer elementos constructivos más ligeros, debido a su rigidez específica alta. Esto es una ventaja también a la hora de transportar estos materiales. También son reciclables, y siempre proporcionan buenas propiedades térmicas, acústicas y aislantes. Los materiales fibrosos vegetales, tienen un alto grado de absorción de humedad, que produce importantes variaciones de peso y volumen, afectando a la durabilidad, que también es afectada por el ataque de microorganismos, insectos, hongos etc. Esto es un problema importante a tratar en la fase de almacenamiento y uso (Cobreros, 2009).

Para cualquier desarrollo comercial, se debe garantizar un abastecimiento prolongado y continuo de los recursos. En el caso de los productos o subproductos agro-industriales, estos recursos incluyen la fibra, el trabajo, el agua, la energía, y el equipo de proceso. No existe una homogeneidad que se pueda garantizar 100% ni en el abastecimiento, ni en sus propiedades, que dependen de factores como el clima o el método de obtención. Para asegurar una fuente continua de la fibra, la gestión de la tierra agrícola que la produce debe estar bajo un sistema de gestión dinámico y sostenible, y debe promover ecosistemas sanos (Rowell *et al.* 1997).

En principio el costo de obtención y producción es casi nulo, dependiendo de la producción y de las políticas económicas, y esto puede afectar a la continuidad de suministros. No obstante, la producción de materiales de procedencia agrícola puede

suponer una contribución importante para hacer una agricultura más competitiva y sostenible aumentando el uso eficiente de materias primas y creando nuevos mercados. Las tierras de labrantío del futuro podrían producir no sólo la comida y la alimentación como lo hacen actualmente, sino también las materias primas industriales y combustibles. En un cierto plazo, esto podía transformar el cultivo y las economías rurales. Puede plantearse plantas y cultivos para la producción de fibras mediante inversiones de bajo presupuesto. La utilización de maquinaria agrícola hace aumentar los costos de producción y el consumo de combustible. Sin embargo, si la cosecha es cultivada por un gran número de pequeños agricultores que utiliza mano de obra y fuerza animal, la contribución de la producción primaria a la repercusión ecológica total es muy pequeña, debido a la escasa utilización de productos agroquímicos y maquinaria. Otro factor de transformación será la necesidad de localizar plantas de facturación de productos con base agrícola en zonas rurales, para evitar transportar distancias largas lo abultado de los productos agrícolas. Esto no sólo mejoraría la economía de los procesos de producción biológicos proporcionando materias primas más baratas, si no también proporcionaría trabajos muy necesarios en una economía rural generalmente deprimida y con un futuro siempre incierto (Cobreros, 2009).

5.3.4.3 Tipos y especies de fibras vegetales con aplicación en la construcción

Existen alrededor de 50 tipos de especies de plantas como fuentes de fibras vegetales útiles para la construcción. En este estudio se destacan sólo algunas por importancia o disponibilidad en un área geográfico y climático cercano (Cobreros, 2009). Jute, fibra de coco, sisal, bambú, fibra de madera, hoja de palma, hoja de palma de coco, polvo de coco, algodón, hierba han sido utilizados como refuerzos fibrosos (Galán-Marín *et al.,* 2010; Prabakar y Sridhar, 2002). Investigación sobre añadido de fibra de coco y sisal con buenos resultados, dónde el añadido del 4% de fibra (sobre el ratio del peso) reducía el agrietado visible y aportaba alta ductilidad a bloques de tierra (Ghavami *et al.,* 1999). La mayoría de los estudios sobre refuerzos fibrosos en compuestos en base a tierra están basados en el uso de fibras vegetales de base celulosa obtenido de recursos vegetales renovables.

Algodón (gossypium)


Fig. 3.5.4.3.1. Planta de algodón.

La fibra del algodón es el fruto que crece alrededor de las semillas de la planta de algodón. Es celulosa natural pura, con características de suavidad, aireación, fuerza y otras que la han convertido en la fibra natural más popular del mundo. Es un material reciclable y bio-degradable. No contiene ninguna sustancia tóxica (Cobreros, 2009). Según la FAO en el 2009, el cultivo y el uso del algodón se dominaron hace miles de años, en México y en Pakistán se han encontrado fragmentos de artículos de algodón de 5000 años a.C.

El algodón se cultiva por la fibra de la semilla y el tallo se usa muy poco, que queda como residuo, con un volumen por cosecha bajo, y de difícil almacenaje por problemas con parásitos. Si esto se resuelve, los tallos de algodón se pueden convertir en una excelente fuente de fibra, ya que tiene aproximadamente un 33% de corteza muy fibrosa. El algodón se cultiva en unos 80 países y es uno de los cultivos de mayor producción mundial. Los principales productores son: China, los Estados Unidos, la India, Pakistán, Uzbekistán y Brasil (FAO, 2009). En la construcción se utiliza para aislamientos térmicos y acústicos para ser utilizados en el sector de la construcción, mantas fabricadas con fibra de algodón virgen y con fibra de algodón de textil reciclado, lámina EPDM cubierta en ambas caras por una manta de algodón virgen, etc.

Sisal (Agave Sisalana)


Fig. 3.5.4.3.2. Planta de Agave Sisalana

Se obtiene de una planta suculenta, el Agave Sisalana originaria de México, (de otro agave mexicano, el A. fourcroydes se produce otra fibra parecida, el henequén) (FAO, 2009). Es una planta resistente que se da bien en una variedad de climas calientes, así como en zonas secas donde no prosperan otros cultivos. Con fibras de hasta un metro de longitud, el sisal está clasificado como fibra dura. Es un cultivo que prácticamente no necesita fertilizantes químicos ni herbicidas. Los principales productores son: Brasil, Tanzania y Kenya.

Aplicaciones en construcción: Principalmente para fabricar sogas y cordelería, pero la competencia cada vez más fuerte de las fibras sintéticas, especialmente el polipropileno, debilita su demanda. Hoy día se usa el sisal en la fabricación de papeles especiales, filtros, geotextiles, colchones, tapetes y tapicería para paredes. Se han hecho bastantes estudios en el uso de las fibras de esta planta como refuerzo en matrices de cemento, o para elementos de cubierta. Como sustituto del Amianto. Los productos secundarios de la extracción del sisal se pueden utilizar para producir biogás, ingredientes farmacéuticos y materiales para construcción. Existen estudios e investigaciones para utilizar el fique y el sisal como refuerzos del polietileno, pudiendo llegar hasta un 60% de proporción de esta fibra en el polímero reciclado (Cobreros, 2009).

Cáñamo (Cannabis Sativa L)


Fig. 3.5.4.3.3. Plantación de Cannabis Sativa

El cáñamo es una especie originaria de Asia central, característica de las zonas marginales de los bosques. Es de ciclo corto, en menos de 5 meses alcanza todas las fases

de su crecimiento y reproducción (Cobreros, 2009). Se trata de un cultivo fácil. Hoy en día el cáñamo vuelve a destacar como cultivo competitivo y sostenible en la industria de la producción de fibra y celulosa. El cáñamo se produce mediante una variedad específica de la especie Cannabis sativa L., la cual a diferencia de la subespecie indica, más conocida como Marihuana, prácticamente no contiene sustancias psico-activas. Debido a que las hojas de ambas plantas se parecen, el cáñamo muchas veces se confunde con la marihuana, y por ese motivo en muchos países está limitado o prohibido el cultivo de la planta de la cual se obtiene la fibra. Casi la mitad del suministro mundial de cáñamo industrial se cultiva en China, y la mayor parte del resto en Chile, Francia, la República Popular Democrática de Corea (FAO, 2009).

Aplicaciones en la construcción: El uso del cáñamo en construcción se hace en mezcla con otros materiales como puede ser la cal o la tierra. Se usa en forma de partículas para fabricar bloques y paneles, o en forma de lanas para usarla como aislamiento. Remplazando el uso de fibras de vidrio para el uso con PVC, el cáñamo hace posible la producción de plásticos con las mismas propiedades físicas y con un 10% de reducción de peso, por lo que se reduce el consumo de energía para el transporte. Al ser menos abrasivo también reduce el gasto en las cadenas de montaje. La lista de aplicaciones del cáñamo es grande y cada vez más grande debido también al incremento del coste de la energía que se usa en enormes cantidades para la producción de fibras minerales, principal competencia en el mercado (Ségalen, 2005). Es usado en la manufacturación incluso de piezas de coches de alto nivel. Cubierto con betumen (asfalto) los tallos de cáñamo pueden ser usados como diferentes componentes para suelos. Se usan en nuevas construcciones y rehabilitaciones para hacer losas de hormigón auto-aislantes. El comportamiento térmico y acústico, sus características higrotérmicas, su capacidad de captar CO2 y las demás cualidades medioambientales del cáñamo lo ponen con un verdadero potencial de desarrollo, y su uso cada vez se hace más extendido en países como Francia, Alemania, Canadá y recientemente en España (Woolley, 2006). Como materia prima da una producción continuada, sin peligro de agotamiento y con posibilidad de reciclaje. Su crecimiento rápido la convierte en un eficaz protector del suelo, evita la erosión e impide el

crecimiento de malas hierbas. Al ser refractaria a las plagas apenas necesita protección de pesticidas (Cobreros, 2009).

Yute (Corchorus Olitorius L)


Fig. 3.5.4.3.4. Plantación de Yute

La fibra del yute se obtiene del tallo de esta planta y de otras especies de este mismo género. Es una planta tropical herbácea fibrosa, de la familia de las Malváceas. Hay que importarla casi en su totalidad de la India y Bangladesh. Necesita un tratamiento de maceración que permite extraer la lignina y pectinas, tal como se efectúa con el esparto y el cáñamo. Es la más barata de las fibras textiles, y es una de las fibras vegetales más empleadas, la segunda, después del algodón, a pesar de que es menos resistente, más frágil que el lino y el cáñamo y especialmente sensible a los ácidos. Se hila generalmente en hilos gruesos o medianos y con ellos se tejen arpilleras. Los principales productores mundiales de yute son Bangladesh y el estado de Bengala Occidental de la India Suele cosecharse a mano y requiere de pocos otros insumos como fertilizantes o plaguicidas (Cobreros, 2009)

Aplicaciones en la construcción: se hila generalmente en hilos gruesos o medianos y generalmente se emplea en la fabricación de telas, sacos, tejidos y también como material de relleno. También se ha creado una serie de productos «diversificados» innovadores con valor añadido, como tapetes, materiales compuestos con yute, geotextiles, telas no tejidas, pulpa de papel, textiles técnicos, ropa, artesanías y accesorios de moda.

Kenaf (Hibiscus Cannabinus L)

También conocida como “Cáñamo de Guinea”, es una planta herbácea cultivada desde 4000 a.C., emparentada con el algodón, usada durante mucho tiempo en forma de fibras para la fabricación de tejidos e incluso como alimento. La morfología fibrosa del tallo dificulta el ataque de insectos. De crecimiento rápido su cultivo se puede

alternar con otro tipo de cultivos. Del interior se obtienen fibras que son similares a las obtenidas de maderas duras. Muy buena alternativa a la madera como materia prima para la fabricación de papel y para las industrias de pulpa. Aplicaciones en la construcción: Muy buena alternativa a la madera como materia prima para la fabricación de papel y para las industrias de pulpa. Se usa para la fabricación de cuerdas, papel, esteras, que a su vez son usadas para el control de erosión de suelos, para la fabricación de mantillas absorbentes, y como elemento de construcción centrado en la fabricación de paneles (Cobreros, 2009).

Bagazo de caña de azúcar

La caña de azúcar es una gramínea tropical emparentada con el maíz. Su tallo está compuesto por una parte sólida altamente fibrosa y una parte líquida, que contiene agua y sacarosa. Una vez molida la caña para la obtención del azúcar se obtiene la fibra que constituye el bagazo de la caña. Como subproducto o desecho no tiene problema para su recolección. La cosecha de la caña de azúcar suele tardar alrededor de dos meses, el resto del año se debe almacenar el material poniendo especial cuidado en la fermentación del mismo. Es el residuo fibroso del procesamiento de la caña de azúcar. Se compone de fibra y de médula. La fibra es de pared gruesa y relativamente larga (Rowell *et al.* 1997). No es adecuado para el refuerzo de productos a base de cemento, ya que el azúcar residual retarda el fraguado del cemento. Con un adhesivo orgánico adecuado, se pueden hacer tableros de partículas y tableros de fibras (Stulz y Mukerji, 1993). El bagazo está disponible donde quiera que se produzca la caña de azúcar. La fuente de bagazo es relativamente constante: el resto del año, debe ser almacenada. Debe tomarse cuidado especial durante el almacenamiento para prevenir al bagazo de la fermentación, pues tiene un alto contenido de azúcar. Entonces, puede ser almacenado por varios años (Chapman, 1956).

Maíz (Zea Mais)


Fig. 3.5.4.3.5. Plantación de Maiz

La estructura de los tallos de maíz es de un interior esponjoso rodeado de una capa exterior altamente lignificada que da resistencia a la estructura fibrosa, con características parecidas a especies como la caña de azúcar, por lo tanto con similares posibilidades de uso. Los desechos obtenidos después de la cosecha se suelen usar como forraje, como cama de ganado o directamente se queman o abandona en el campo. Es la tercera especie más cultivada en el planeta junto con el arroz y el trigo, con explotaciones y cultivos como los más importantes en el propio México. Aplicaciones en la construcción: los tallos y las mazorcas del maíz se pueden utilizar como fibra lignocelulósica en materiales de construcción (Rowell *et al.* 1997). Existe fabricación de paneles de fibra procedente del tallo de maíz unidos con resinas urea-formaldehído y compuestos mediante un desecho que normalmente se usa como forraje, como cama para el ganado o es quemado o abandonado en el campo de cultivo (Cobreros, 2009).

Cáscara de arroz (Género Oryza)

Como desecho agrícola la cáscara de arroz es de naturaleza fibrosa y se aglutina fácilmente, en forma de cáscaras enteras o trituradas, con resinas u otros aglomerantes para fabricar paneles de partículas. Se puede usar como agregado en matrices de cemento, y la ceniza de la cáscara de arroz tienen un alto contenido en sílice que la convierte en un elemento puzolánico que, tratada químicamente o en forma de ceniza, funciona como agregado o sustituto del cemento. Mezclada con tierra, modulada y aglutinada en un horno, produce áridos ligeros para hormigones (Stulz y Mukerji, 1993).

Las cáscaras del arroz son un residuo agrícola que están disponibles en bastante grandes cantidades en áreas locales concretos. El grano se almacena, haciendo disponibles las cáscaras del arroz de manera razonablemente uniforme y, por ello, se requiere poca energía para preparar las cáscaras para el fabricante de tableros y paneles (Rowell *et al.* 1997).

Caña (Arundo Donax L)


Fig. 3.5.4.3.6. Plantación de caña

Son plantas herbáceas probable-mente originarias de Asia pero que se han naturalizado desde muy antiguo en la Península Ibérica. En determinadas zonas es una especie invasora. Ha sido una planta muy aprovechada y versátil. Es un material auxiliar muy barato empleado por el horticultor. Material de desecho sin problemas para su recolección, solo con el cuidado de evitar su fermentación. Aplicaciones en la construcción: Siempre ha sido una planta muy aprovechada y versátil utilizada desde tiempos inmemoriales. Hasta hace poco tiempo eran de caña los mangos de escoba, los falsos techos, los tabiques de muchas casas. La caña es también un material auxiliar muy barato empleado por el horticultor. Se está dando fabricación de paneles usando la porción porosa de las cañas. Material sin problemas para su recolección, solo con el cuidado de evitar su fermentación en el momento de almacenamiento. Se han fabricado tableros de aislamiento y tableros plástico-consolidados también de cañas (Cobreros, 2009).

Bambú (Genero Bambusa)

Gramínea perenne que alcanza su crecimiento completo en apenas algunos meses y alcanza su resistencia mecánica máxima en apenas pocos años., con variadas posibilidades como material de construcción. El bambú es un material compuesto por fibras largas y paralelas de celulosa encajadas en una matriz leñosa.

Como la madera, el bambú es vulnerable a la degradación y los ataques de insectos. Su durabilidad varía con el tipo de especie, de edad, de condición de la protección, de tratamiento y curado. El Bambú es un protector del ambiente. Entre sus beneficios ecológicos se encuentran que es un gran captador de CO2, mucho más eficiente que la mayoría de árboles del bosque tropical, sus necesidades de agua son mínimas y las raíces suponen protección contra los deslizamientos de tierra (Ghavami, 2004). Es una especie abundante en regiones tropicales y subtropicales del globo (Cobreros, 2009).

Aplicaciones en la construcción: se puede usar como elemento estructural y como refuerzo de morteros de cemento. Existe un amplio conocimiento de su comportamiento físico y mecánico, con alta resistencia a tensión, amplia disponibilidad y bajo costo.

3.5.4.4 Paja de cereal, fibra lignocelulósica subproducto agrícola


Fig. 3.5.4.4.1. Plantación de cereal

La paja de cereal, como fibra lignocelulósica constituye una materia prima de bajo costo, abundante y renovable (Savastano et al., 2003). En los países en desarrollo, el crecimiento de las industrias basadas en productos agro-forestales ha acelerado la producción de residuos como la cáscara de arroz, paja de trigo, paja de cebada, bagazo de caña, aceite de palma, avellanas etc. (Karade, 2010). Dentro de las fibras vegetales, se considera el uso de subproductos para poder alcanzar una tasa de reciclabilidad alta y así una cantidad máxima utilizable del capital natural disponible. Esto es atractivo desde el punto de vista medio ambiental siempre que no comprometa la conservación del suelo, sabiendo que a nivel mundial existe una alta producción de cultivos herbáceos cereales, sobre todo de trigo, cebada y maíz, con la paja como subproducto más utilizado (Bowyer y Stockmann, 2001).

La paja, que es el tallo y material fibroso de la planta de cereal, la parte que está entre la raíz y la espiga (Minke y Mahlke, 2005), es un material lignocelulósico generado en grandes cantidades como residuo de los cultivos de cereal. Después de la recolección del grano, una gran cantidad de paja queda disponible como residuo (Karade, 2010). En este grupo incluimos la paja de los cinco cereales de caña delgada: Trigo (Triticum Aestivum), Cebada (Horneum Vulgare), Avena (Avena sativa), Centeno (Secale Cereale) y Arroz (Oryza sativa). Existen pajas de otras especies, aunque menos importantes (Staniforth, 1986).

Se ha reportado que la paja de cereal tiene una microestructura más complicada que la fibra de la madera y existe una mayor variedad en términos de tipo y tamaño de célula. La paja contiene principalmente tres grupos de compuestos orgánicos: Celulosa, Hemicelulosa y Lignina. La composición química de las pajas varía con el tipo de suelo y fertilizantes aplicados. La condición física de la paja depende del método de recolección y del tipo de cereal (Staniforth, 1986). La paja de cereal puede contener entre 28-37% de celulosa, entre el 23-38% de hemicelulosa, entre 12-19% de lignina, 18% y entre el 0.5-14% de Sílice (Halvarsson et al., 2004).

La paja ha sido utilizada desde la antigüedad en la construcción, en cubiertas, como material fibroso refuerzo en el adobe, en muros continuos de tierra para alivianarlos, etc. Hoy día se puede llegar a nuevas formas de uso de estas fibras, de manera estandarizada, de fácil puesta en obra, que gracias a una nueva homogeneización pueda posicionarse en el exigente sector de la edificación, sin ignorar los estándares de durabilidad y confort de la vivienda construida, donde el uso de residuos agro-industriales puede tener una contribución vital (Mathur, 2005).

Antiguamente la paja contenía una cantidad variable de malas hierbas. El amplio uso de herbicidas químicos ha eliminado, casi totalmente, las malas hierbas de hoja ancha. La paja puede ser contaminada igual, por estos residuos de pesticidas químicos. Hongos y bacterias se desarrollan particularmente bien en la paja empacada con cierta humedad. El polvo es un contaminante frecuente. La paja es un material que la naturaleza produce anualmente y que se encuentra ampliamente disponible. Es un

subproducto agrícola, aunque en algunos casos se pueden cultivar especialmente para su uso. La explotación del petróleo y del gas natural fue la causa principal de los excedentes de paja, cuando los animales de carga y labranza, que necesitaban la paja, fueron sustituidos en muchos países por el motor de combustión interna. Al mismo tiempo que ha descendido fuertemente los principales usos de la paja, para alimentación y cama del ganado, igual ha sucedido con su empleo para otros fines (Cobreros, 2009).

Se puede hablar de una relación general de grano/paja de 1:1, lo que supone una enorme cantidad de paja a nivel mundial (Owen, 1976). Se ha calculado los fines a los que han sido destinados la paja en regiones concretas: 15,0% consumida como alimento, 36,4% destinada como cama del ganado, 9,3% para ventas entre explotaciones, 1,6% cubierta para labrar, 1,1% usos no agrícolas y 36,6% Quemada. Así, hay un alto porcentaje potencial de paja que se desperdicia y que se puede utilizar para fines industriales, aunque se sabe que una proporción de la paja que se empaca y se retira del campo suele perderse por deficiencias de almacenamiento y utilización (Staniforth, 1986).

La paja también tiene la desventaja de ser voluminosa y difícil de reducir a pacas densas que sean idóneas para un transporte y almacenamiento económico. La paja muestra una tendencia a variar de calidad, es difícil garantizar homogeneidad. Es imposible evitar la putrefacción de la paja que permanece húmeda durante un periodo dilatado de tiempo de almacenamiento (Cobreros, 2009)

El impacto ambiental de la producción de la paja suele acostumbrar a ser muy bajo, incluso su retirada del campo puede suponer un aporte al medio, pues la producción de elevadas concentraciones de ácidos fenólicos al descomponerse los residuos de los cultivos de cereales en el terreno, suponen una causa posible en perjuicios para cultivos posteriores (Ellis y Lynch, 1977) y la combustión de la paja en el campo para combatir las semillas de malas hierbas que yacen sobre o inmediatamente debajo de la superficie del suelo, pueden suponer un factor de contaminación y emisión (Staniforth, 1986).

Al finalizar su uso, como material, se puede devolver a la biosfera. La eliminación de la paja no crea problemas, los sobrantes de una obra pueden utilizarse por ejemplo, como abono en la tierra, o para airear el suelo de los cultivos (Minke y Mahlke, 2005).

Es despreciada como fuente de energía renovable, mientras que seguimos consumiendo las reservas finitas de hidrocarburos minerales. La energía contenida en productos “casi residuales” tales como la paja se calcula que es dos veces superior al consumo directo e indirecto de energía fósil que se realiza en la explotación.

En México la producción de cereales es la producción agrícola más importante según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera en su última edición del 2012, repitiéndose el esquema del trigo, el maíz y la cebada como cultivos con mayor producción. El trigo y la cebada crecen en varias partes del planeta sobretodo en climas templados. Se recolectan 1 o 2 veces al año. Debido al crecimiento de la agro-industria se ha acelerado la generación de estos residuos. Sobre el trigo existen muchas referencias bibliográficas respecto a su uso en el desarrollo de materiales de construcción, mucho en refuerzo de adobe o bloques de tierra o como refuerzo en paneles basado en cemento portland, pero se ha publicado poco sobre su comportamiento como refuerzo en paneles de tierra (Karade, 2010).

A nivel mundial existe una alta producción de cultivos herbáceos cereales, sobre todo de trigo, cebada y maíz, con la paja como el subproducto más conocido y utilizado (Bowyer y Stockmann, 2001). Actualmente estos residuos son incinerados o depositados en el campo y esto puede ocasionar varios problemas ambientales como la contaminación del aire, la emisión de gases con efecto invernadero y la ocupación de terreno fértil (Karade, 2010). Además, la biodegradación de los residuos lignocelulósicos en los vertederos emite metano, un gas efecto invernadero 72 veces más perjudicial que el CO2 y a veces el compostaje y la quema de estos residuos no es posible por legislación (Leliveld y Crutzen, 1992).

Su aplicación en la construcción: durante las dos últimas décadas se han publicado varios informes sobre el uso de residuos lignocelulósicos, incluido la paja de cereal, en la producción de compósitos de matriz inorgánica como el cemento portland, yeso o magnesita (Karade, 2010).La paja de cereal tiene características geométricas y mecánicas adecuadas como para hacer paneles con matrices cementicias, pero con problemas con la hidratación del cemento, teniendo en cualquier caso los requerimientos mecánicos, físicos y de durabilidad mínimos como para ser utilizado (Soroushian *et al.,* 2004).

El añadido de paja a un compósito ayuda a disminuir la factura por retracción y el tiempo de curado, y mejora la resistencia a compresión dentro de un ratio adecuado de dosificación, además de mejorar el comportamiento mecánico del compósito (Bouhicha *et al.,* 2005; Li, 2005), mejorando la resistencia a cortante, la resistencia a flexión y la ductilidad (Bouhicha *et al.,* 2005). Las fibras son embebidas en la matriz y absorben el esfuerzo a cortante a modo de resistencia a tracción (Jamshidi *et al.,* 2010; Ghiassian *et al.,* 2008; Abtahi *et al.,* 2008). La mejora en la resistencia de los compuestos por el uso de refuerzos de fibra incrementa con el aumento en ratio del contenido en fibra, con el alto módulo de tensión de la fibra y la fricción entre la superficie de la fibra y el compuesto (Hejazi *et al.,* 2012).

La paja de cereal aporta al compósito baja densidad, y con ello aislamiento térmico (Bouhicha *et al.,* 2005). Recientes estudios indican como las propiedades de los compósitos pueden ser también mejoradas usando pulpa de material fibroso, ideal para el manufacturado de paneles delgados al hacer una distribución homogénea de la fibra en la matriz, aumentando la unión entre fibra y matriz, logrando una mayor eficiencia del refuerzo, un aumento significativo de la resistencia a flexión y rigidez, y una mejora en la durabilidad debido a la reducción de lignina y hemicelulosa en las fibras, lo que hace que se reduzca la degradación en matrices alcalinas (Savastano *et al.,* 2003).

La paja de cereal es abundante pero con ciertos problemas como material de construcción: Bajo módulo de elasticidad, alta absorción de agua, susceptibles a

ataques de hongos y plagas, poca durabilidad y descomposición en ambientes alcalinos, inestabilidad dimensional y variable propiedades físico-mecánicas (Karade, 2010).

La paja se puede procesar como tablero, en formato de fibra o partícula, pero su fabricación tiene un gasto extra de energía en el proceso, en la producción de las resinas mismas, en el corte de las partículas, en la mezcla con la resina, así como en el proceso de compresión y secado. En la mayoría de los casos, el uso de agua y, sobre todo, la problemática del uso de derivados de los formaldehídos o resinas sintéticas como aglutinantes, es mayor que en el caso de las fibras madereras (Wooley *et al.,* 1997). Existen estudios sobre paneles mediante paja comprimida sin uso de formaldehídos en el proceso de compactación, pero por sus características son sólo indicados para interiores.

El problema básico a resolver es la incógnita de si la paja de cereal existente en un entorno geográfico cercano, con sus características peculiares y únicas, cumple con los requisitos mínimos como fibra reforzante en paneles con matriz en base a tierra, cumpliendo con características adecuadas en cuanto a sus dimensiones, densidad, contenido de humedad, capacidad de absorción, capacidad de desorción, capacidad que tenga de mineralizar sus partículas, así como resistencia a tracción, básico para comprender y aceptar por bueno su comportamiento como refuerzo dentro de un compósito. Con respecto a esto, ciertos estudios han informado que la paja tiene una microestructura más complicada que la de la madera, aunque esto es solucionable con ciertos tratamientos. Hay que seguir estudiando en cómo afecta las condiciones de almacenamiento y su duración en las características de la fibra y en como parar su degradación (Karade, 2010).

Las fibras vegetales, como la paja de cereal, son materias primas que pueden ser rentables comparadas con otro tipo de materiales, pueden aportar aislamiento térmico y reducción del peso de la construcción (Khedari *et al.,* 2005), pero para el desarrollo, promoción y valoración del uso de fibras vegetales, en concreto de la paja de cereal, y su incorporación a sistemas constructivos como componentes

prefabricados, se hace necesario la investigación de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como de su compatibilidad e idoneidad en combinación con la tierra y sus estabilizantes.

3.5.4.6 Uso de la fibra vegetal como refuerzo fibroso en la construcción

Uso tradicional de fibras vegetales en la construcción.

Considerando que diversos animales construyen refugios de hojas, hierbas y fibras naturales, estos materiales fueron quizás los primeros materiales de construcción empleados por el género humano, cuando las cuevas y otras moradas naturales no estaban disponibles (Stulz y Mukerji, 1993). Los cobijos en madera del hombre prehistórico eran simples, toscos y adecuados a su vida nómada, simples, de ramas entrelazadas entre sí.

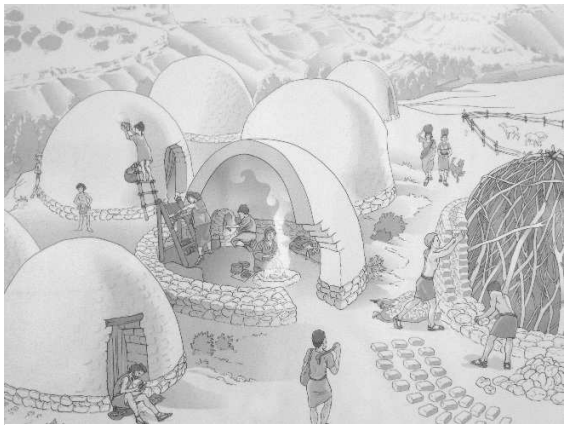


Fig. 3.5.4.6.1. Recreación de vida en el sur de la península ibérica, 2500 a. c

El hombre primitivo hubo de construir con materiales localmente disponibles (cañas, tallos, hojas y ramas). De esos materiales dúctiles y livianos, posteriormente debió crear unidades estructuralmente rígidas y durables. Esto lo conseguía entretejiéndolos para cubrir, abovedar o salvar el espacio útil. Ya en el 1500 a.C. los cazadores trashumantes de Europa conocían la tierra y la turba como excelentes aislantes. Cerraban el muro de turba en torno al armazón y las ramillas (Cobijo, 1979).

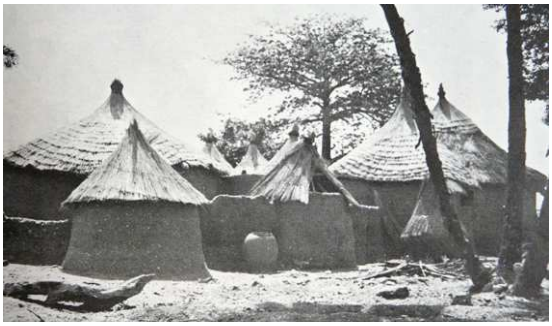


Fig. 3.5.4.6.2. Vivienda rural en Togo.

La construcción en adobe o bloques de suelo, que se fabricaban con paja u otras fibras vegetales añadidas en su composición, se extendió por todos los climas cálido-secos, subtropicales y templados del planeta. Se han encontrado adobes que datan de 8000 a 6000 a.c. en Turquestán. En México, Centroamérica y Sudamérica existieron construcciones de adobe con añadidos de fibras vegetales en casi todas las culturas precolombinas (Minke y Mahlke, 2005). Hoy en día aún existen regiones donde se siguen usando estas técnicas ancestrales. Existen viviendas construidas con paredes que se hacen con ladrillos de barro y luego se enlucen con barro y paja u otras fibras vegetales



Fig. 3.5.4.6.3. Reconstrucción ideal de casas celtas.

Se tienen ejemplos de reconstrucciones de casas celtas, con estructura de troncos y cubierta de paja y cañas cortadas de estuarios locales. Las paredes eran “entrelazadas y revestidas” con ramas de avellano y sauce entretejida y cubiertas con una mezcla de barro, pelo de caballo y boñigas de vaca.



Fig. 3.5.4.6.4. Granero de Sidi Mousa, Marruecos. Marruecos Presahariano. Hábitat Y Patrimonio en 1998.

En la publicación de Marruecos Presahariano. Hábitat Y Patrimonio en 1998, tenemos ejemplos en el entorno mediterráneo: Las necesidades de defensa, el rigor del clima, la escasez de agua, los limitados campos de cultivo crearon un fuerte sentido de colectividad en estas poblaciones.

En la antigua tradición berebere, la vida cotidiana regida por el Islam y los contactos con la sociedad Subsahariana afloran en una rica arquitectura hecha de materiales pobres y locales, como tierra, cañas y otras fibras vegetales.

Uso actual de fibras vegetales en la construcción según elemento constructivo.

Cubiertas de fibras y tierra: En climas subtropicales, moderados y fríos se han construido por siglos cubiertas de barro algunas veces incluso inclinadas. Usualmente la madera o el bambú forman el elemento estructural primario y sobre estos se colocan generalmente ramas formando una malla densa sobre la cual se puede apisonar barro con paja (Minke y Mahlke, 2005).

Fibra vegetal en cerramientos como refuerzo. (Material fibroso: Sisal, cáñamo, estopa de coco, bonote, aserrín, paja de cereales, cáscara de arroz, hierbas y diferentes ramajes).



Fig. 3.5.4.6.5. Casa en comunidad skesta, Suecia.

Muros continuos de tierra alivianado con fibras: La tierra alivianada con fibras vegetales es una mezcla de barro y fibras, en el caso de la paja con una densidad en estado seco menor de 1200kg/m3. La longitud de la fibra no debe ser superior al espesor del elemento constructivo. El barro y la fibra se mezclan ya sea vertiendo la lechada sobre la paja o sumergiendo la paja en la lechada de barro. Se ha expuesto la concepción de que el barro con paja, empleado como relleno en los entramados, ofrece suficiente aislamiento térmico, pero no es cierto. El trabajo con este material es muy laborioso. Sin equipos especiales para mezclar y transportar, el rendimiento de construcción para un muro de 30cms de espesor es de aproximadamente 6h/m2. En relación a la mampostería usual de ladrillo, esta es cuatro veces mayor. La ventaja del barro alivianado con paja u otras fibras

puede ser el bajo costo de los materiales y la posibilidad de utilizarlo sin necesidad de herramientas y maquinaria especializada. Hay que prestar especial atención al asentamiento que sufre el barro alivianado cuando se trabaja con mezclas más ligeras de 600kg/m3 y con muros de más de 25 cm de espesor, la paja puede descomponerse en el interior del muro al ser atacada por microorganismos. Por eso se recomienda que los tallos de la paja estén totalmente cubiertos por el barro, es decir que la mezcla debe tener como mínimo la densidad de 600 kg/m3 (Minke y Mahlke, 2005).

Muro continuo de tierra y cal reforzado con fibras y partículas de cáñamo: Se suele usar combinado con una estructura portante. Constituyéndose así una sólida pared de aislamiento. El resultado es el de una pared transpirante que requiere revoco o terminación exterior para protegerlo del agua y que aporta un inmejorable aislamiento con una sola capa de material (Cobreros, 2009).



Fig. 3.5.4.6.6. Muro continuo de tierra y cal reforzado con fibras y partículas de cáñamo

Experimentos con muros de cáñamo y cal, y cáñamo y tierra: Es fabricado con la mezcla de trozos de cáñamo mezclado con cal o tierra. La mezcla se puede hacer a mano, con una hormigonera habitual de hormigón común sobre encofrados, mejor de madera o también puede ser proyectada. La cal le puede proteger del ataque de insectos y de la putrefacción. Tarda unos dos o tres semanas para secarse adecuadamente, más lento por lo tanto que el hormigón convencional. Una vez seco, la pared se convierte en estable. La mezcla puede ayudar



Fig. 3.5.4.6.7. Entramado de fibras vegetales rellenos con barro plástico.

a controlar de manera natural la humedad del edificio (Wooley et al., 1997).

Entramados de fibras vegetales rellenos con barro plástico (taipa, bahareque o quincha): Es una técnica más antigua que las técnicas de tapial o adobe. Consiste que el barro plástico mezclado con paja picada se lanza sobre una estera de ramas, gajos, caña de bambú u otras fibras vegetales. La estructura consiste en elementos verticales y horizontales que crean una malla, normalmente madera con ramas delgadas colocadas horizontalmente. La malla de fibras o ramas puede ser interior y exterior al mismo tiempo. La tradicional forma de lanzamiento se puede sustituir por un proyectado con máquina que conlleva abaratamiento en mano de obra (Minke y Mahlke, 2001). Todas estas técnicas de relleno y entramado no pueden utilizarse sin aislamientos adicionales en climas fríos.

Bloques de turba: Material fibroso: Parte vegetal del suelo. Se han construido casas de turba en el S.XIX que han durado hasta nuestros días. Para hacer los muros, primero se buscaba un cuadro de buena hierba, en otoño, cuando la hierba es dura y el terreno está lo suficientemente húmedo como para mantener la parte vegetal bien unida. Si la hierba estaba alta, podía segarse y utilizar el corte para techar. Los terrones se sentaban sin mortero, con la hierba hacia abajo, como grandes ladrillos. El espesor de los muros era como de dos o tres bloques, con juntas alternadas. Se captura el misticismo de las casas célticas con formas modernas. La casa de turba representa una conexión física con la tierra. La turba no es un material renovable, por lo que su



Fig. 3.5.4.6.8. Banco de extracción de bloques de turba.



Fig. 3.5.4.6.9. Construcciones con bloques de turba.

extracción debe ser regulada aunque si es reciclable y totalmente biodegradable (XS ecológico: Grandes ideas para pequeños edificios, 2007).

Bloque de tierra y sisal: En países como Perú se están realizando Estudios y pruebas de esta nueva mezcla de la resistente fibra del sisal con tierra (Cobreros, 2009).

Bloques de cal-cáñamo: Es una opción más cara que la del muro continuo de tierra o cal con refuerzo de cáñamo y con menos propiedades que esta. Pero es una manera de hacer un producto con la misma mezcla y que sea más competitiva (Wooley et al., 2006). Formado por fibras vegetales de cáñamo, cal hidráulica natural y minerales. Cumple con las funciones de un muro estructural y además su composición no exige la adición de aislamiento termo-acústico, con una conductividad térmica de 0,048 W/mk, es un material con gran capacidad aislante. La petrificación de las fibras de cáñamo al relacionarse con la cal y los minerales, es otro factor importante en el aumento progresivo de la resistencia en el material (Brümmer, 2010). El bloque de cal-cáñamo permite la transpiración y la difusión al vapor de agua entre el interior y el exterior del edificio, lo que le convierte en un material capaz de compensar y equilibrar la humedad ambiental evitando así los espacios húmedos y fríos. Así mismo, no provoca condensaciones ni en superficie ni en el interior del muro. El bloque puede ser molido y reutilizado en la producción de otros bloques o como morteros aislantes (Wooley *et al.,* 2006).

Bloques de tierra (adobe): Son bloques de tierra y fibra vegetal añadida, normalmente paja, secados al aire libre. La construcción en adobe se extendió por todos los climas cálido-secos, subtropicales y templados del planeta. Se han encontrado adobes que datan de 8000 a 6000 a.c. en Turquestán. A lo largo de la historia se pueden encontrar numerosos casos, y aunque se ha desprestigiado su uso en muchos lugares sobre todo de Europa, su uso sigue vigente. La fibra vegetal hace de refuerzo para evitar que se agriete el barro cuando se contrae con el secado. El barro regula la humedad ambiental, almacena el calor. El bloque de tierra con paja prácticamente no produce contaminación ambiental en su producción en relación a

otros materiales de uso frecuente: para preparar, transportar y trabajar el barro en el sitio se necesita sólo aproximadamente un 1% de la energía requerida para la preparación, transporte y elaboración del hormigón armado o el ladrillo cocido.

Fibras vegetales, como la paja, se añaden, asegurándose de que estén secas, evitando así los riesgos por su descomposición. Cuando se añaden estas fibras vegetales como la fibra de coco, el sisal, bambú o paja cortada, la retracción puede disminuirse. Esto se debe a que el contenido relativo de arcilla se reduce y parte del agua es absorbida por las fibras.



Fig. 3.5.4.6.10. Casa de adobe, Worcester, R. Unido.

Bloque de tierra aligerada: El aislamiento térmico del barro se incrementa añadiendo estos aditivos porosos como la paja, algas marinas, corcho y otras fibras vegetales. Mientras más porosa la mezcla, más ligera es y mayor su aislamiento térmico. Denominamos tierra aligerada cuando se tiene una densidad menor a 1200 kg/m3.

Sistema intermedio entre construir con balas de paja y construir con adobes o muros de tierra. Esta solución constructiva aporta un alto valor de aislamiento térmico. No se usa como material resistente. Estos bloques aligerados pueden proporcionar un buen aislamiento pero no están recomendados para el uso exterior (Wooley et al., 2006).



Fig. 3.5.4.6.11. Ladrillos de tierra aligerada en la ferial “construction resources”.

En la producción de materiales de tierra, con fibras vegetales como refuerzo, no hay implícita una alta energía primaria incorporada, en comparación con los otros materiales de uso frecuente en albañilería y cerramientos. Para preparar, transportar y trabajar el barro en el sitio se necesita aproximadamente sólo un 10% de la energía requerida para la preparación, transporte y elaboración del hormigón armado o el ladrillo cocido. Tampoco implican una alta emisión de CO2, no hay subproductos inútiles y los productos defectuosos pueden ser devueltos al comienzo del ciclo de la producción o ser reutilizados (Minke y Mahlke, 2001). Los materiales de tierra no presentan un peligro significativo para la salud durante la producción o la construcción (Little y Morton 2001), se pueden considerar de baja toxicidad.

Los bloques de tierra con fibras vegetales como refuerzo, presentan gran potencial de desarrollo y aplicación en el sector de la construcción, requiriendo actualización normativa y revalorización en el medio social reconociendo sus ventajas y desventajas, pues uno de los inconvenientes de la construcción con tierra es que no es un material de construcción estandarizado.

Aportes del uso de fibra lignocelulósica como refuerzo fibroso en la construcción

El uso de fibras vegetales lignocelulósicas procedentes de actividades agro-industriales en la construcción, como recurso material natural, hace un aporte alrededor de este concepto de sostenibilidad. El uso de fibras vegetales naturales es consustancialmente más sano y con menor impacto que el de los materiales sintéticos, aunque hay que prestar atención a niveles de durabilidad y de rendimiento técnico. Las fibras vegetales lignocelulósicas procedentes de explotaciones agro-industriales, como producto o subproducto, pueden suponer una alternativa importante para soportar el aumento de demanda de fibras de madera y como sustituto de fibras como el amianto (asbesto), que presentan graves consecuencias para la salud en su aplicación y posterior uso.

La industrialización ha derivado en un aumento de la producción agrícola y por lo tanto de los productos o subproductos derivados de la misma, lo que nos hace disponer de materia orgánica disponible en abundancia y a muy bajo costo y con el valor ecológico añadido. Las fibras vegetales procedentes de actividades o explotaciones agro-industriales se convierten así en un material sostenible con posibilidades de convertirse, en un futuro inmediato, en una alternativa para introducirlo en la problemática ambiental actual, siguiendo patrones de la arquitectura y sociedad tradicional, pero con un nuevo enfoque y contemporaneidad. Su uso es de bajo impacto ambiental en el entorno local, implica poca energía primaria incorporada en su elaboración, obtención y producción, y baja emisión de CO2 equivalente.

Es un recurso renovable abundante y disponible localmente, baratos (o incluso sin costo), con una menor generación de residuos que los productos sintéticos, con un método de obtención que se puede considerar saludable y ecológico.

Los diferentes productos comerciales o soluciones arquitectónicas a las que se pueden llegar con el uso de las fibras vegetales, presentan una enorme actualidad, adaptándose a líneas diseños modernos y contemporáneos y con unas buenas propiedades térmicas, acústicas y de resistencia.

Existen problemas implícitos como la poca durabilidad, vulnerabilidad a los agentes biológicos, el alto grado de absorción de humedad, y la baja resistencia al fuego, que pueden ser solucionados con un buen proyecto, o buenos montajes mediante soluciones de prefabricados.

Otra problemática a resolver, es la homogeneidad no verificable de sus propiedades, pues dependen de factores como el clima o el método de obtención.

La producción de materiales de procedencia agrícola puede hacer una contribución importante al hacer la agricultura más competitiva y sostenible aumentando el uso eficiente de materias primas y creando nuevos mercados. Esto podía transformar el cultivo y las economías rurales. El desarrollo de la industria agropecuaria depende de la adquisición de estos nuevos mercados.

La paja de cereal tiene buenas propiedades como fibra, y constituye, además de recurso y materia prima para aplicaciones como material de construcción con todas sus posibilidades, una alternativa real a fuentes de energía convencionales, y su uso sería una solución para evitar quemas y la a veces excesiva nitrogenización del suelo que origina su abandono en el campo.

4. METODOLOGÍA

4.1 Conclusiones sobre el estado del arte

Como se especificaba en el capítulo de la fundamentación teórica, la presente propuesta de investigación se fundamenta en un establecimiento final del estado del conocimiento sobre el uso de fibras vegetales lignocelulósicas, en concreto la paja de cereal, como refuerzo fibroso de compósitos, a partir de una matriz en base a tierra estabilizada, y su uso, por medio de la calcinación, como parte del agente estabilizante, para constituir paneles prefabricados. Por lo tanto, como primer paso dentro de la metodología planteamos llegar a unas conclusiones finales certeras sobre el establecimiento del estado del arte, recogiendo una valoración crítica del mismo y señalando las tendencias de la investigación actual que marcan la actual propuesta de investigación.

4.2. Análisis de cultivos potenciales y existentes

La investigación se fundamente en la localización de la producción de cultivos de cereal de cebada, aptos y suficientes como para asumir la producción y desarrollo de paneles prefabricados para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada. Se analiza la disponibilidad y potencial de producción en un entorno geográfico cercano como es la región de El Bajío e Hidalgo.

Por su producción, según el informe del cierre de la producción agrícola por cultivo y por estados del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera en su última edición del 2011, las fibras lignocelulósicas subproductos agrícolas seleccionadas para la presente investigación serán la de la paja de cebada, por su producción y superficie cultivada total, siendo la más importante del país la primera, con un total de 411.202 Ha. cosechadas y teniendo su alta relevancia la segunda por su producción en apoyo a la industria cervecera y en concreto en los estados aledaños de Guanajuato e Hidalgo, que junto con Querétaro suman un total de 124.340 Ha.

Se hace una localización de cultivos de cereal de cebada, aptos y suficientes como para asumir la producción y desarrollo de paneles prefabricados para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada. Se analiza la disponibilidad y potencial de producción en un entorno geográfico cercano como es la región de El Bajío e Hidalgo.

El estudio se realiza a escala municipal. Se estudia el área Se estudia el área establecida por INEGI como áreas potenciales de cultivo de cereal y esta capa se solapa con el mapa georreferenciado de área establecida para agricultura y así se establece la superficie potencial para el global de la posibilidad de producción de cebada para la posterior obtención de su paja y su posible localización. A continuación se realiza un mapeado digital de las áreas dedicadas para el cultivo de la paja de cereal.

Para reflejar las áreas de El Bajío cuantificadas, el estudio se centra en el cálculo de la disponibilidad de paja por unidad de área cultivada (toneladas de paja de cereal por hectárea). Se calcula la cantidad de paja de cereal libre de consumo (Cpb) de acuerdo a la producción de cereal a partir de la siguiente fórmula (Cobreros 2014):

$$Cpb = Pb \times 0.8 \times 0.52,$$

donde Cpb es la cantidad anual de paja libre (t) y Pb es la producción de cereal (cebada) (t).

Como se muestra en la formula anterior, la cantidad de paja generada fue determinada en base a la relación paja/producto, la cual es determinada como 0.8 para el trigo y este coeficiente es tomado como referencia para la paja de cebada. Adicionalmente, es importante anotar que la anterior fórmula se usa para calcular la cantidad de paja abandonada en el campo que es potencialmente aprovechable para propósitos como para la construcción sustentable, energía etc. Hay que restarle el porcentaje de paja que puede ser usado para consumo de alimento para animales, que es considerado el 52% del total del abandonado en el campo (se usa el coeficiente de 0,52). Una vez calculado la cantidad de paja libre disponible en El Bajío por estados, se

calcula la proporción de producción de paja por unidad de superficie cultivada (P) según la siguiente fórmula:

P = Cpb / S (t/ha),

donde P es la proporción de producción de paja por unidad de superficie cultivada, Cpb es la cantidad anual de paja libre (t) y S la superficie de paja cultivada (ha).

Así se obtiene la capacidad de producción de paja de cereal por hectárea, que es la cantidad que usamos para calcular la cantidad de paja libre producida por municipio. Siguiendo la metodología anterior, una vez que se localiza la superificie que puede ser dedicada para el cultivo de cebada en la región de El Bajío, se confirma el dato en relación al dato del 2012 que se obtiene del informe de la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadaría, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México) a partir del dato de las toneladas de paja de cereal que se colecta.

Una vez localizados los cultivos de cereal de trigo y cebada aptos se procederá a adquirir muestras de pajas de cereal de primera calidad siendo transportados desde sus puntos de origen con los debidos permisos, en diferentes partidas y en cantidad suficiente como para poder ser utilizados dentro de una misma partida en los diferentes ensayos y experimentaciones.

4.3 Definición y caracterización de los materiales

4.3.1 Caracterización del refuerzo fibroso del compósito

El estudio de la fibra queda fundamentado a partir de la determinación de las características físicas básicas, químicas y mecánicas de las mismas fibras.

Determinación de características físicas del refuerzo fibroso

- Dimensiones: Según la bibliografía consultada y el sistema de cortado de la fibra se opta por utilizar dos dimensiones de la fibra combinadas. En el estudio con paneles 300x300x60mm se utilizan fibras cortadas por una chipiadora usada en las instalaciones del INIFAP en su campo experimental de El Bajío en Celaya. Las dimensiones de estas fibras van entre 1mm y 50 mm. En los paneles definitivos 300x600x60mm, se utiliza el 50% de estas fibras y el otro 50% son de dimensiones tal y como vienen en las pacas de paja tal y como es colectada la paja en el campo, donde alcanzan dimensiones de hasta 450mm.

+ Densidad: Se calcula la densidad aparente (ρb):

ρb= ρs x ma / ma-ms (kg/m3)

donde ρb es la densidad aparente de la fibra, ρs es la densidad del solvente, ma la masa de la fibra en el aire y ms es la masa de la fibra en el solvente.

Como solvente se usa 100gr de agua destilada donde se introducen 10 gr de fibra de paja de cebada ma (Masa de la fibra en el aire), cortada y seca, y se deja 24 horas para que sature dentro del solvente. Una vez saturada la fibra de paja de cebada se saca del solvente, se escurre y se pesa. Se obtiene la diferencia respecto al peso en seco, que nos dará el valor de ms (Masa de la fibra en el solvente).

- Contenido de humedad: Como paso previo a determinar la capacidad de absorción de las partículas, se realiza una medición de su contenido de humedad en %.

Contenido de humedad (D) en % (Reyes, 2009):

D = ((Mt-Mi)/Mi)x100

donde Mt es la masa total en un tiempo transcurrido t de secado y Mi es la masa previa al secado.

Se usan 100 gr de paja de cereal de cebada cortada (Mi). Se seca en horno a 100℃ dónde se deja por el tiempo necesario hasta s u secado total, comprobado con la técnica de sobreponerle un vidrio reloj y observar que no se produce condensación en el mismo, y se obtiene Mt. Se hacen mediciones a 24, 36 y 48 horas hasta que se observa una masa constante y se hace la comprobación de no condensación por medio del vidrio reloj.

Igualmente se hace una comparativa con el resultado de contenido de humedad que se puede deducir el estudio termogavimétrico que se le realiza a la paja de cereal, suponiendo que la reducción de masa a los 100℃ es debido a la perdida de la humedad, de donde se puede suponer el porcentaje de humedad correspondiente.

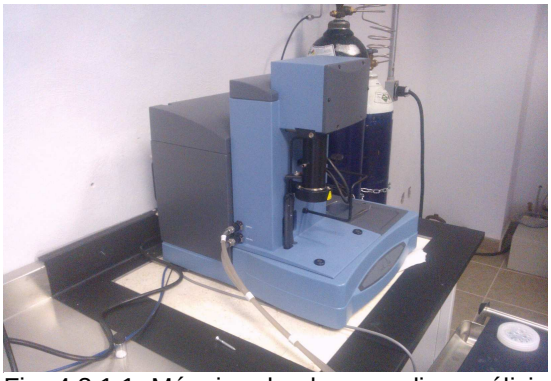


Fig. 4.3.1.1. Máquina donde se realiza análisis termogavimétrico.

- Capacidad de absorción: Tasa de saturación de los vacíos en las partículas con la que se tiene una idea de la cinética de la absorción del agua. Se determina midiendo el aumento de masa (I) al introducir la muestra un tiempo en agua, medido en %.

Capacidad de absorción (I) medido en % (Reyes, 2009):

I = ((Mt-Mo)/Mo)x100

donde Mt es la masa total en un tiempo transcurrido t y Mo la masa previa de partículas secas. Se usan 4 porciones de 100 gr de paja de cereal de cebada cortada y

seca (Mo). Se sumerge en solvente (agua destilada) y se mide su masa (Mt) después de escurrirse a 1/4, 1/2, 1 y 2, 4, 6, 12 Y 24 horas.

- Capacidad de desorción: Una vez saturadas las partículas, se mide su capacidad de secado, Decremento (De) de masa.

Capacidad de desorción (De) (Reyes, 2009):

De = ((Mt-Ms)/Ms) x100

donde Mt es la masa total en un tiempo transcurrido t y Ms la masa de partículas saturadas.

Se usan 10 porciones de 100 gr de paja de cereal de cebada cortada y saturada previamente al haber sido sumergidas durante 24 horas en solvente (Ms). Se secan en horno a 100℃ y se mide su masa (Mt) a 1/4, 1/2, 1 y 2, 4, 6, 12 Y 24 horas.

Determinación de características mecánica

Tanto la medición de la elongación como la medición de resistencia a tracción se realizan en la máquina universal (Tinius Olsen 30t), que dispone el laboratorio de física y química de la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Se utilizan unas mordazas de acero inoxidable con ranurado para mayor agarre de la fibra (Fig). Se utilizan probetas de fibra cortadas en longitudes que no contengan nudos de más de 75mm (Fig.). Se introducen 35mm de la probeta dentro de la mordaza que se aprieta a tope hasta dejar totalmente aplastada la fibra (Fig.). La fibra se mide con



Fig. 4.3.1.2. Mordazas acopladas a máquina universal.

micrómetro para determinar su grosor (Fig.) y espesor (Fig.).



Fig. 4.3.1.3. Probetas de paja de cebada objetos de estudio.

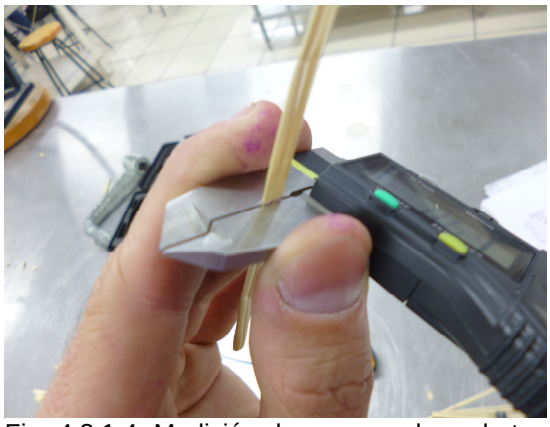


Fig. 4.3.1.4. Medición de espesor de probetas de paja de cebada.

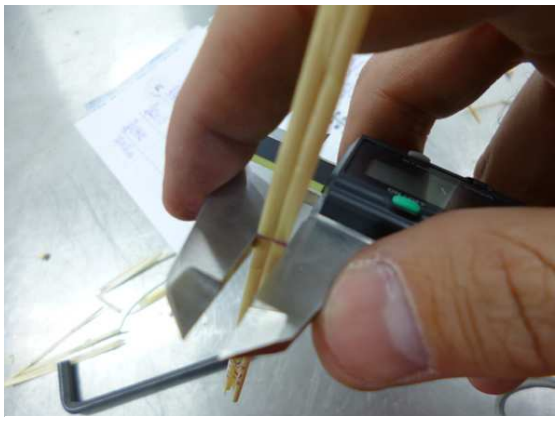


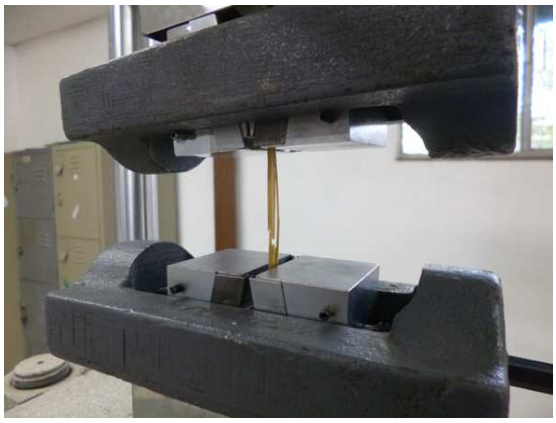
Fig. 4.3.1.5. Medición de grosor de probetas de paja de cebada.

- La medición de la elongación: Un problema importante para la medida de la tensión es la medición exacta de la elongación de la fibra. La significancia del efecto de este problema y su test es dependiente de la construcción de la abrazadera para el ensayo, de la superficie de esta y de la presión con la que agarra. La otra contribución es por la variación real de la longitud de la fibra (ΔL).

La medición de la elongación: Se tiene en cuenta la parte del deslizamiento de la fibra fuera de la abrazadera (ΔLc) que contribuye al cambio de longitud total (ΔLtot) en el experimento de resistencia a tracción. La otra contribución es por la variación real de la longitud de la fibra (ΔL) (Nechwatal et al., 2003).

$$\Delta L_{tot} = \Delta L_c + \Delta L$$

donde ΔLtot es el cambio de longitud total, ΔLc es la parte del deslizamiento de la fibra fuera de la abrazadera y ΔL la variación real de la longitud de la fibra.


Fig. 4.1.2.1.6. Ejemplo de rotura de probeta de paja de cebada.

- Resistencia a tracción: Estudio necesario y vital para entender el comportamiento de las fibras como refuerzos del compósito. La matriz transfiere parte del esfuerzo a la fibra, soportando parte del esfuerzo del conjunto del compósito. La interacción entre fibra y matriz no ocurre a nivel atómico o molecular, si no que se puede describir mediante mecánica continua. La longitud de la fibra también afecta a como esta se acomoda y se alinea en la matriz: las fibras cortas son muy difíciles de alinear y se quedan organizadas de forma aleatoria. Se analizará la relación l/d desde el punto de vista mecánico, donde l es la longitud de la fibra y d su diámetro, pues es conocido que el aumento en la relación l/d aumenta el área de la superficie específica disponible para transferir tensiones de la matriz a las fibras (Cyras, 2001).

La máxima resistencia a tracción (σ) será calculada según la ecuación (González-Murillo, 2003):

$\sigma = F/ c$ [5.8],

donde F es la fuerza aplicada hasta la ruptura (N) y c es el área de la sección transversal (mm2).

Determinación de características químicas del refuerzo fibroso, características mineralógicas y morfología microestructural

- Microscopías de Escaneo Electrónico (SEM): Análisis mediante Microscopia de Escaneo Electrónico (SEM). El Microscopio Electrónico de Barrido es un microscopio que utiliza electrones como fuente luminosa, el cual es generado por el cañón electrónico, el haz electrónico es enfocado por lentes electromagnéticas. El haz electrónico, al incidir sobre el material, genera diferentes tipos de radiación. Cada radiación puede ser captada por un detector específico. Se pueden captar electrones

secundarios pues e cuenta con un lector de electrones secundarios y otro de electrones retro-dispersos. En ambos caso las imágenes son generadas por un programa de computadora.

El Análisis mediante Microscopia de Escaneo Electrónico (SEM) se lleva a cabo en un equipo JEOL JSM-6060LV, un tamaño de objetivo de 45, WD 8, acel. De 20V y un Micron-Marker de 10µm.



Fig. 4.3.1.7. Introducción de muestras en equipo para análisis SEM.

- Química proximal: Determinación de la composición proximal por medio de Análisis de Química Proximal (PCA). Se caracteriza la paja de cereal en su determinación de contenido en fibra, grasas, proteínas, carbohidratos y ceniza.

- Análisis termogavimétrico (TGA): Se realiza un análisis termogavimétrico para determinar los cambios químicos y físicos con la medición de la variación de la masa del material como función de la temperatura, determinando la posibilidad de cambio de fase y el contenido de humedad.

- Difracción de Rayos X (DRX): Se detectan las diferentes fases y componentes cristalinas en la muestra. El análisis de difracción de rayos X por ángulo amplio es llevado a cabo en un difractómetro.

El análisis de difracción de rayos X por ángulo amplio es llevado a cabo en un difractómetro Rigaku Ultima IV con condiciones de operación de 40KV y 30mA, con una longitud de onda de la radiación CuKα de λ= 1.5406 Å. Los datos fueron recopilados entre 5 y 80º a una escala de 2θ scale con el detector Solid State D/teX-ULTRA Detector y a una velocidad de 10º⁄min y un samplead o de 0.02 sec. Se usa el software de análisis de espectro MDI Jade V 5.0.37. La muestra que se introduce para analizar ha sido tamizada por la malla #200 y secada previamente.

4.3.2 Caracterización de la matriz del compósito: suelo arcilloso

En un entorno regional cercano los tipos de suelo que existen aptos para su utilización como materiales de construcción son arcillosos y limo-arcillosos. Una composición típica de un suelo arcilloso es el de $Al_2O_3xK_2Ox6SiO_2$ (Minke, 2001). Si la mezcla de tierra final a ensayar contiene demasiada fracción de arena gruesa, se puede corregir el tamaño de la partícula añadiendo arcilla con disponibilidad en la región (Lima et al., 2012). En el presente trabajo de investigación se optará por estabilizar la tierra y reforzarlo con fibra para cumplir con los estándares necesarios requeridos en el mercado que ciertos productos sin estabilizar no podrían pasar (Zami, Lee, 2010) y para evitar las fracturas por retracción en el proceso de secado, reducir la plasticidad, mejorar la trabajabilidad, la resistencia, la resistencia a erosión, y con ello, lograr mayor durabilidad (Reddy, 2007). Con que se ha concluido que la tierra estabilizada con cemento puede causar contaminación aérea y que se necesitan más estudios con estabilizantes no basados en el cemento portland (Zami y Lee, 2010), en el presente trabajo de investigación se pretende analizar la estabilización con cal hidráulica ($Ca(OH)_2$) combinada con componentes puzolánicos como la ceniza volante, ceniza de paja de cereal de paja y trigo, ceniza volcánica y residuos en forma de polvo de arcilla de ladrillo calcinado, que también pueden mejorar las propiedades físico-mecánicas del compuesto, debido a que reducen la porosidad y la permeabilidad del mismo (Stancato *et al.,* 2005).

Si la porción de arcilla es significante, como es el caso de la mayoría de los suelos en la región, la mejora química debido a la cal es muy efectiva debido a la reacción entre los componentes cálcicos y el componente puzolánico, que es activado por la misma (Cristelo *et al.,* 2012). Se puede describir la activación alcalina, producida por la cal, como un proceso de poli-condensación donde el sílice (SiO_2) y la alumina (AlO_4) tetraedro interconectan y comparten iones de oxígeno. Al mismo tiempo, los cationes Na+, K+ y Ca2+ actúan como bloques de construcción de la estructura. La estructura polimérica resultante de unión entre Al-O-Si es la principal estructura del nuevo material, que resultaría con características muy similares, a nivel molecular, a las

rocas naturales. El activador alcalino, el componente puzolánico y el suelo pueden ser mezclados con una consistencia acuosa, como para ser vertida en moldes, vibrada y así evitar el gasto de ninguna energía en compactación (Cristelo *et al.,* 2012).



Fig. 4.3.2.1. Muestras de suelo arcilloso que son caracterizadas.

Una vez localizados los diferentes tipos de suelo adecuados para su uso en la construcción según se procedió a adquirir muestras de suelo arcilloso y limo arcillosos de baja alcalinidad, siendo transportados desde sus puntos de origen con los debidos permisos, en diferentes partidas y en cantidad suficiente como para poder ser utilizados en los diferentes ensayos y experimentaciones.

Se hace análisis sobre muestras de las siguientes procedencias, que le darán nombre a las muestras como tales para consiguientes estudios, La Solana, San Nicolás A, San Nicolás B y Amealco.

Determinación de características químicas y mineralógicas.

- Difracción de Rayos X (DRX). El análisis de difracción de rayos X por ángulo amplio es llevado a cabo en un difractómetro Rigaku Ultima IV con condiciones de operación de 40KV y 30mA, con una longitud de onda de la radiación CuKα de λ= 1.5406 Å. Los datos fueron recopilados entre 5 y 80º a una escala de 2θ scale con el detector Solid State D/teX-ULTRA Detector y a una velocidad de 10º/min y un sampleado de 0.02 sec. Se usa el software de análisis de espectro MDI Jade V 5.0.37.

La muestra que se introduce para analizar ha sido tamizada por la malla #200 y secada previamente.

Determinación de características físicas básicas

- Granulometría por mallas: se hace sobre una muestra significativa de 5 kg secada al aire libre, homogeneizada y cuarteada de manera convencional según Sahop 1974. El material se criba a través de la malla #4 y tanto el material retenido como el que pasa por ella se pesa. Las muestras de campo que se usan están dentro del margen que establece la norma ASTM D2487-93.

Se establece la distribución de los tamaños de partículas mayores a la malla #4, utilizando las mallas de 75mm, 19mm, la #4 (4.76mm), la #8 (2.38mm), la #16 (1.19mm), la # 30 (0.59mm), la # 50 (0.297mm), la # 100 (0.149mm) y la #200 (0.074mm). Posteriormente se establece la distribución de tamaños de partículas menores a la malla #4 y mayores a la malla #200. Se calculan posteriormente el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura para su evaluación.

También se obtienen el porcentaje en finos (%f), de lo que pasa por la malla #200 (Wf) y el porcentaje de arenas (%a) todo lo que se retiene por encima de esta malla (Wa), descontando el contenido en gravas (Wg).

Wf= Ws-Wa-Wg

donde Ws es el peso total de la muestra seca, Wa el porcentaje de arenas (%a) todo lo que se retiene por encima de esta malla, Wg el contenido en gravas y Wf el porcentaje en finos (%f), de lo que pasa por la malla #200.

%f= (Wfx100)/Ws

%s= (Wax100)/Ws

+ Límite líquido (LL). Se define como el contenido de agua que tiene que tener el suelo si al ser colocado en la Copa de Casagrande la ranura que se hace sobre el suelo se cierra una longitud de 13mm a 25 golpes (a dos golpes por segundo). A partir

del número de golpes y su contenidos en agua correspondiente, se hace un gráfico semilogarítmico o curva de fluidez que nos permitirá determinar el límite líquido con precisión. 200 g de muestra de suelo se extiende en la copa de Casagrande de manera homogénea con 8mm de espesor a partir del punto más profundo de la copa de Casagrande dejando una ranura en la parte central (ASTM D 4318-93).

Se debe determinar la humedad del suelo a los 25 golpes, que es la consistencia requerida para poder obtener el límite de contracción y la contracción lineal. Con los resultados de humedad y el número de golpes se traza la curva de fluidez y se determina el límite líquido (L), según la ecuación (Bowles, 1978):

$$L = FwlogN+C$$

donde Fw es el índice de fluidez definido como la pendiente de la curva, que es negativo, C una constante que representa el contenido de agua correspondiente a 1 golpe en % y N el número de golpes.

+ Índice de contracción lineal (CL). Se realiza sobre una muestra de una barra con el grado de humedad según la norma que haga que la muestra se encuentre en su límite líquido, que se vierte en el molde de contracción lineal o Caja de Petri en tres capas, con una altura y base entorno a los 20mm y una longitud entorno a los 100mm. Se toman medidas de las dimensiones de la barra antes y después de secarse, que se seca al aire libre solamente cubierta la muestra con una franela durante 2 días y luego en el horno a una temperatura de 110℃ durante un p eriodo de 12 a 15 horas.

La contracción lineal (CL) del suelo se calcula según la fórmula:

$$CL= ((Lo-Lf)/Lo)x100$$

donde Lo es la longitud inicial de la barra en cms y Lf la longitud final de la barra en cms.

+ Límite de contracción (LC). A partir del ensayo que nos determina la humedad de la muestra en su límite líquido, que compara el peso al límite líquido de la muestra

con el peso de la muestra seca. El límite de contracción (LC) en % se calcula a partir de la siguiente fórmula:

LC= (Wm-Ws-γo (V1-V2)/Ws)x100

donde, Wm es el peso de la muestra en estado líquido (g), Ws el peso de la muestra seca (g), V1 el volumen inicial de la muestra igual al volumen interior de la caja de Petri (cm3), V2 el volumen final de la muestra una vez secada al horno (cm3) y γo el peso específico del agua (0,001kg/cm3).

4.3.3 Caracterización de la matriz del compósito: puzolanas

Se estudiará la ceniza de paja de cebada procedente como residuo agrícola y se establecerá una comparativa con otras puzolanas artificiales y naturales del entorno geográfico cercano como son la ceniza de paja de trigo, el polvo de ladrillo, ceniza volante y ceniza volcánica procedente del Popocatepl.



Fig. 4.3.3.1. Muestras de las puzolanas que son caracterizadas

Tabla 4.3.3.1. Materiales puzolánicos caracterizados

Sigla	Producto	Origen y métodos de obtención
BD	polvo de ladrillo de arcilla cocida	procedente de una planta de producción tradicional de la región.
FA	ceniza de volcán	colectada de la última erupción, en junio del 2013, del volcán Popocatépetl en el estado de Puebla (México) y a partir de arena de volcán colectada en las faldas del mismo volcán.
VA	ceniza volante	recogida como residuo de una planta carbono-eléctrica en el estado de Coahuila (México).
BSA	ceniza de paja de cebada	procedente de planta de cebada de la región de 'El Bajío (México), calcinada en el exterior sin control de temperaturas y tiempos de quema, buscando reproducir la quema convencional según los agricultores de la región.
WSA	ceniza de la paja de trigo	procedente de planta de cebada de la región de 'El Bajío' (México), calcinada en el exterior sin control de temperaturas y tiempos de quema.

Determinación de características químicas, mineralógicas y fases cristalinas

- Fluorescencias de Rayos X: Análisis de composición química a partir del Análisis Elemental por Trazas por medio de Micro-Fluorescencias de Rayos X (XRF). Se usa un Micro-Spot X-Trace de alto rendimiento para el equipo de Microscopía de Escaneo Electrónico (SEM) de la marca Bruker modelo XL 30 ESEM. Se muestran los contenidos en porcentaje de masa de los diferentes elementos químicos que componen la muestra, sin detectarse en este tipo de análisis el Carbono (C), ni el Oxígeno (O).

- Fases cristalinas por Difracción de Rayos X (DRX): Se detectan las diferentes fases y componentes cristalinas en la muestra de material puzolánico. El análisis de difracción de rayos X por ángulo amplio es llevado a cabo en un difractómetro Rigaku Ultima IV con condiciones de operación de 40KV y 30mA, con una longitud de onda de la radiación CuKα de λ= 1.5406 Å. Los datos fueron recopilados entre 5 y 80º a una escala de 2θ scale con el detector Solid State D/teX-ULTRA Detector y a una velocidad de 10º/min y un sampleado de 0.02 sec. Se usa el so ftware de análisis de espectro MDI Jade V 5.0.37.

Se estudia igualmente el porcentaje de fases cristalinas del material en porcentaje y su porcentaje de carácter amorfo con el programa de computadora PDXL2 V 2.1.3.4.

- Espectroscopia de Energía Dispersiva (SEM-EDS): A partir de imágenes procedentes de Microscopía de Escaneo Electrónico se determina un análisis químico cuantitativo de partículas concretas características detectadas por medio del análisis de Espectroscopía de Energía Dispersiva (SEM-EDS). Se logra un análisis químico elemental cuantitativo y cuantificado en porcentajes de masa. En este tipo de análisis si se detectan elementos como el Carbono (C), ni el Oxígeno (O).

- Determinación de morfología micro-estructural: Análisis mediante Microscopia de Escaneo Electrónico (SEM). El Microscopio Electrónico de Barrido es un microscopio que utiliza electrones como fuente luminosa, el cual es generado por el cañón electrónico, el haz electrónico es enfocado por lentes electromagnéticas. El haz electrónico, al incidir sobre el material, genera diferentes tipos de radiación. Cada radiación puede ser captada por un detector específico. Se pueden captar electrones secundarios pues e cuenta con un lector de electrones secundarios y otro de electrones retro-dispersos. En ambos caso las imágenes son generadas por un programa de computadora. El Análisis mediante Microscopia de Escaneo Electrónico (SEM) se lleva a cabo en un equipo JEOL JSM-6060LV, un tamaño de objetivo de 45, WD 8, acel. De 20V y un Micron-Marker de 10µm.

Análisis de la actividad puzolánica

- Fracción Soluble en Agua (WSF): Se procede a partir de una muestra molida de 10gr. de puzolana seca (secada hasta un peso constante en un horno de secado a temperaturas entre 105 y 110ºC). Esta muestra se coloca en un frasco Erlenmeyer y se le añade 100 ml. De agua destilada a una temperatura de 23ºC +/- 2ºC. Se agita bien a mano hasta que no se observan terrones ni cúmulos. A continuación se agita la solución durante 1 hora por medio de un agitador mecánico a temperatura ambiente de laboratorio. Se vierte sobre un crisol de vidrio reloj y se tira la parte de la solución

dejando los residuos de la muestra que no se han llegado a diluir. El crisol con este resto de muestra se seca y se lleva a peso constante en un horno de secado a una temperatura de 105ºC por 24 horas. Se pesa lo que queda de muestra seca y el porcentaje de Fracción Soluble en Agua se calcula multiplicando la pérdida de peso de la muestra en gramos por 10.

- Tamaño de partícula (PS). Se estudia tamizando 100gr. de puzolana seca en los tamices 4 (4.75mm), 8 (2.36mm), 16 (1.18mm), 30 (600 µm), 50 (300 µm), 100 (150 µm) and 200 (75µm). Se calcula la retención parcial y la retención acumulativa, prestando atención a lo retenido en los tamices 30 y 200.

- Distribución por intensidad del tamaño de partículas finas (SDI). Se estudia el porcentaje de partículas en relación al diámetro de las partículas de puzolana seca previamente tamizada por la malla 200. Se usa 0.50mgr. de puzolana seca dispersada en agua destilada. El estudio se realiza en un Zetrómetro Zetasizer Nano S, a 25ºC durante 60 segundos con una medida de posición de 1.25mm.

- Desarrollo de resistencia de la mezcla puzolana-cal-arena, adaptación basada en la ASTM C 593-95 (Reapproved 2000). De acuerdo a las proporciones aplicables del método de test C 109 y C 305 de la ASTM, se preparan 3 especímenes para 2 diferentes tiempos de curado, en total 6, en una proporción de 180gr. de cal hidratada, 360 gramos de puzolana seca y 1480 gramos de arena bien graduada. La cantidad de agua de la mezcla, medida en mililitros, es la adecuada para generar una fluidez de entre 65 y 75, expresado en porcentaje de la combinación entre la cal y la puzolana y de acuerdo al test de fluidez C 109 de la ASTM, excepto que se darán 10 golpes en 6 segundos sobre la mesa de fluidez, en vez de 25 en 15 segundos. La cal y la puzolana se mezclan con el agua y luego la mezcla completa se moldea en cilindro de 5 centímetros de diámetro por 10 de altura. Cuando el moldeado se completa con la parte superior cubierta para proteger la parte superior del escurrimiento se meten inmediatamente en un horno a una temperatura de 54ºC +/- 5ºC en ambiente saturado. Luego se sacan las muestras, se desmoldan para meterlos en una cámara con temperatura 23 +/- 5℃ y una humedad relativa entre 95% y 100%.

Se realiza una prueba a compresión simple a los 7 días justo recién sacadas las muestras del horno y otros 21 días más tarde y se estudia la evolución de la resistencia a compresión simple en estas condiciones controladas.

- Medición de la conductividad eléctrica de una solución de cal y puzolana mezcla, su evolución en el tiempo y la obtención de los parámetros cinéticos. Método de medición de conductividad eléctrica y relación con la reacción cinética entre la cal (Hidróxido de calcio) y la puzolana (Villar-Cociña *et al.* 2008; Villar-Cociña *et al.* 2011). Este método estudia la continuidad en la evolución de la variación de la conductividad en el tiempo de una solución de hidróxido de calcio y una puzolana. Se mezcla 100ml de una solución saturada de hidróxido de calcio Ca(OH)2 con 2.10 gramos de puzolana agitados por medio de un agitador magnético. La solución se realiza mezclando el Ca(OH)2 en agua desdionizada hasta conseguir una solución saturada. Luego se deja reposar la solución 24 horas, cuando es mezclado con la puzolana y se empieza a medir la conductividad inmediatamente por un periodo de no menos de 28 días (675 horas). La medición se realiza un con sensor de conductividad de la marca PASCO modelo PS-2116 para soluciones acuosas, a una temperatura ambiente de 25ºC+/-2 ºC.

La actividad puzolánica se muestra como la relación entre las variaciones de la conductividad (µS/cm) de la solución y el tiempo transcurrido. La conductividad desciende debido a la reacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio, que hace decrecer la concentración de CH y, por lo tanto, hace decrecer la conductividad eléctrica (Villar-Cociña *et al.* 2008).

+ Evolución de las fases cristalinas y composición mineralógica dentro de la reacción puzolana-cal por medio de Difracción de rayos X. Fases cristalinas por Difracción de Rayos X (DRX): Se detectan las diferentes fases y componentes cristalinas en la muestra de material puzolánico. El análisis de difracción de rayos X por ángulo amplio es llevado a cabo en un difractómetro Rigaku Ultima IV con condiciones de operación de 40KV y 30mA, con una longitud de onda de la radiación CuKα de λ= 1.5406 Å. Los datos fueron recopilados entre 5 y 80º a una escala de 2θ scale con el

detector Solid State D/teX-ULTRA Detector y a una velocidad de 10º/min y un sampleado de 0.02 sec. Se usa el software de análisis de espectro MDI Jade V 5.0.37.

+ Evolución de la morfología microestructural dentro de la reacción puzolana-cal por medio Escaneo de Microscopia Electrónica. Análisis mediante Microscopia de Escaneo Electrónico (SEM). El Microscopio Electrónico de Barrido es un microscopio que utiliza electrones como fuente luminosa, el cual es generado por el cañón electrónico, el haz electrónico es enfocado por lentes electromagnéticas. El haz electrónico, al incidir sobre el material, genera diferentes tipos de radiación. Cada radiación puede ser captada por un detector específico. Se pueden captar electrones secundarios pues e cuenta con un lector de electrones secundarios y otro de electrones retrodispersos. En ambos caso las imágenes son generadas por un programa de computadora. El Análisis mediante Microscopia de Escaneo Electrónico (SEM) se lleva a cabo en un equipo JEOL JSM-6060LV, un tamaño de objetivo de 45, WD 8, acel. de 20V y un Micron-Marker de 10µm.

4.4 Caracterización del compósito

4.4.1 Definición, diseño definitivo y preparación de la campaña experimental

La caracterización se realizará en dos campañas de ensayos y experimentación. Una primera preliminar, a partir de los resultados obtenidos en la caracterización del refuerzo fibroso y el suelo arcilloso, y en paralelo al análisis de la actividad puzolánica, se realizan una serie de pruebas preliminares de resistencia a compresión sobre cilindros de 5cm. de diámetro por 10 de altura, para a partir de estos resultados preliminares realizar una segunda campaña con un número de muestras menor, según los primeros resultados, pero con un mínimo de muestras suficientes como para poder determinar resultados fundamentados estadísticamente.

Posteriormente se realizará una prueba definitiva a partir del análisis de los mejores resultados de las pruebas preliminares, de resistencia a compresión sobre cilindros de 10cm. de diámetro por 10 de altura y de resistencia a flexo-compresión sobre paneles de 30x30x6cm. En la tabla 4 y 5 se muestra una relación de dosificaciones de las diferentes mezclas ensayadas, especificadas en porcentaje sobre peso seco de las partes. La cantidad de agua de la mezcla, medida en mililitros, es la adecuada para generar una fluidez de entre 65 y 75, expresado en porcentaje de la combinación entre la cal y la puzolana y de acuerdo al test de fluidez C 109 / C109M (2013) de la ASTM. Las mezclan son vertidas dentro de sus moldes en 3 tantos, amasadas y distribuidas dentro del molde con una barra con punta de bala de ¾ de pulgada en el caso de los cilindros 5x10 para las pruebas preliminares, y de ½ pulgada para el resto. Finalmente la mezcla es vibrada manualmente una vez completado el llenado del molde.

Tabla 4.4.1.1. Relación de los materiales componentes del compuesto arcilloso estudiado

Sigla	Producto	Origen y métodos de obtención
L	cal hidratada	producto comercial procedente de una planta de producción regional.
A	arena	producto comercial de producción regional.
AV	arena volcánica	arena del volcán Popocatépetl en el estado de Puebla (México), colectada en las faldas del mismo volcán.

AR	arenilla	producto comercial de producción regional.
SA	suelo arcilloso	extraído de suelo de terreno de la localidad cercana a Querétaro de La Solana.
PC	paja de cereal	paja de cereal de cebada recolectada en campo experimental INIFAP-Campo Experimental Bajío, Celaya.

Definición de dosificaciones preliminares

Tabla 4.4.1.2. Relación de los materiales puzolánicos estudiados en la fase preliminar.

SIGLAS	DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA
PRE01.01	CEMENTANTE:30% (L:100%) + SUELO:70%(A:100%)
PRE01.02	CEMENTANTE:30% (L:80%+BD:20%) + SUELO:70%(A:100%)
PRE01.03	CEMENTANTE:30% (L:80%+BSA:20%) + SUELO:70%(A:100%)
PRE01.04	CEMENTANTE:30% (L:80%+FA:20%) + SUELO:70%(A:100%)
PRE01.05	CEMENTANTE:24% (L:80%+BD:20%) + SUELO:76%(A:60%+SA:40%)
PRE01.06	CEMENTANTE:24% (L:80%+BSA:20%) + SUELO:76%(A:60%+SA:40%)
PRE01.07	CEMENTANTE:24% (L:80%+FA:20%) + SUELO:76%(A:60%+SA:40%)
PRE01.08	CEMENTANTE:50% (L:50%+BD:50%) + SUELO:50%(A:70%+SA:30%)
PRE01.09	CEMENTANTE:50% (L:50%+BSA:50%) + SUELO:50%(A:70%+SA:30%)
PRE01.10	CEMENTANTE:50% (L:50%+FA:50%) + SUELO:50%(A:70%+SA:30%)
PRE01.11	CEMENTANTE:30% (L:100%) + SUELO:70%(A:70%+SA:30%)
PRE01.12	PC:2% + CEMENTANTE:29% (L:100%) + SUELO:69%(A:69%+SA:31%)
PRE01.13	PC:4% + CEMENTANTE:28% (L:100%) + SUELO:68%(A:68%+SA:32%)
PRE01.14	CEMENTANTE:30% (L:70%+BD:30%) + SUELO:70%(A:70%+SA:30%)
PRE01.15	PC:2% + CEMENTANTE:29% (L:70%+BD:30%) + SUELO:69%(A:70%+SA:30%)
PRE01.16	PC:4% + CEMENTANTE:28% (L:70%+BD:30%) + SUELO:68%(A:70%+SA:30%)
PRE01.17	CEMENTANTE:30% (L:70%+BSA:30%) + SUELO:70%(A:70%+SA:30%)
PRE01.18	PC:2% + CEMENTANTE:29% (L:70%+BSA:30%) + SUELO:69%(A:70%+SA:30%)
PRE01.19	PC:4% + CEMENTANTE:28% (L:70%+BSA:30%) + SUELO:68%(A:70%+SA:30%)
PRE01.20	CEMENTANTE:30% (L:70%+FA:30%) + SUELO:70%(A:70%+SA:30%)
PRE01.21	PC:2% + CEMENTANTE:29% (L:70%+FA:30%) + SUELO:69%(A:70%+SA:30%)
PRE01.22	PC:4% + CEMENTANTE:28% (L:70%+FA:30%) + SUELO:68%(A:70%+SA:30%)

Definición de dosificaciones finales

Tabla 4.4.1.3. Relación dosificaciones utilizadas en pruebas de caracterización mecánica de los compuestos en su fase final.

SIGLAS	DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA
P01.01	SUELO: (A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P01.02	PC:2% + SUELO:98%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P01.03	PC:4% + SUELO:96%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P02.01	CEMENTANTE:10% (L:100%) + SUELO:90%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)

P02.02	PC:2% + CEMENTANTE:9% (L:100%) + SUELO:89%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P02.03	PC:4% + CEMENTANTE:8% (L:100%) + SUELO:88%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P03.01	CEMENTANTE:30% (L:50%+BD:50%) + SUELO:70%(AR:60%+SA:40%)
P03.02	PC:2% + CEMENTANTE:29% (L:50%+BD:50%) + SUELO:69%(AR:60%+SA:40%)
P03.03	PC:4% + CEMENTANTE:28% (L:50%+BD:50%) + SUELO:68%(AR:60%+SA:40%)
P04.01	CEMENTANTE:30% (L:50%+FA:50%) + SUELO:70%(AR:60%+SA:40%)
P04.02	PC:2% + CEMENTANTE:29% (L:50%+FA:50%) + SUELO:69%(AR:60%+SA:40%)
P04.03	PC:4% + CEMENTANTE:28% (L:50%+FA:50%) + SUELO:68%(AR:60%+SA:40%)

4.4.2 Desarrollo de la campaña experimental para la caracterización del compósito

Determinación de características físicas básicas del compósito

- Determinación de la densidad: Según la norma, se define la densidad como:

$\rho = m/V$ (kg/m3),

donde, m es la masa de la muestra y V el volumen de la muestra.

Determinación de características mecánicas básicas

- Resistencia a comprensión: Se estudiará mediante la aplicación hasta rotura de una carga uniformemente repartida. Los ensayos de resistencia a compresión se realizarán según lo establecido por la norma ASTM E761 - 92(2005):

$Rc = Fc/S$ (N/mm2),

donde, Rc es la resistencia a compresión, Fc la carga máxima a rotura (N) y S la superficie de la base sobre la que se aplica la carga.

Los ensayos se realizarán con la misma máquina que los ensayo a flexo-tracción, con probetas cilíndricas de 100 mm de alto y 50 mm de diámetro para las pruebas preliminares y de 200mm de alto y 100 de diámetro para las pruebas finales. En el caso de los cilindros 100x200mm el cabeceado se hace mediante cabeceadores metálicos normalizados de la marca TK con cavidad de 10cm. de diámetro con base de neopreno de ½ pulgada de grosor.



Fig. 4.4.2.1. Imagen de cilindro 100x200 para prueba a compresión.

+ Resistencia a flexo-comprensión: El ensayo se realiza sobre el lado más pequeño de paneles de 60x300x300mm en posición vertical. El cabeceado se hace con una base de neopreno de ½ pulgada de grosor y de 6x30cm., cubriendo toda la superficie de la base, sobre la que se coloca otra lámina de neopreno de las mismas características sobre la que se coloca una placa de acero de ½ pulgada de grosor sobre el que la máquina universal hará la presión. La resistencia a carga máxima se determina según la siguiente ecuación:



Fig. 4.4.2.2. Imagen de panel 300x300x60 para prueba a flexo-compresión.

Rfc= Ffc/S (N/mm2),

donde, Rfc es la resistencia a compresión, Ffc es la carga máxima a rotura (N) y S la superficie de la base sobre la que

se aplica la carga.

Determinación de la durabilidad del material

Se plantea establecer marco hipotético de condiciones climáticas a las que se verá sometido el material. Ensayo acelerado como acción violenta y concentrada en el tiempo de los factores de alteración de un compuesto.

- Capacidad de absorción de agua (UNE EN 12859:2009): Tras un secado a 100℃, donde se alcanza una masa constante, se mide cuanta agua es absorbida por el material sumergiéndolo en agua durante un tiempo establecido. La capacidad de absorción capilar se obtiene usando un espécimen cilíndrico de 5mm de diámetro x 10mm de altura, que fue inicialmente secado en un horno a 100℃ hasta que se alcance una masa constante(Reyes, 2009; Silva et al., 2010).

Cualquier método de envejecimiento acelerado tiene que considerar los cambios por absorción de humedad que es capaz de resistir la muestra estudiada, de tal manera que se pueda analizar que sucede al someter al sistema de poros de un material a cambios de mojado y secado.

Se hace un ensayo de absorción, estudiándose el tiempo que se necesita para alcanzar el nivel de saturación, se mide a 1/4h, 1/2h, 3/4h, 1h, 2h, 4h y 6h, estudiándose el peso en diferentes tiempos hasta que se adquiere masa constante. Posteriormente se hace un ensayo de desorción donde se observa el tiempo que tarda el compuesto en secarse completamente, midiéndose a 1/4h, 1/2h, 3/4h, 1h, 2h, 4h, 6h, 12h, 24h, 48h, 72h, 86 y 110h en ambiente exterior y 1/4h, 1/2h, 3/4h, 1h, 2h, 4h, 6h, 12h, 24h en un horno a 110℃ +-5℃.

Se toma de referencia, para el tiempo de absorción, los tiempos de saturación del cemento portland, que a las 2 horas alcanza el 95% de saturación y completa a las 48 h, y de un compósito en base a la cal que alcanza la saturación máxima a los 50min. (Reyes, 2009).

Se espera experimentar una disminución de la masa tras los diferentes ciclos de absorción-saturación y secado, debido a la disolución en agua de la materia. Igualmente se afecta a la durabilidad pues por medio de los poros del compuesto se expone a la fibra a un contacto directo con un ambiente alcalino que termina degradándola (Toledo Filho et al., 2000). Es de esperar una diferencia en los procesos de absorción y desorción según la diferente cantidad de fibras en el compuesto (Reyes, 2009).

Absorción en 24 horas: consiste en determinar la cantidad de agua absorbida por el espécimen en 24 hrs. Del peso de la inmersión total de la pieza, según se especifica en la norma NOM-000-SCFI-1994, restando el peso inicial seco, se obtiene el peso del agua absorbida cuyo porcentaje se da en función del peso seco; limitado entre el 9% y el 20% por normativa.

$$absorción = \frac{W_{24h} - W_s}{W_s} \times 100 \geq 9\% \leq 20\%$$

Donde W24h es el peso de agua absorbida después de 24 horas de inmersión en agua fría y Ws es el Peso Seco de la Pieza.

- Método de envejecimiento acelerado, Ciclos de Mojado y Secado (Reyes, 2009; Soroushian, Hassan, 2012): Sometimiento a ciclos de mojado y secado con el fin de acelerar el proceso de desgaste de las fibras.

Se realiza un ciclo de mojado durante 6 horas. Posteriormente las probetas se secan al exterior, durante un periodo de 42 horas, con lo que se cumple un ciclo completo de 48 horas en ambiente exterior y el tiempo necesario en horno, según el resultado de desorción y secado previo. Posteriormente se vuelven a sumergir en agua y se completan 24 ciclos completos de mojado-secado (Reyes, 2009).

En cada uno de los ciclos se toma registro de la pérdida de masa, hasta el final de los ciclos.

Una vez terminados los 24 ciclos completos de mojado-secado, se realiza una comparativa visual a partir de imágenes digitales y se realiza un test de resistencia a compresión y se realiza una comparativa con respecto a la misma probeta si haber sido sometida a los ciclos de secado y mojado.

- Método de envejecimiento acelerado, Ciclos de Mojado y Secado en ambiente sulfatado: Se determina el cambio de dimensión del compuesto inmerso en una solución de sulfato. Este ensayo se usa para simular el comportamiento del compuesto en un ambiente sulfatado. Adaptación del Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate (C 88 – 99a).

Se prepara la solución de sulfato con un contenido de 215 g de Na2SO4 disuelto en 1000mL. Se prepara la solución y se deja reposar por 48 h almacenado a 23℃ +- 2℃. Se introducen las probetas en la solución y se almacenan tapados y sellados, evitando vertidos o evaporaciones, a 23℃ +- 2℃. S e dejan sumergidas completamente entre 16 y 18 h. Posteriormente se saca la muestra, se deja escurrir entre 10 y 15 min. Y se mete a secar en el horno a una temperatura de 110 ℃ (+-5℃) hasta que se logre un peso constante en el proceso de secado. Se pesa entre cada 2 y 4 horas para establecer el tiempo donde se logra el peso constante. El peso constante se considera cuando la variación es menor a 0.1% del peso de la muestra a partir de las 4 horas. Una vez seca la muestra se vuelve a sumergir en la solución y se repite el proceso obteniendo un porcentaje de la pérdida de peso hasta que se pierda la consistencia de la muestra o se desmorone completamente esta.

4.5 Definición y caracterización del panel

Finalmente, se caracterizará el material con formato de panel, donde se aconseja que se haga con unas dimensiones proporcionales a las que pueda tener comercialmente (Alba et al., 2012) y de grosor en relación a los valores obtenidos según las diferentes caracterizaciones. Se determina como una posibilidad de desarrollo comercial con dimensiones de 1200mm de ancho por 2400mm de alto por 60mm de grosor, por lo que se caracterizará un material de 600mm de ancho x 300mm de alto x 60mm de ancho.

El procedimiento y la metodología de la investigación son los siguientes:

- Construcción de los moldes para la ocupación del compuesto.

- Identificación, clasificación y volumetría de los materiales a utilizar.

- Mezclado y vaciado del compuesto.

- Realización, bajo las normas ASTM, de las pruebas y ensayos de los especímenes a distintas fechas de su elaboración.

- Recopilación y análisis de datos entre los diferentes especímenes.

4.5.1 Preparación del compuesto

Se preparan los diferentes componentes del compósito y se mezclar ayudados de una máquina revolvedora que ayudará a la buena mezcla de las partes. Posteriormente se vierte en el molde y se vibra manualmente.



Fig. 4.5.1.1. Imagen de moldes metálicos

Moldes

La construcción del molde consta de placas de acero A36, unidas con un sistema de espárragos de 3/8” rosca y mariposas, que permitieran el fácil desprendimiento del compuesto. Para la realización de este proyecto se utilizaron dos diseños, la primera tiene una dimensión de 30 cm x 20 cm, dividida en 3 compartimientos y la segunda de 60 cm x 13.5 cm con dos comportamientos, ambas con una altura de 30 cm.

Arcilla

El suelo arcilloso es extraído del poblado La Solana, Querétaro, Querétaro. Para su utilización es necesario que se disgreguen los grumos a un tamaño menor de 1 pulgada de diámetro.



Fig. 4.5.1.2. Suelo arcilloso, tipo La Solana

Arena de río

La arena a utilizar, es material comercial de los negocios dedicados a la construcción en la región. Para el proyecto, es necesario utilizar el material que pasa por el tamiz No. 4 (4.75 mm).



Fig. 4.5.1.3. Arena comercial de río tamizada

Arenilla

La arenilla a utilizar, es material comercial de los negocios dedicados a la construcción en la región. Para el proyecto, es necesario utilizar el material que pasa por el tamiz No. 4 (4.75 mm).



Fig. 4.5.1.4. Arenilla comercial tamizada

Ceniza volante (Fly Ash)

Este material consiste en el residuo de la quema al alto horno de ceniza de carbón de las centrales carbono eléctrica; en este caso proveniente de la central carbono eléctrica de Coahuila.



Fig. 4.5.1.5. Ceniza volante

Cal

La cal a utilizar, es material comercial de los negocios dedicados a la construcción en la región, procedente de Tolimán, una población cercana a Querétaro.



Fig. 4.5.1.6. Cal comercial

Paja de cereal

La paja utilizada es obtenida del campo experimental del bajío en el municipio de Celaya, Guanajuato, la cual hará la función de refuerzo (fibras).Para esta práctica, la paja utilizada se cortó en dos tamaños, el primer grupo comprendido del orden de 5 cm y el segundo grupo con longitudes de 15 cm.



Fig. 4.5.1.7. Paja de cereal de cebada

Agua

Se utiliza agua potable para el mezclado.

Preparación del compuesto

Para la creación de especímenes, se consideraron 90 moldes (considerando los dos tamaños), divididos en 5 conjuntos de acuerdo a su cantidad de paja dispuesta en la mezcla: Sin paja, 1 % de paja, 2 % de paja, 4 % de paja, 8 % de paja.

Para el mezclado de los materiales se utiliza una revolvedora de ¼ de saco, con motor eléctrico trifásico de ½ hp. La homogenización consistió en una primera fase de 10 minutos con el agua, la arcilla, la arena y la arenilla; posteriormente 10 minutos más incorporando la cal y la ceniza volante (fly-ash); y finalmente 10 minutos agregando la paja de los dos tamaños. Finalmente el



Fig. 4.5.1.8. Revolvedora



Fig. 4.5.1.9. Proceso de vaciado en moldes

vaciado en los moldes.

Tabla 4.5.1.1. Relación dosificaciones utilizadas en pruebas de caracterización del panel.

SIGLAS	DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA
PF01.01	CEMENTANTE:20% (L:50%+FA:50%) + SUELO:80%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
FP01.02	PC:1% + CEMENTANTE:19.5% (L:50%+FA:50%) + SUELO:79.5%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
PF01.03	PC:2% + CEMENTANTE:19% (L:50%+FA:50%) + SUELO:79%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
PF01.04	PC:4% + CEMENTANTE:18% (L:50%+FA:50%) + SUELO:78%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
PF01.05	PC:8% + CEMENTANTE:16% (L:50%+FA:50%) + SUELO:76%(A:32%+AR:8%+SA:60%)

4.5.2 Desarrollo de la campaña experimental para la caracterización del panel

4.5.2.1 Caracterización mecánica

Ensayo a compresión (norma astm e72-02)

Los procedimientos que se describen sirven para evaluar el comportamiento de segmentos de muros de construcción, en condiciones que representan a las encontradas en servicio. Los criterios de desempeño, basados en los datos de esos procedimientos, garantizan la adecuación estructural y vida útil de los elementos evaluados (American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction E72-02).

Cerca del extremo superior deberá ligarse a la muestra un soporte, apoyado en una barra de metal. También se le unirá un soporte a la muestra, cerca de su extremo

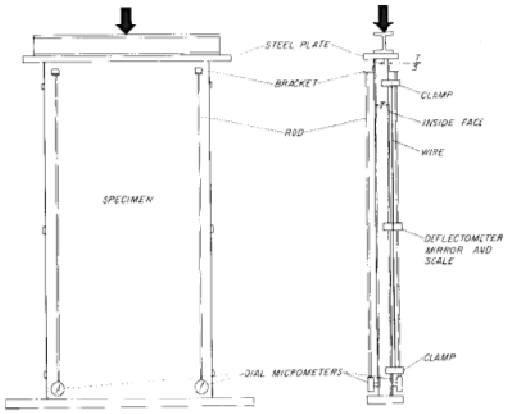


Fig. 4.5.2.1.1. Esquema de aplicación ensayo


Fig. 4.5.2.1.2. Maquina universal donde se realizan los ensayos

inferior. El extremo cónico de la barra se asienta en un agujero, en el extremo del eje, y la varilla y el eje se mantiene en contacto por medio de bandas de goma estirada. El dispositivo de medición de la desviación se debe graduar a 0,025 mm (0,001 pulgadas), o menos.

La muestra se evalúa como una columna que tiene un extremo plano en su parte inferior. La carga de compresión se aplica a la placa de acero que cubre el extremo superior de la muestra, y se distribuye de manera uniforme a lo largo de una línea paralela a la cara interior, y a un tercio del espesor de la muestra de la antedicha cara interior. Para medir el acortamiento de la muestra se conectan cuatro compresómetros a sus caras, uno cerca de cada una de sus esquinas. Las lecturas se registran con una precisión de 0,025mm (0,001 pulgadas). Se trabaja con dos deflectómetros, uno para cada lado de la muestra. Registre las lecturas cuando la imagen del cable coincida con el cable, con una precisión de 0,25 mm (0,01 plg)

Cálculos y reporte: De los datos obtenidos del ensayo, para presentar un reporte es necesario hacer una serie de cálculos para obtener resultados que se puedan interpretar y llegar a una conclusión acerca de la muestra ensayada. A continuación se explica la forma de obtener estos resultados.

- Deformación: Para cada compresómetro, calcule la reducción en cada carga, como la diferencia entre la lectura del compresómetro cuando se aplica la carga y la lectura inicial. Estime el acortamiento de la muestra, como la media de los acortamientos para cada uno de los cuatro compresómetros multiplicado por la relación de la longitud del espécimen dividida por la longitud del compresómetro indicador. Obtenga los conjuntos de una manera similar.

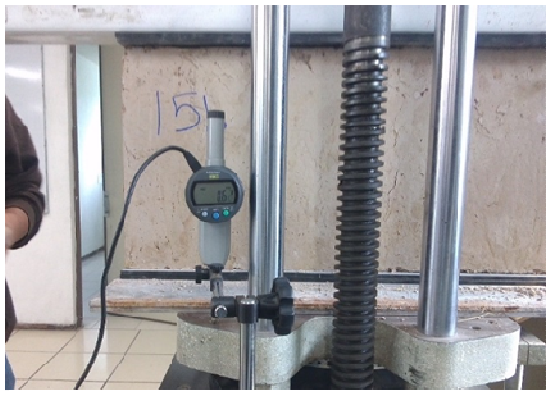


Fig. 4.5.2.1.3. Imagen del deflectómetro con el que se miden las deformaciones

Para este ensayo, se probaron 5 paneles con medidas y pesos similares por cada dosificación. El ensayo consistió en aplicar carga axial utilizando la maquina universal hasta que estos fallaran. Se utilizó un micrómetro en cada panel para medir los desplazamientos.

- Definición de Esfuerzo de diseño: posteriormente se hizo un promedio del esfuerzo-deformación de los distintos paneles, con la ayuda del software Microsoft Excel, se trazó la línea de tendencia. A partir de este trazo se determinó el valor de esfuerzo último y el esfuerzo de diseño, información que se obtuvo mediante la aplicación del método empírico ideado por el ingeniero Mario Corzo (Uz Garcia, 2012).

El método comprende los siguientes pasos:

+ Se traza una línea tangente sobre la curva de tendencia,

+ Se traza una recta horizontal que sea tangente al punto de inflexión, o punto máximo de la línea de tendencia,

+ En el punto de intersección de las rectas a) y b) se traza una línea vertical convergente sobre un valor de la línea de tendencia, y

+ El resultado que se obtiene es el valor del esfuerzo de diseño.

- Cálculo del módulo de elasticidad: el siguiente paso consiste en determinar el valor del módulo de elasticidad (E) del panel. Este se obtiene al despejar la ecuación del ACI 318-08, de la sección 8.5.1, que se muestra a continuación.

$$E = wc^{1.5} * 0.14 * \sqrt{f'm}$$

donde E es el módulo de elasticidad en kg/cm2, wc el peso específico del panel en kg/m3 y f´m el esfuerzo de diseño kg/cm2

Ensayo a flexión vertical (norma astm c1185-03)

Para llevar a cabo el ensayo a flexión vertical, es importante tomar en consideración los procedimientos descritos a continuación, así como las recomendaciones en cuanto a la colocación de los instrumentos utilizados (American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber-Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards C1185-03). El equipo debe ensamblarse cumpliendo con los requisitos de los componentes, o con una configuración equivalente, como se observa en la figura siguiente, rigiéndose por el orden que se cita a continuación:

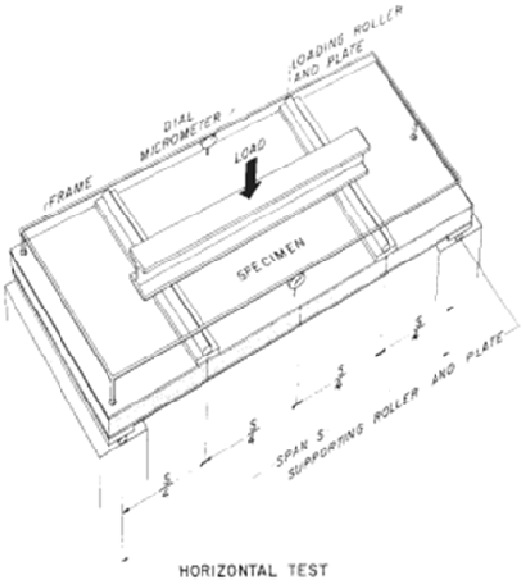


Fig. 4.5.2.1.4. Esquema de aplicación de esfuerzos para los ensayos a flexión vertical.

+ Canal de acero.

+ Rodillos: rodillos cilíndricos, dos rodillos de apoyo, dos ruedas de carga.

+ Deflectómetros.



Fig. 4.5.2.1.5. Esquema de aplicación de esfuerzos para los ensayos a flexión vertical

La muestra, debe descansar sobre rodillos cilíndricos para evitar las condiciones de restricción final. Los ejes de los cilindros deben ser paralelos a las caras de la muestra. Los dos rodillos de apoyo mantienen contacto con la superficie vertical del marco y cada rodillo debe descansar, en posición horizontal,

sobre goma espuma de 10 mm (0,4 pulgadas) de espesor, para evitar tensiones longitudinales. Cada uno de los dos rodillos de carga también debe descansar en goma espuma. Las cargas deben aplicarse verticalmente, con la máquina universal, y deben medirse deformaciones con un micrómetro. En el procedimiento llevado a cabo en el laboratorio, se utilizaron barrotes de madera como soporte de la muestra, se aplicó la carga en dos puntos con rodillos cilíndricos y por último se les colocó encima una placa de metal para recibir la presión por parte de la máquina universal. Para este ensayo se probaron 6 paneles.

- Cálculo de la fuerza de flexión (Módulo de Ruptura): se calculará la fuerza de flexión para cada espécimen con la siguiente expresión:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

donde R es la Fuerza de flexión (Mpa), P la Carga máxima (N), L la Longitud entre apoyos (mm), b el Ancho del espécimen (mm) y d el Espesor promedio (mm).

- Cálculo del módulo elástico: a continuación se calculará el módulo elástico mediante la siguiente expresión:

$$E - \frac{(P_2 - P_1)L^3}{4bd^3(Y_2 - Y_1)}$$

donde E es el Módulo elástico (kg/mm2), P2 y P1 las Cargas (Kg), tomadas de dos puntos de la sección lineal de la gráfica, Y2 y Y1 las Deflexiones (mm), correspondiente a las cargas seleccionadas, L la Longitud entre apoyos (mm), b el Ancho del espécimen (mm) y d = Espesor promedio (mm).

Ensayo a carga de impacto (norma astm e695-03)

Este método de prueba se refiere a la medición de la resistencia relativa a cargas de impacto en la construcción de paredes, pisos y techos.

Los valores indicados en unidades del sistema internacional (SI) deben ser considerados, según la norma. Esta norma no pretende señalar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de la norma establecer la seguridad, las prácticas apropiadas de salud, y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso (American Society for Testing and Materials, Standard Method for Measuring Relative Resistance of Wall, Floor, and Roof Construction to Impact Loading E695-03).

Las muestras de pared, piso y techo de la construcción son sometidas a la fuerza del impacto de un instrumento de impacto estándar. Las secciones de pared se ponen a prueba en posición vertical. Las de piso y techo se ponen a prueba sólo en posición horizontal. Debido a las diferencias inherentes al método de aplicación de la carga, las mediciones que se obtienen de las pruebas en un modo horizontal no son comparables con las mediciones que se registran en las pruebas en modo vertical.

Aparatos para sistemas de pared, muestras verticales.

+ Canales de acero, para el apoyo de la muestra en la parte superior e inferior.

+ Rodillos, rodillos cilíndricos, y dos rodillos de apoyo.

+ Bolsa de impacto, varas de medir, deflectómetro, conjunto de indicadores, y bloques patrón.

+ Estructura rígida de apoyo, para que los canales de acero y el medidor de deflexión se adhieran.

La carga de impacto se aplica en la mitad de la cara exterior de las muestras, mediante la liberación de la bolsa, a una altura inicial de 152 mm +- 6 mm (6 +- 1 / 4 de pulgada), que aumentará en esta forma: 152 mm +- 3 mm (6 +- 1 / 4 pulgadas).

La altura de la caída se mide del punto de impacto del centro de gravedad de la bolsa, cuando esta se encuentra en la posición elevada, ya que ataca la muestra en este mismo. Debe liberarse la bolsa suavemente. Para medir la deformación instantánea de la muestra se utiliza el deflectómetro. Antes de la carga de impacto, la varilla de metal ligero debe mantenerse en contacto con el centro de la cara inferior de la muestra de la abrazadera. Cuando la muestra se desvía en la carga de impacto, la barra se mantiene en la posición más baja de la abrazadera de fricción. Debe presentarse un informe de las lecturas, con una precisión de 0,25 mm (0,01 pulgadas). Es necesario llevar un registro de cada una de las alturas de caída, que posteriormente serán usadas para efectuar los cálculos necesarios y así poder llegar a una conclusión acerca de la muestra ensayada.



Fig. 4.5.2.1.6. Esquema de aplicación de esfuerzos para los ensayos a impacto

Para esta prueba se ensayaron 6 paneles, en los cuales, cada uno de ellos puesto en posición horizontal apoyados sobre dos barrotes de madera, se dejaba caer una bolsa con arena de un peso de 1 kg, a distintas alturas de 15 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm y 75 cm; y se tomaba lectura del desplazamiento en el micrómetro a cada altura hasta llegar a la falla.

4.5.2.2 Caracterización térmica

Determinación de la Conductividad Térmica

Se calcula la conductividad térmica del material por el método de la placa caliente, que es un método absoluto o primario de medición de propiedades de

transmisión de calor, en régimen estacionario, a través de probetas con forma de placa plana, para calcular sus propiedades de transmisión de calor.

El aparato es para dos probetas y consiste en una fuente caliente constituida por una placa calefactora que comprende una parte central y un anillo de guarda separados por un espacio no mayor de 15 mm. En la figura, la configuración para la determinación de la conductividad térmica en materiales para construcción de acuerdo con la norma ASTM C 177-85. Las probetas de la muestra a medir se colocan justo en medio de las placas frías y la placa caliente.

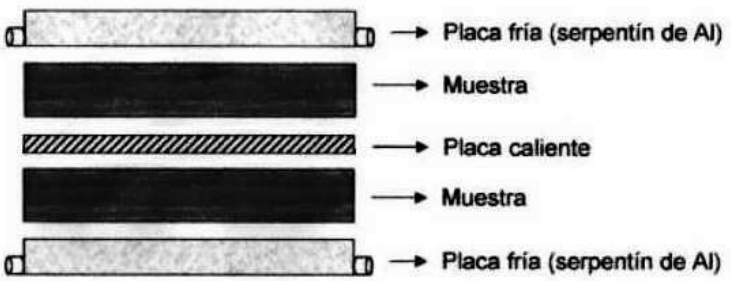


Fig. 4.5.2.2.1. Configuración experimental del aparato de placa caliente con guarda.

El Sistema de medición utilizado está integrado por los siguientes accesorios: tarjeta DAQ-ACPC-1216, control de temperatura Watlow SD, bomba sumergible, contenedor de agua para enfriamiento, multímetro y amperímetro de gancho, transformador de Voltaje Staco Energy, cajón del sistema de placa caliente, termopares tipo K y una omputadora pc.

Placa Caliente: la placa caliente está conformada por una resistencia con dos circuitos eléctricos separados entre sí 1.5 cm (figura 2), el primer circuito se encuentra en la parte central de la placa y abarca un área de 13 x 13 cm (área de medición), el segundo circuito se encuentra alrededor del primero (área de guarda). La resistencia central se alimenta por una fuente de voltaje variable. La resistencia del área de guarda de la placa caliente se alimenta con un controlador

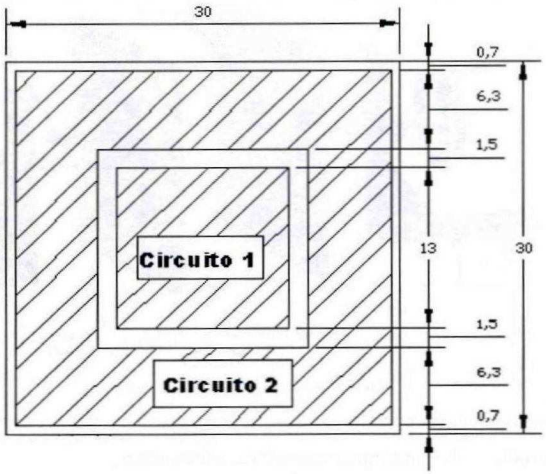


Fig. 4.5.2.2.2. Circuitos eléctricos del sistema de placa caliente (cotas en cm).

Watlow de la serie SD, para garantizar una distribución homogénea de calor.

Termopares: en las figuras se aprecia la distribución de los termopares empleados para la medición de la temperatura, se utilizan 16 termopares tipo K, los cuales se ponen en contacto con la placa caliente y las placas frías, en ambas caras de la muestra se distribuyen cuatro termopares abarcando el área de medición de 13 x 13 cm; adicionalmente se utiliza otro termopar que sirve para monitorear la temperatura en el área de guarda.

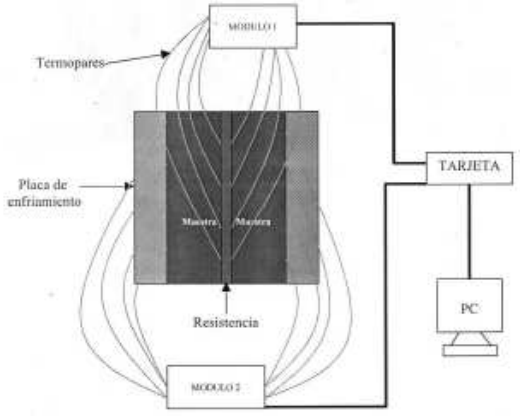


Fig. 4.5.2.2.3. Distribución de los termopares para el registro de las temperaturas.



Fig. 4.5.2.2.4. Termopares conectados

Sistema de adquisición de datos: para la adquisición de los datos generados se utiliza una tarjeta DAQ-ACPC-1216, marca Strawberry Tree. Con 16 canales de medición con una resolución de 9 a 12 bits y de 2.5 a 10 khz de velocidad. La tarjeta cuenta con un programa para la adquisición y control a través de una computadora (fig.).



Fig. 4.5.2.2.5. Equipo de medición completo.

Controlador de temperatura: se utiliza un controlador Watlow de la serie SD. Que se muestra en la figura. Este se conecta a la resistencia del área de guarda de la placa caliente para garantizar una distribución de calor homogénea.



Fig. 4.5.2.2.6. Tarjeta DAQ-ACPC-1216 con termopares y Controlador de temperatura Watlow SD.

Fuente de voltaje variable: se utiliza un variador de voltaje marca STACO modelo 3PN1010B, que se muestra en la figura 6. Con capacidad de 0 a 140 Volts y 10 Amperes. Con esta fuente se alimenta el circuito 1 de la placa caliente y nos permite conocer los parámetros de voltaje y corriente necesarios para la determinación de la conductividad térmica de la muestra que se este analizando.



Fig. 4.5.2.2.7. Variador de voltaje STACO (3PN1010B).

Para el registro de las temperaturas del sistema se utiliza el software DASYLab, el cual está en interfase con la tarjeta de DAQ-ACPC-1216. Para el procesamiento de los datos y la determinación de la conductividad térmica se usa el software Excel.

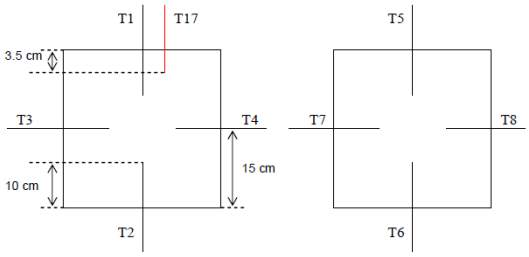


Fig. 4.5.2.2.8. Distribución de termopares en las caras de la probeta.

Procedimiento

+ Preparación y colocación de las muestras. De cada muestra se requieren 2 probetas. En cada cara de ambas probetas se distribuyen 4 termopares, en la figura 7 se aprecia la distribución de termopares en ambas caras de las probetas de la muestra a medir.



Fig. 4.5.2.2.9. Preparación del panel para la colocación de los termopares en ambas caras de la probeta.

Cada termopar se numera del 1 hasta el 17, y se agrupan en 4 bloques del 1 al 4, 5 al 8, 9 al 12 y 13 al 16. Los bloques de los termopares 1-16 se conectan a la tarjeta de adquisición DAQ-ACPC-12-16. El termopar 17 se conecta al controlador de temperatura Watlow SD. Después de colocar los termopares se procede a poner las dos probetas de la muestra dentro del cajón del sistema de placa caliente de preferencia se colocan en contacto con la placa caliente los bloques de termopares 1-4 y 9-12, el termopar 17 debe colocarse con el bloque 1-4. Las probetas de termopares del 5-8 y del 13-6 se colocan en contacto con las placas frías.

+ Medición. Una vez colocadas las probetas dentro del sistema y en contacto con la placa caliente y las placas frías. Se procede a hacer la medición, como se describe a continuación. Con el Transformador de Voltaje Staco Energy se aplica un voltaje a la resistencia de medición, se enciende la bomba sumergible para hacer circular agua a través de las placas frías, se corre el programa placas en DasyLab para que se inicie el registro de las temperaturas de los termopares. Se anota el valor del voltaje suministrado a la resistencia de medición. Con el amperímetro de gancho se mide el amperaje demandado por la resistencia de medición. Con el controlador Watlow SD, se va aumentando la temperatura del área de guarda, de tal manera que esta temperatura sea similar a la temperatura promedio de las 8 temperaturas del área de medición, esto se logra variando

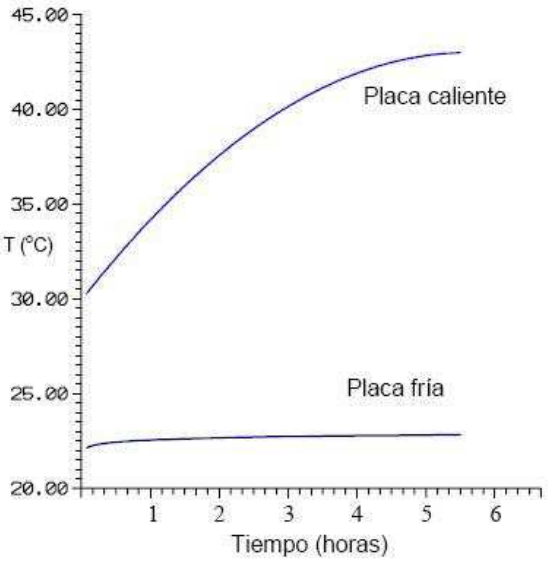


Fig. 4.5.2.2.10. Estabilización de la temperatura de las placas.

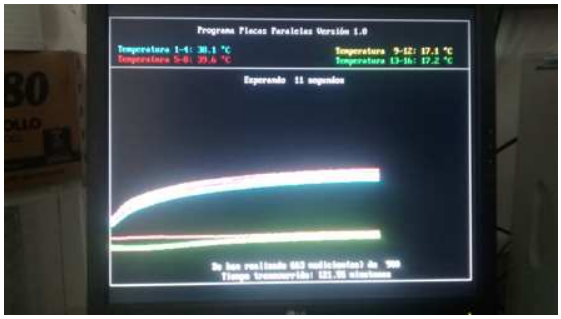


Fig. 4.5.2.2.11. Estabilización de la temperatura de las placas.

el Set Point del controlador.

Posteriormente se tiene que esperar el tiempo necesario para que la temperatura de las placas se estabilice o se alcance el estado estacionario (fig. 4.5.2.2.10).

+ Determinación de la conductividad térmica. La conductividad se determina una vez que el equipo alcanzó el estado estacionario de transferencia de calor, cuando las temperaturas de ambas caras de la muestra no varían más. Los datos necesarios para el cálculo de la conductividad térmica son la diferencia de temperatura entre ambas caras, la potencia eléctrica suministrada a la resistencia del área de medición, el área de medición y el espesor de la muestra. De acuerdo con la Ley de Fourier para la conducción de calor, una vez que se ha alcanzado el régimen permanente, la velocidad de transmisión calorífica a través de una pared es:

$q = - k * A * (dt / dx)$,

donde q es la velocidad de transmisión del calor a lo largo del espesor, en (cal/s), k es la conductividad térmica del material en (cal / m * s * ℃,), A es el área del material, perpendicular al flujo del calor, en (m2), dt la diferencia de temperatura entre la cara fría y la cara caliente, en (℃) y dx el es pesor en la dirección x, en (m)

De esta fórmula se despeja el coeficiente de conductividad térmica k, y se calcula en función de los parámetros ya vistos. La conductividad térmica se determina mediante la siguiente expresión:

$k = (e * ½ P) / (\Delta t * A)$,

donde k es la conductividad térmica del material, en (watt / ℃ * m), e el espesor de las probeta, en (m), P la potencia eléctrica suministrada, en (watts) y Δt = diferencia de temperatura entre la cara fría y la caliente, en (℃).

Determinación del calor específico

Se obtiene la curva DSC por calorimetría Diferencial de Barrido se obtiene sobre una muestra pesada de polvo de cada uno de los especímenes en máquina universal modelo V4.7A de la marca TA Instruments. Las muestras se corren en un rango de 340ºK a 510ºK, 1.4x10-3cal/sec.

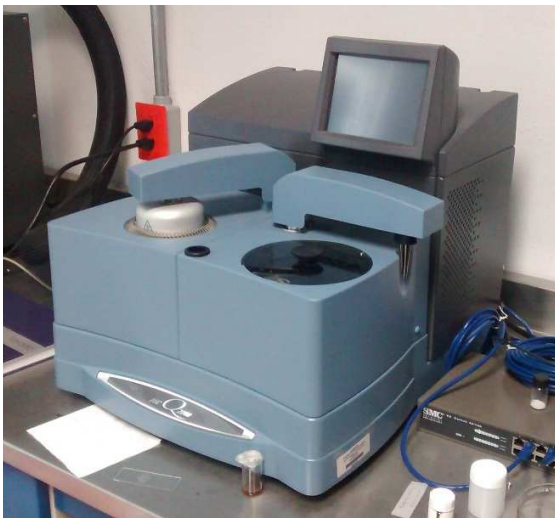


Fig. 4.5.2.2.12. Equipo para la Calorimetría Diferencial de Barrido.

En diferentes artículos ha sido calculado el Calor específico a partir del flujo de calor que se obtiene de la curva DSC (Degeratu et al., 2009; Harabor et al., 2013, Degeratu et al., 2013).

A partir de la derivada de la curva DSC, podemos obtener δQ/ΔT, siendo el calor específico definido por la siguiente ecuación (Pop et al., 2001):

$$c_p = \frac{1}{m}\frac{\delta Q}{\Delta T} = \frac{1}{m}\frac{(\delta Q/d\tau)}{(dT/d\tau)}$$

donde Cp es el calor específico, δQ/ΔT el flujo de calor por incremento de temperatura que se obtiene de la curva DSC y m la masa del espécimen que se mide.

4.5.2.3 Caracterización acústica

Determinación de las propiedades de aislamiento acústico.

De cara a determinar su buen rendimiento y su aporte a nivel de acondicionamiento acústico, se plantea hacer diferentes análisis analíticos a comparar entre ellos y verificar si se está dentro de la normativa teniendo en cuenta la norma española CTE-DB-HR – Protección frente al ruido.

Un primer cálculo se hace determinando el valor de aislamiento frente a sonido aéreo (Ra) para paredes de tierra se obtiene mediante la expresión (Bestraten et al., 2007):

Ra= 21,65log10 x ρ' – 2,3 (para ρ' > 50 kg/m2)dB,

donde ρ' es ρ x t, ρ la densidad del muro de kg/m3 y t el espesor del muro en metros.

Se plantea otro análisis analítico a partir del estudio de la relación entre el Índice de Reducción Acústica R como función de su masa por unidad de superficie m´ y la frecuencia f. La correlación obtenida es (Díaz et al., 2012):

R = 29 x log(m') + 22 x log (f) – 74dB,

donde m' es la densidad del muro por unidad de superficie de kg/m2 y f la frecuencia aplicada.

4.6 Discusión de los resultados

Discusión de los resultados y propuesta final de un compósito y elemento constructivo (panel prefabricado) y su aplicación como parte de cerramiento de viviendas industrializadas. A partir de los estudios y caracterizaciones realizadas y los resultados obtenidos, se procederá a proponer un componente en formato de panel prefabricado adecuado para su aplicación como parte de un cerramiento en viviendas industrializadas.

4.7 Conclusiones y redacción final

Se llegarán a conclusiones finales de investigación y se procederá a la redacción definitiva de la tesis.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis de cultivos potenciales y existentes

Se trabaja sobre la extensión que comprende básicamente el bajío incluido Hidalgo, por ser gran productor de cereal en concreto de cebada. En la figura 5.1.1 se detalla la región completa objeto de estudio.

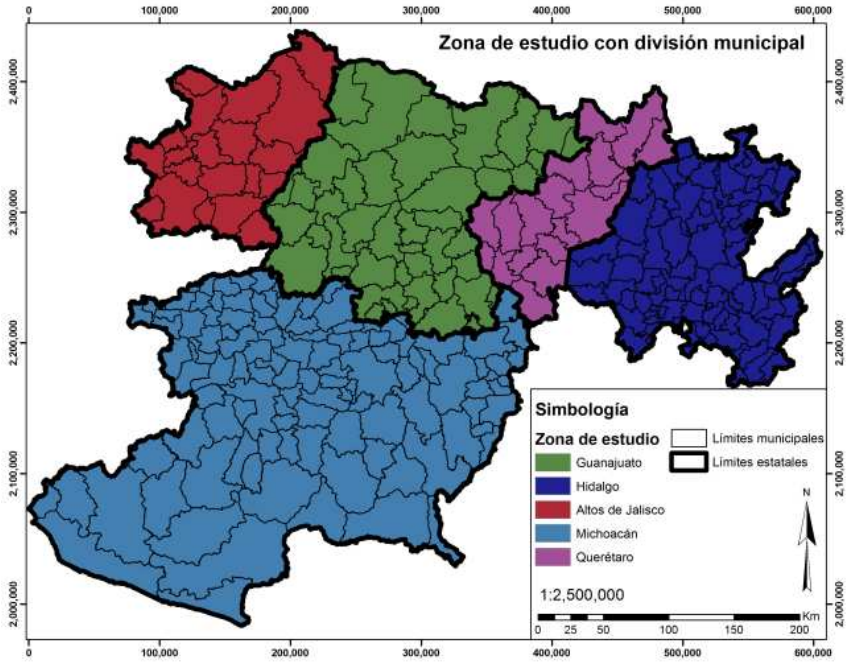


Fig. 5.1.1. Región objeto de estudio.

En la figura 5.1.2 se observa cómo se obtiene las áreas de producción potencial de cultivo de cereal.

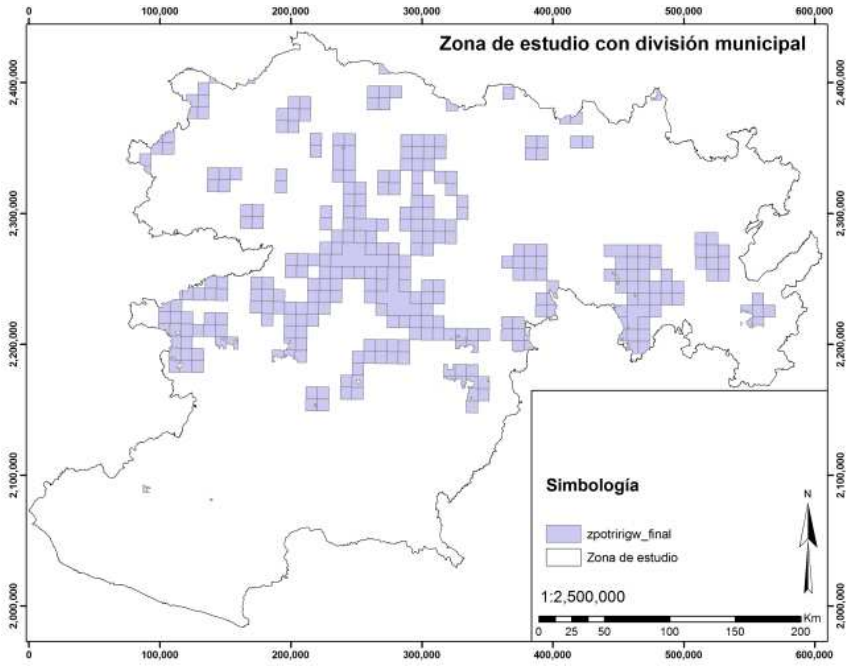


Fig. 5.1.2. Áreas de producción potencial.

Posteriormente se obtiene la superficie o área destinada a agricultura en la región.

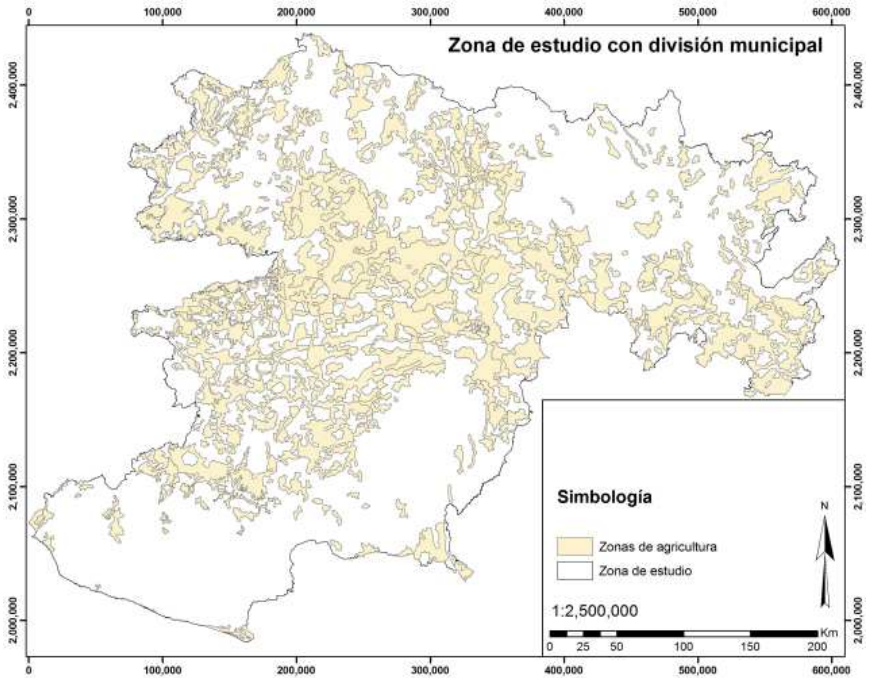


Fig. 5.1.3. Área destinada a agricultura en la región.

Se calcula el área o superficie de suelo donde potencialmente se puede cultivar cereal de cebada a partir de solapar las superficies agrícolas de la región y las áreas potenciales de cultivo de cereales.

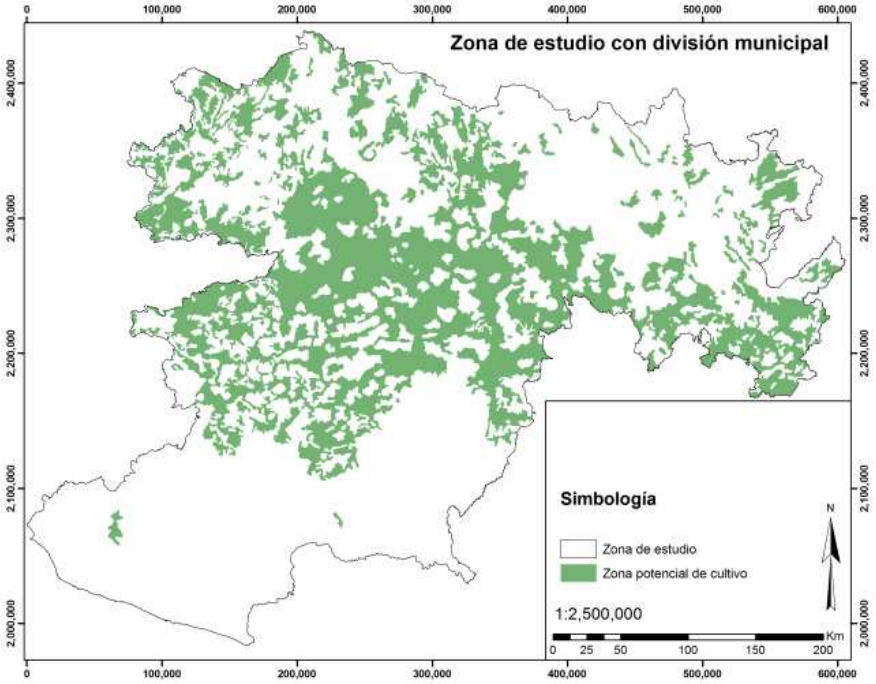


Fig. 5.1.4. Área de superficie potencial total para la producción de Cebada.

El área calculada de acuerdo al dato del 2012 de la SAGARPA fue de 195,915 hectáreas con un total de 707,738 toneladas de paja de cereal colectada (Tabla 5.1.1).

Tabla 5.1.1. Producción de paja de cereal (cebada) en la región de El Bajío.

REGIÓN DEL BAJÍO			Ciclo: Año Agricola OI+PV 2012		Modalidad: Riego + Temporal	
	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Producción (Ton)			% Cosechada
CEBADA GRANO	197,787.36	195,915.36	707,738.67			65
TRIGO GRANO	93,956.10	93,495.10	462,903.64			31
AVENA GRANO	4,264.00	4,198.50	6,038.17			1
CEBADA GRANO (SEMILLA)	5,529.00	5,529.00	28,869.30			2
TOTAL	301,536.46	299,137.96	1,205,549.78			100

Basado en la producción de grano que se obtiene en la región, se calculó la cantidad de paja libre según la fórmula expuesta en el capítulo de metodología

$$Cpt = 707{,}738 \times 0.8 \times 0.52 = 294{,}419t$$

Considerando la cantidad de paja de cereal, se obtiene el coeficiente de producción por unidad de área cultivada:

$$P = 294{,}419\ t / 195.915\ ha = 1{,}5\ t/año/ha$$

Comparando este resultado de una producción de 294,419t por año y 1,5 t/año/ha, con los resultados que fueron dados como positivos de 141,670t por año y 1,39 t/año/ha de un estudio que Cobreros et al. publicó en el 2014, que fueron analizados para el desarrollo de una planta de producción de paneles de paja prefabricados, considerando que la proporción de paja por m^2 era mayor, podemos decir que el resultado obtenido en la región de El Bajío más Hidalgo es suficiente como para poder plantear una producción masiva de paneles prefabricados con refuerzo fibroso de paja de cereal de cebada.

5.2 Definición y caracterización de los materiales

5.2.1 Definición y caracterización del refuerzo fibroso

- Dimensiones: Según la bibliografía consultada y el sistema de cortado de la fibra se opta por utilizar dos dimensiones de la fibra combinadas. En el estudio con paneles 300x300x60mm se utilizan fibras cortadas por una chipiadora usada en las instalaciones del INIFAP en su campo experimental de El Bajío en Celaya. Las dimensiones de estas fibras van entre 1mm y 50 mm. En los paneles definitivos 300x600x60mm, se utiliza el 50% de estas fibras y el otro 50% son de dimensiones tal y como vienen en las pacas de paja tal y como es colectada la paja en el campo, donde alcanzan dimensiones de hasta 450mm.



Fig. 5.2.1.1. Paja de cereal

- Capacidad de absorción:



Fig. 5.2.1.2. Capacidad de absorción de la fibra medido en aumento de porcentaje de masa en un tiempo determinado

Los resultados denotan un alta tasa de absorción en las primeras horas de contacto de la fibra con el agua, llegándose a una estabilización del peso en la dinámica de absorción a las 6 horas. Está por encima de valores de absorción de fibras naturales como el cáñamo, Jute, Sisal o algodón según la bibliografía estudiada que adquieren la estabilización en peso por absorción de agua en más tiempo que la paja de cereal, entre 8 y 12 horas (Wambua, 2003). Se tiene la referencia de que fibras como la fibra de maíz tiene una mayor absorción pudiendo alcanzar el punto de saturación en los primeros 10 minutos de inmersión (Reyes, 2009).

- Capacidad de desorción:



Fig. 5.2.1.3. Capacidad de desorción de la fibra medido en disminución de porcentaje de masa en un tiempo determinado

En comparación con el valor de desorción de otra fibra de cereal como es la fibra de maíz, no tiene un mal resultado. Teniendo en cuenta que el 100% es el peso de saturación tras un tiempo de la fibra sumergida en agua, se obtiene una estabilización en el 70% de este peso a las 48 horas, mientras que en el caso de la fibra de maíz esta situación se da a las 120 horas.

Se puede decir que la fibra de paja de cereal tiene un comportamiento inestable ante el agua lo que denota su carácter poroso, que hay que tener en cuenta a la hora de establecer las dosificaciones del compuesto que conforma el panel, por la alta absroción y desorción del material.

Determinación de características mecánica

PROBETA	ÁREA BRUTA	INCREMENTO
	mm2	mm
P01	3.32	1.55
P02	9.38	1.81
P03	5.08	1.75
P04	5.34	1.90
P05	2.97	2.97
P06	3.21	1.09
P07	6.81	0.09
P08	7.72	1.50
P09	1.06	1.35
P10	6.40	1.05
P11	3.94	0.77
P12	1.68	2.10
P13	4.29	2.39
P14	7.48	1.89
P15	4.32	0.75
P16	1.12	2.75
P17	7.78	0.35
P18	6.28	0.55
P19	2.14	1.52
P20	2.43	1.04
P21	2.87	1.02
P22	11.93	1.67
P23	4.54	1.75
P24	1.84	2.05
PROMEDIO		**1.49**

Fig. 5.1.4. Elongación de la fibra en mm.

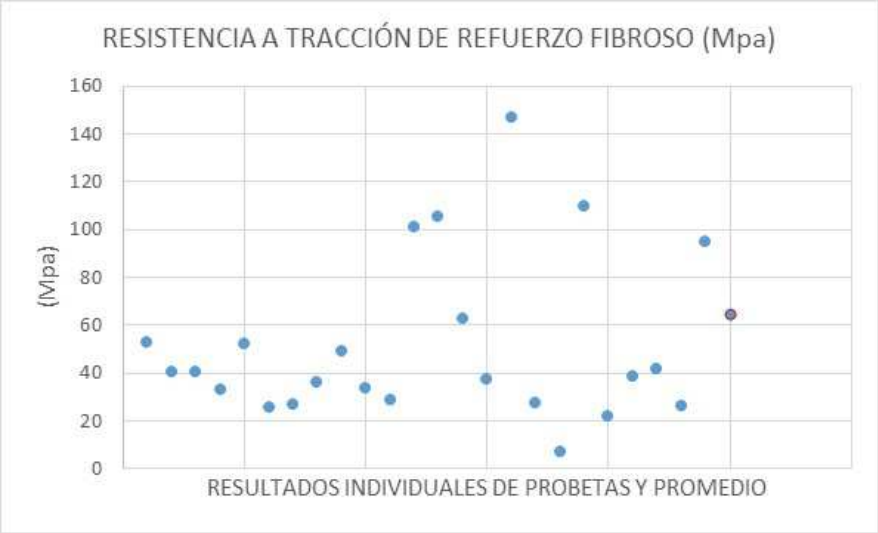


Fig. 5.2.1.5. Resistencia a tracción de la fibra en Mpa.

Se obtiene un bajo valor de resistencia a tracción de 63.5 Mpa, en comparación con valores de 175 Mpa de la fibra de maíz (Reyes, 2009), 550 Mpa de la fibra de cáñamo, 400 Mpa de la fibra de Yute o 600 MPa de la fibra de Sisal como valores de referencia (Wambua *et al.,* 2003).

Determinación de características químicas del refuerzo fibroso, características mineralógicas y morfología microestructural

- Microscopías de Escaneo Electrónico (SEM):

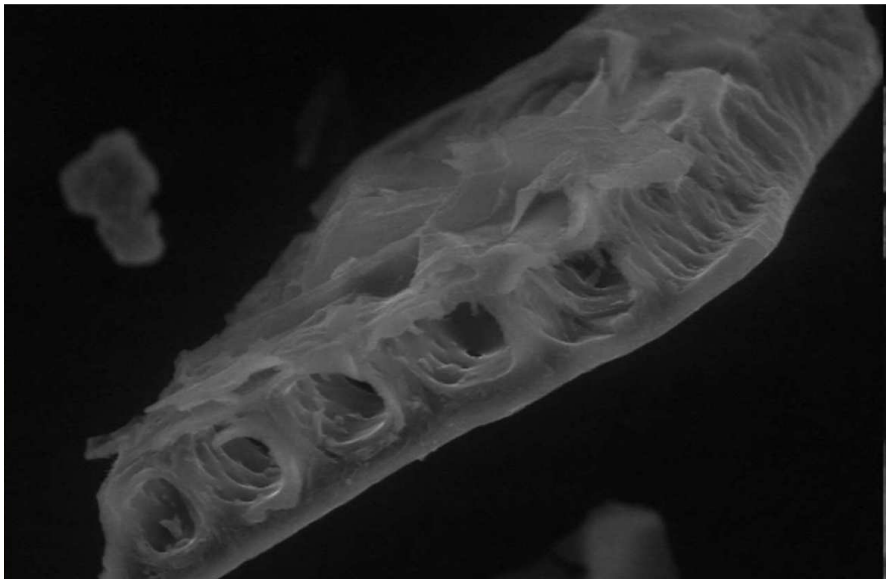


Fig. 5.2.1.6. Imagen SEM de fibra de paja de cereal de cedaba. Zoom 1500x

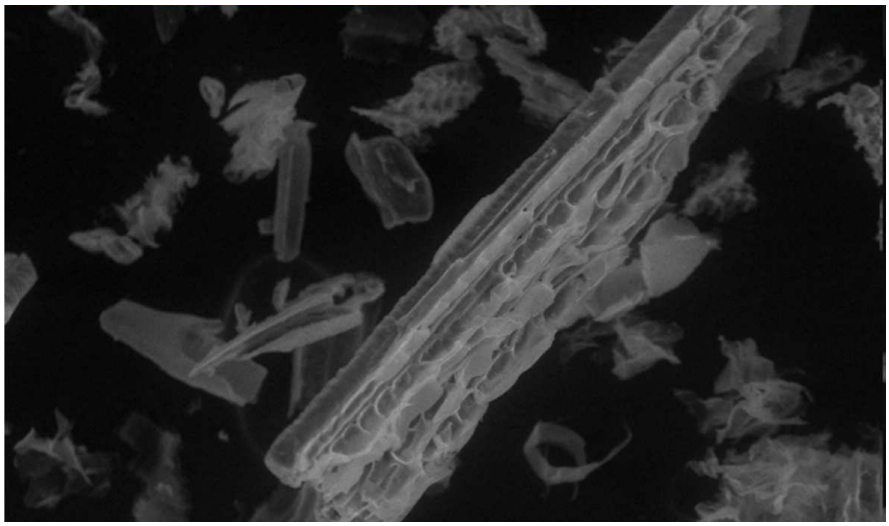


Fig. 5.2.1.7. Imagen SEM de fibra de paja de cereal de cedaba. Zoom 250x

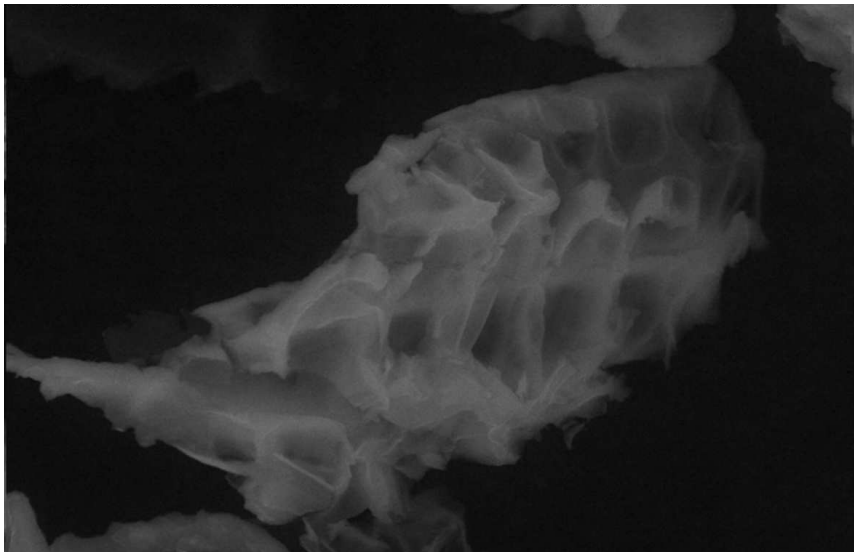


Fig. 5.2.1.8. Imagen SEM de fibra de paja de cereal de cedaba. Zoom 1500x

Se observa una morfología característica de las fibras lignocelulósicas, con una composición tubular basada en una composición de celdas huecas.

- Química proximal:

Tabla 5.2.1.8. Análisis de Química Proximal de la Paja de Cebada

DETERMINACIÓN	VALORES	UNIDADES
CARBOHIDRATO	28.85	%
CENIZA	8.63	%
FIBRA	56.33	%
GRASA	0.55	%
PROTEINA	2.05	%

El Análisis de Química Proximal de la Paja de Cebada muestra como esta es rica en fibras y carbohidratos, con un bajo contenido en grasa y proteína. Un punto importante del análisis es destacar la alta cantidad de ceniza presente, que se muestra en la tabla 5.2.1.8.

+ Termografía:

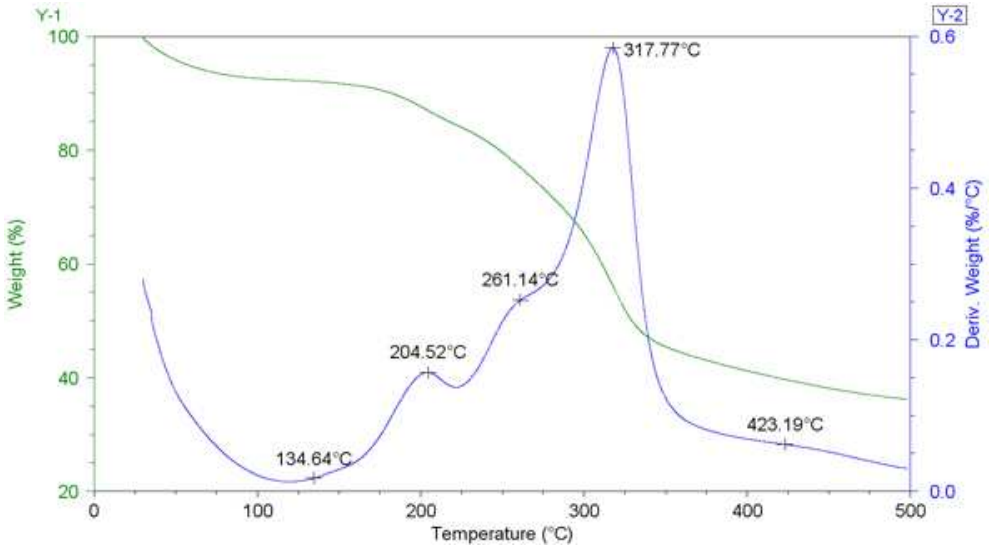


Fig. 5.2.1.9. Termografía de 0 a 500 ºC (Paja de Cebada)

La figura 5.2.1.9. muestra un experimento característico TGA así como su primera derivada. Por medio de una inspección directa de esta figura, se identifica una pérdida importante de humedad a los 134.64℃. El pico localizado en los 205℃ es debido a la desnaturalización de la fibra soluble (Contreras Padilla et al 2012). Se observa cierta estabilidad a partir de los 200℃, con una gran pérdida de material por encima de los 317℃. Se establece un contenido de humedad de la fibra por encima del 7.5%.

- Difracción de Rayos X (DRX):

Se observan diferentes fases cristalinas destacando la claridad de exposición de la silvita y la calcita, son resultados que nos pueden ofrecer conclusiones cuando se analice en comparación a las modificaciones que puede tener con la calcinación que se analiza en el estudio de la ceniza de paja de cebada.

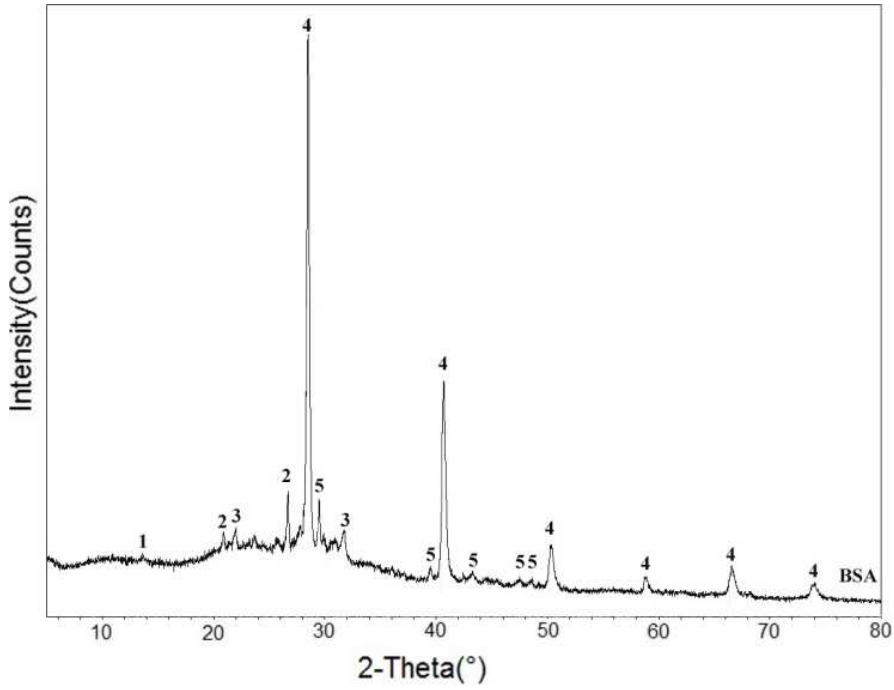


Fig. 5.2.1.10. Fases cristalinas y componentes cristalográficos por difracción de rayos X (DRX): (1) anortoclasa ($AlSi_3O_8$), (2) cuarzo (SiO_2), (3) albita ($AlSi_3O_8$), (4) sylvita (KCl) y (5) calcita ($CaCO_3$)

5.2.2 Caracterización de la matriz del compósito: suelo arcilloso

Determinación de características químicas y mineralógicas.

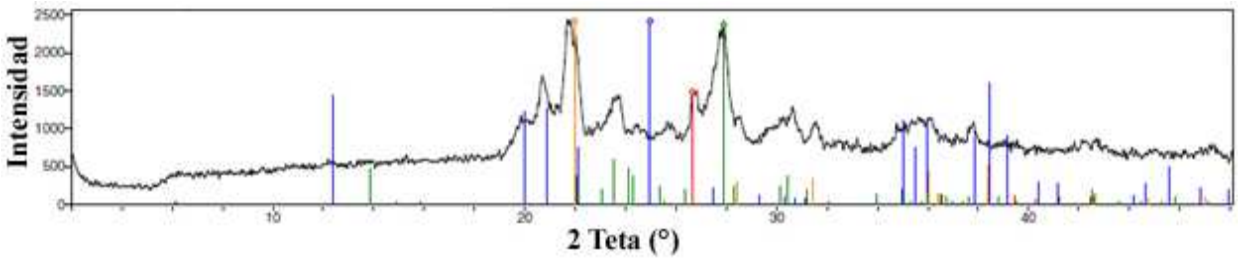


Fig. 5.2.2.1. Fases y componentes mineralógicos y distancia interplanaria de las arcillas de la muestra de suelo arcilloso “La Solana”. 1 SiO_2 (Cuarzo), 2 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (Hallostita), 3 $NaAlSiO_2$ (Albita), 4 SiO_2 (Cristobalita)

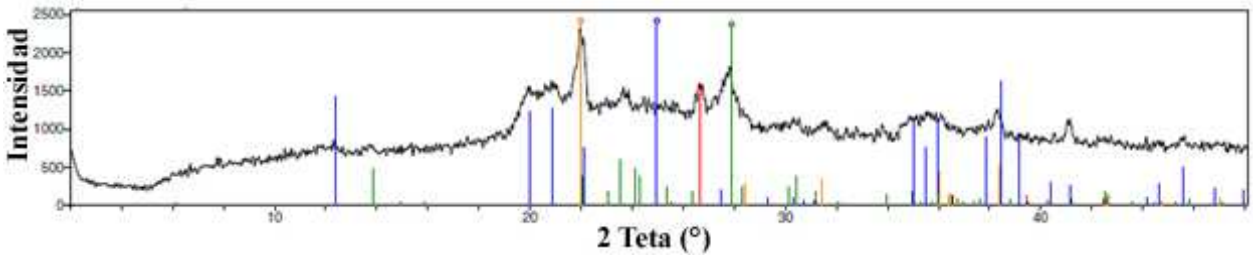


Fig. 5.2.2.2. Fases y componentes mineralógicos y distancia interplanaria de las arcillas de la muestra de suelo arcilloso “San Nicolás A”. 1 SiO_2 (Cuarzo), 2 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (Hallostita), 3 $NaAlSiO_2$ (Albita), 4 SiO_2 (Cristobalita)

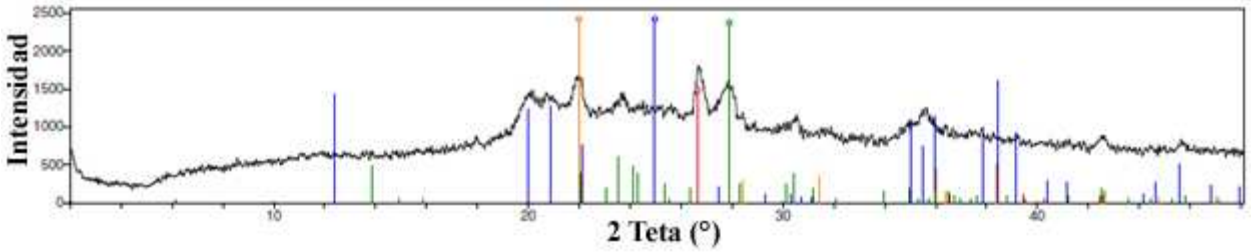


Fig. 5.2.2.3. Fases y componentes mineralógicos y distancia interplanaria de las arcillas de la muestra de suelo arcilloso “San Nicolás B”. 1 SiO_2 (Cuarzo), 2 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (Hallostita), 3 $NaAlSiO_2$ (Albita), 4 SiO_2 (Cristobalita)

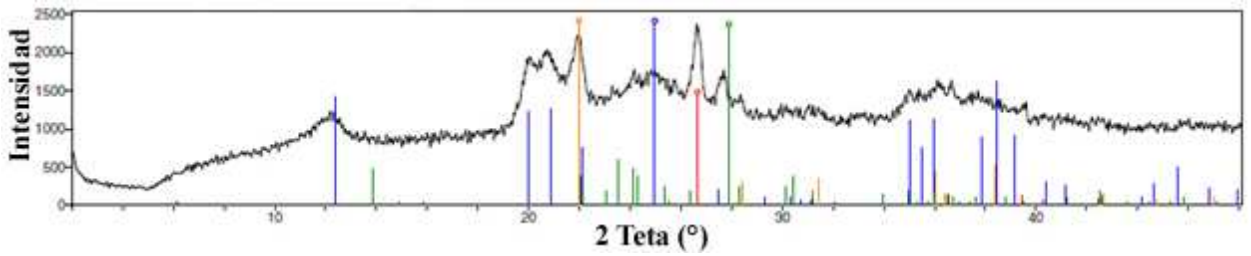


Fig. 5.2.2.4. Fases y componentes mineralógicos y distancia interplanaria de las arcillas de la muestra de suelo arcilloso “Amealco”. 1 SiO_2 (Cuarzo), 2 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (Hallostita), 3 $NaAlSiO_2$ (Albita), 4 SiO_2 (Cristobalita)

En las gráficas de difracción de rayos x aplicadas a los diferentes suelos arcillosos que se estudian se observa una estructura y composición cristalográfica y una existencia de fases cristalinas muy similares.

Determinación de características físicas básicas

- Granulometría por mallas:

Suelo arcilloso “La solana”

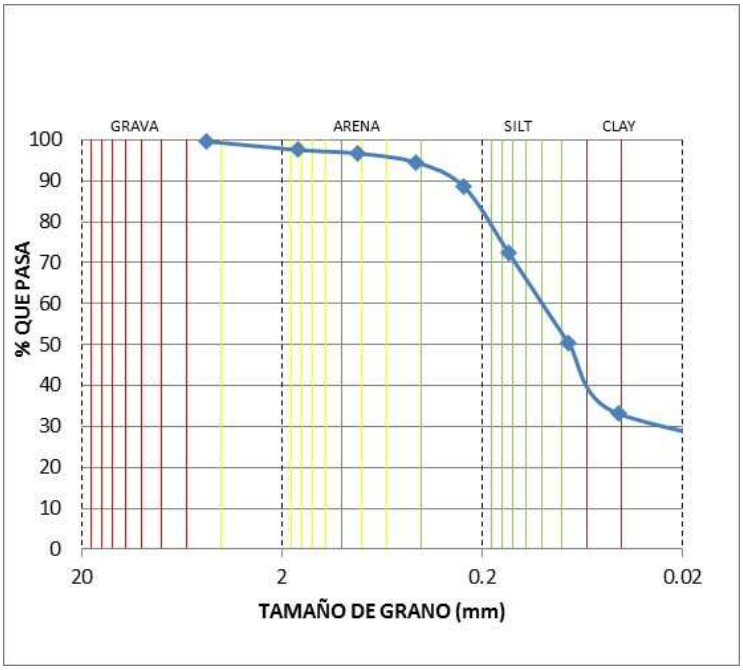


Fig. 5.2.2.4. Distribución de tamaño de grano de Suelo arcilloso de la solana

Suelo arcilloso San Nicolás A

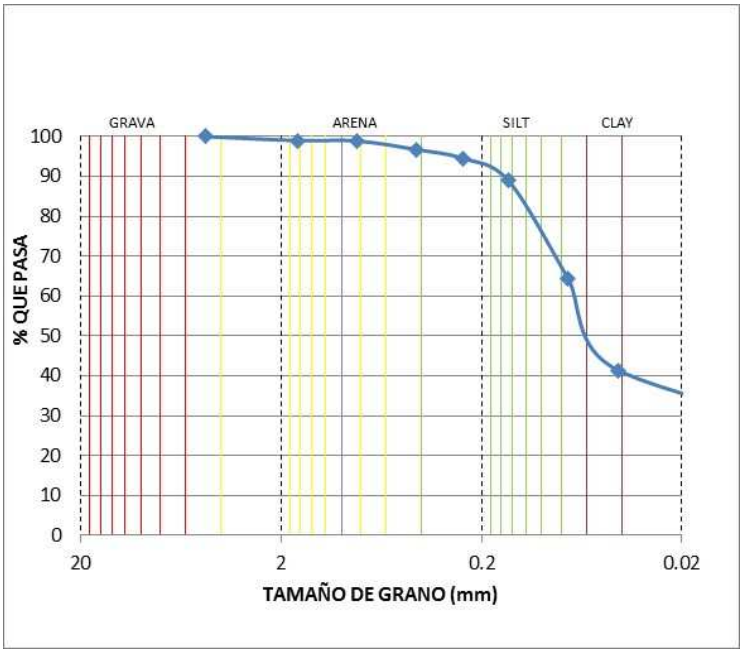


Fig. 5.2.2.5. Distribución de tamaño de grano de Suelo arcilloso San Nicolás A

Suelo arcilloso San Nicolás B

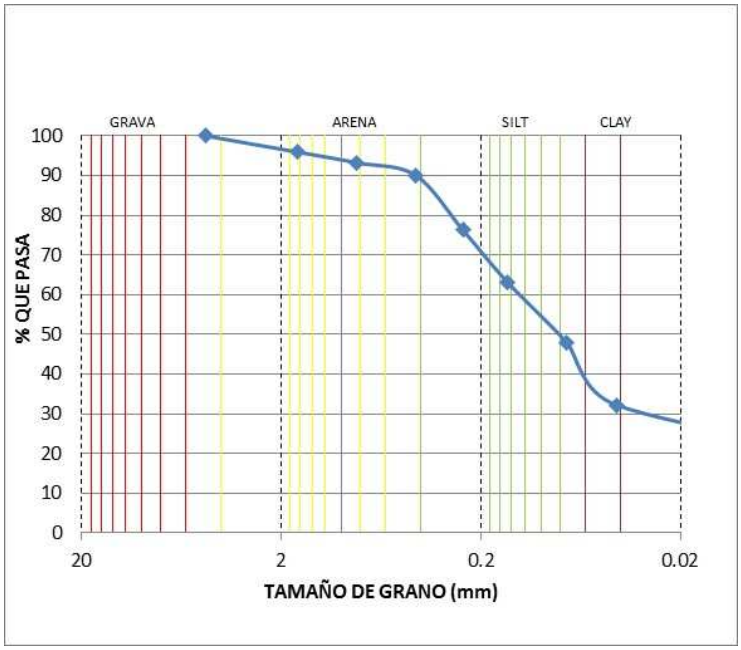


Fig. 5.2.2.6. Distribución de tamaño de grano de Suelo arcilloso San Nicolás B

Suelo arcilloso Amealco

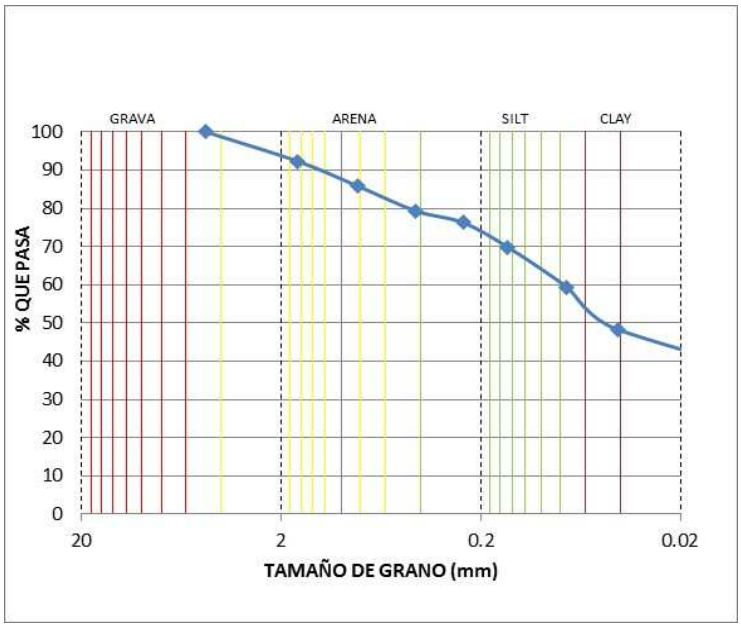


Fig. 5.2.2.7. Distribución de tamaño de grano de Suelo arcilloso Amealco

En el análisis granulométrico de los diferentes suelos arcillosos estudiados se observa una mejor distribución del tamaño de grano en las muestras “La Solana” y San

Nicolás B", con un reparte más homogéneo de los diferentes tamaños, como se aconsejan diferentes autores (Guillaud, 2008). Las muestras "La Solana" y "San Nicolás B", con un 33.06% y un 32.41% respectivamente, también se caracterizan por tener un buen porcentaje de finos, que conviene que esté entre el 25 y 35% según Guillaud, 2008.

Tabla 5.2.2.1. Resumen de porcentaje de finos, arena y grava.

	LA SOLANA	SAN NICOLÁS A	SAN NICOLÁS B	AMEALCO
FINOS - ARCILLA (%)	33.06	41.35	32.14	48.35
FINOS - LIMO (%)	39.30	47.59	31.01	21.53
ARENA (%)	25.22	10.07	32.77	22.42
GRAVAS (%)	2.42	0.99	4.08	7.70

+ Límite líquido (LL).

Suelo arcilloso "La Solana"

Tabla 5.2.2.2. Condiciones antes del secado del suelo arcilloso "La Solana".

FLANERAS	PESO FLANERA	GOLPES	PESO MAT HUMEDO	PESO FLANERA + MAT HUMED.
No.	gr	No.	gr	gr
1	121.9	12	51.08	172.98
2	120.87	30	28.26	149.13
3	130.06	14	27.24	157.3
4	126.08	25	31.31	157.39

Tabla 5.2.2.3. Condiciones después del secado del suelo arcilloso "La Solana"

FLANERAS	PESO FLANERA	GOLPES	PESO MAT SECO	PESO FLANERA + MAT SECO.
No.	gr	No.	gr	gr
1	121.9	12	36.28	158.18
2	120.87	30	20.52	141.39
3	130.06	14	19.49	149.55

4	126.08	25	22.66	148.74

Tabla 5.2.2.4. Relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “La Solana”

FLANERA	PESO FLANERA	PESO FLANERA + MAR HUMED	PESO FLANERA + MAR SECO	CONTENIDO DE HUMEDAD (w)	GOLPES	
No.	gr	gr	gr	%		No.
1	121.9	172.98	158.18	40.79		12
2	120.87	149.13	141.39	37.72		30
3	130.06	157.3	149.55	39.76		14
4	126.08	157.39	148.74	38.17		25

Tabla 5.2.2.5. Resumen ordenado de la relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “La Solana”

DATOS ORDENADOS	
W	GOLPES
%	No.
40.79	12
39.76	14
38.17	25
37.72	30

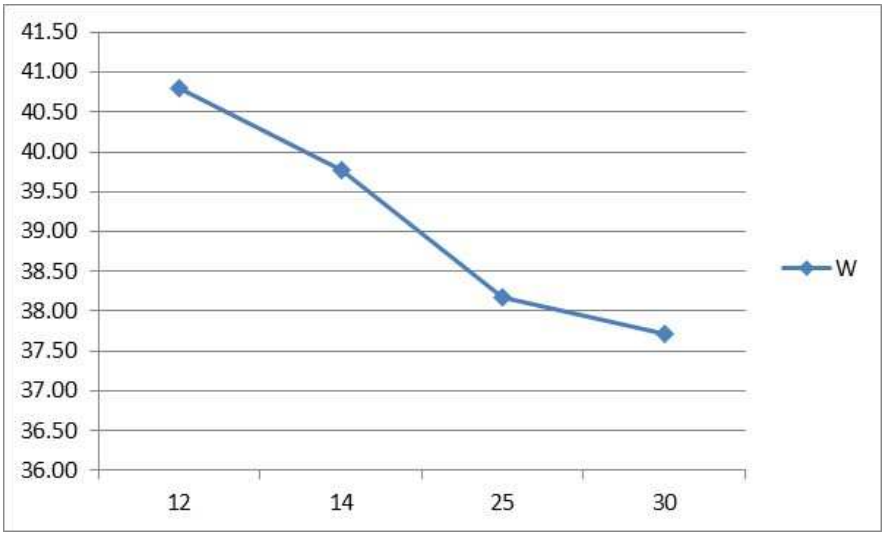


Fig. 5.2.2.8. Relación golpes/contenido de humedad, suelo arcilloso “La Solana”

Límite líquido del suelo “La Solana” para 25 golpes: 38.17

Suelo arcilloso “San Nicolás A”

Tabla 5.2.2.6. Condiciones antes del secado del suelo arcilloso “San Nicolás A”

FLANERAS	PESO FLANERA	GOLPES	PESO MAT HUMEDO	PESO FLANERA + MAT HUMED.
No.	gr	No.	gr	gr
1	58.6	12	20	78.6
2	58.65	26	20	78.65
3	58.64	21	20	78.64
4	58.63	27	20	78.63

Tabla 5.2.2.7. Condiciones después del secado del suelo arcilloso “San Nicolás A”

FLANERAS	PESO FLANERA	GOLPES	PESO MAT SECO	PESO FLANERA + MAT SECO.
No.	gr	No.	gr	gr
1	58.6	12	13.79	72.39
2	58.65	26	13.96	72.61
3	58.64	21	13.66	72.3
4	58.63	27	13.61	72.24

Tabla 5.2.2.8. Relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “San Nicolás A”

FLANERA	PESO	PESO FLANERA	PESO FLANERA +	CONTENIDO DE	GOLPES

	FLANERA	+ MAR HUMED	MAR SECO	HUMEDAD (w)	
No.	gr	gr	gr	%	No.
1	58.6	78.6	72.39	45.03	12
2	58.65	78.65	72.61	43.27	26
3	58.64	78.64	72.3	46.41	21
4	58.63	78.63	72.24	46.95	27

Tabla 5.2.2.9. Resumen relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “San Nicolás A”

DATOS ORDENADOS	
W	GOLPES
%	No.
45.03	12
46.41	21
43.27	26
46.95	27

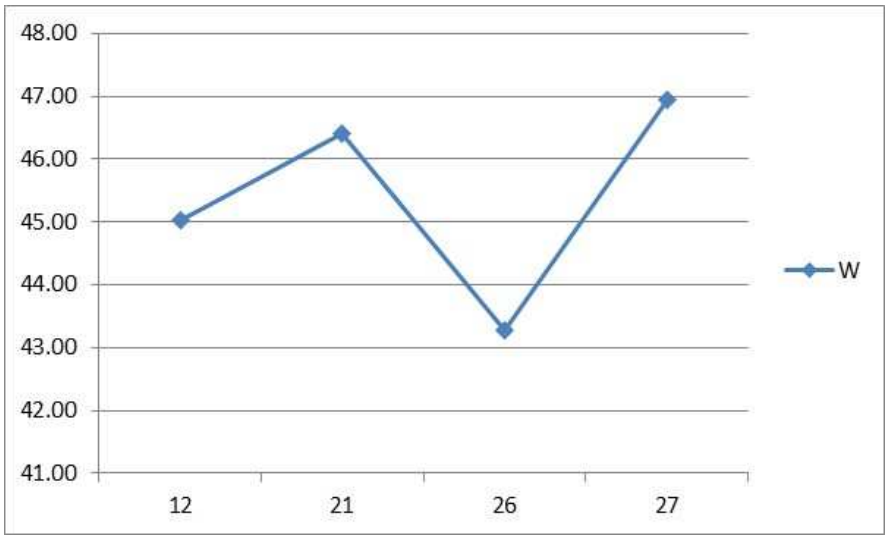


Fig. 5.2.2.9. Relación golpes/contenido de humedad, suelo arcilloso “San Nicolás A”

Límite líquido del suelo “San Nicolás A” para 25 golpes: 44.00

Suelo arcilloso “San Nicolás B”

Tabla 5.2.2.10. Condiciones antes del secado del suelo arcilloso “San Nicolás B”

FLANERAS	PESO FLANERA	GOLPES	PESO MAT HUMEDO	PESO FLANERA + MAT HUMED.
No.	gr	No.	gr	gr
1	8.57	16	20	28.57

2	8.49	28	20	28.49
3	8.38	22	20	28.38
4	8.4	25	20	28.4

Tabla 5.2.2.11. Condiciones después del secado del suelo arcilloso “San Nicolás B”

FLANERAS	PESO FLANERA	GOLPES	PESO MAT SECO	PESO FLANERA + MAT SECO.
No.	gr	No.	gr	gr
1	8.57	12	13.78	22.35
2	8.49	26	13.92	22.41
3	8.38	21	13.86	22.24
4	8.4	27	13.95	22.3

Tabla 5.2.2.12. Relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “San Nicolás B”

FLANERA	PESO FLANERA	PESO FLANERA + MAR HUMED	PESO FLANERA + MAR SECO	CONTENIDO DE HUMEDAD (w)	GOLPES
No.	gr	gr	gr	%	No.
1	8.57	28.57	22.35	45.14	16
2	8.49	28.49	22.41	43.68	28
3	8.38	28.38	22.24	44.30	22
4	8.4	28.4	22.3	43.88	25

Tabla 5.2.2.13. Resumen, relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “San Nicolás B”

DATOS ORDENADOS	
W	GOLPES
%	No.
45.14	16
44.30	22
43.88	25
43.68	28

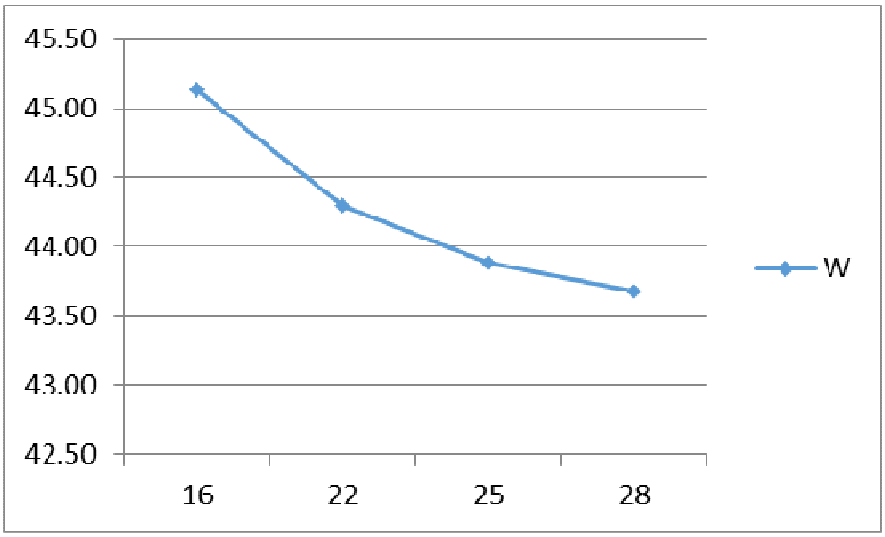


Fig. 5.2.2.10. Relación golpes/contenido de humedad, suelo arcilloso “San Nicolás B”

Límite líquido del suelo “San Nicolás B” para 25 golpes: 43.88

Suelo arcilloso “Amealco”

Tabla 5.2.2.14. Condiciones antes del secado del suelo arcilloso “Amealco”

FLANERAS	PESO FLANERA	GOLPES	PESO MAT HUMEDO	PESO FLANERA + MAT HUMED.
No.	gr	No.	gr	gr
1	123.7	16	19.98	143.68
2	127.33	21	20.49	147.82
3	121.24	25	18.91	140.15
4	117.55	33	24.6	142.15

Tabla 5.2.2.15. Condiciones después del secado del suelo arcilloso “Amealco”

FLANERAS	PESO FLANERA	GOLPES	PESO MAT SECO	PESO FLANERA + MAT SECO.
No.	gr	No.	gr	gr
1	123.7	16	14.44	138.14
2	127.33	21	14.87	142.2
3	121.24	25	13.75	134.99
4	117.55	33	17.98	135.53

Tabla 5.2.2.16. Relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “Amealco”

FLANERA	PESO FLANERA	PESO FLANERA + MAR HUMED	PESO FLANERA + MAR SECO	CONTENIDO DE HUMEDAD (w)	GOLPES
No.	gr	gr	gr	%	No.
1	123.7	143.68	138.14	38.37	16
2	127.33	147.82	142.2	37.79	21
3	121.24	140.15	134.99	37.53	25
4	117.55	142.15	135.53	36.82	33

Tabla 5.2.2.17. Resumen, relación contenido de humedad y número de golpes, suelo arcilloso “Amealco”

DATOS ORDENADOS	
W	GOLPES
%	No.
38.37	16
37.79	21
37.53	25
36.82	33

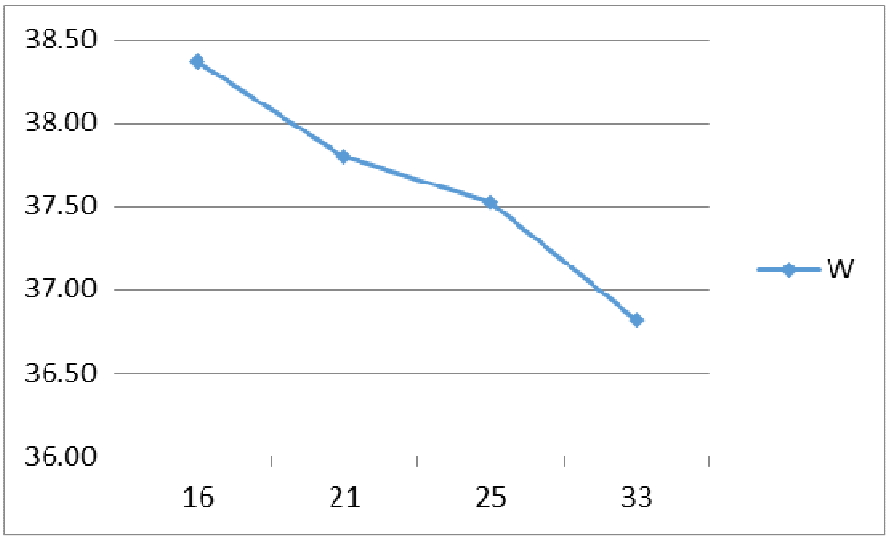


Fig. 5.2.2.11. Relación golpes/contenido de humedad, suelo arcilloso “Amealco”

Límite líquido para 25 golpes: 37.53

Tenemos un límite líquido para 25 golpes de 38.17 en el caso de la muestra de “La Solana”, el segundo más bajo, 44.00 de “San Nicolás A”, el más alto, 43.88 de “San Nicolás B” y 37.53 en el caso de “Amealco”, el más bajo.

+ Índice de contracción lineal (**CL**).

Tabla 5.2.2.18. Índice de contracción lineal (CL).

	MOLDE DE CONTRACCIÓN LINEAL						
	MEDIDA INICIAL (mm)			MEDIDA FINAL (mm)			CL
	altura	base	largo	altura	base	largo	%
LA SOLANA	22.25	21.61	100.7	21.12	19.91	92.58	8.81
SAN NICOLAS A	22.41	25.88	105.3	18.49	19.53	90.19	16.78
SAN NICOLAS B	20.74	25.31	104.8	17.87	19.42	91.12	15.04
AMEALCO	22.08	21.52	100.7	20.18	20.01	90.68	11.02

La muestra de “La Solana” tiene el índice de contracción lineal más bajo con un valor del 8.81%, seguido de la muestra de “Amealco” con un valor del 11.02%. Siendo preferible el valor más bajo para evitar problemas de fisuras en el periodo de secado que es cuando sucede la contracción.

+ Límite de contracción (**LC**).

Tabla 5.2.2.19. Límite de contracción (LC).

	CAJA DE PETRI									
	MEDIDIA INICIAL (cm)		MEDIDA FINAL (cm)		V_1	V_2	W_m	W_s	γ_o	LC
MATERIAL	**Diámetro**	**Altura**	**Diámetro**	**Altura**	**cm^3**	**cm^3**	**gr**	**gr**	**kg/cm^3**	**%**
LA SOLANA	5.1	1.7	4.71	1.8	35.1	39.1	77	62	0	25.1
SAN NICOLAS A	6.3	0.8	5.49	0.6	17.0	14.8	39	32	0	19.9
SAN NICOLAS B	5.6	1.7	4.89	1.4	42.6	26.8	76	61	0	24.9
AMEALCO	6.1	0.8	5.57	0.7	22.3	17.5	43	41	0	4.0

La muestra de “La Solana” tiene el valor del límite de contracción más alto con un valor del 8.81%, seguido de la muestra de “San Nicolás B” con un valor de 24.9 y siendo el valor más bajo el de la muestra de “Amealco” con un valor del 11.02%.

Según los diferentes estudios realizados se determina que es el suelo arcillos “La Solana” el que resulta más adecuado de los diferentes suelos estudiados con sus características más favorables a la hora de hablar de granulometría, retracción y límite líquido Por esta razón y por la localización geográfica del banco de donde se obtiene se

decide utilizar el suelo “La Solana” como suelo para hacer el compuesto base para fases posteriores de experimentación.

5.2.3 Caracterización de la matriz del compósito: puzolanas

Tabla. 5.2.3.1. Resumen de las puzolanas analizadas y su procedencia.

Sigla	Producto	Origen y métodos de obtención
BD	polvo de ladrillo de arcilla cocida	procedente de una planta de producción tradicional de la región.
FA	ceniza de volcán	colectada de la última erupción, en junio del 2013, del volcán Popocatépetl en el estado de Puebla (México) y a partir de arena de volcán colectada en las faldas del mismo volcán.
VA	ceniza volante	recogida como residuo de una planta carbono-eléctrica en el estado de Coahuila (México).
BSA	ceniza de paja de cebada	procedente de planta de cebada de la región de ‘El Bajío (México), calcinada en el exterior sin control de temperaturas y tiempos de quema, buscando reproducir la quema convencional según los agricultores de la región.
WSA	ceniza de la paja de trigo	procedente de planta de cebada de la región de ‘El Bajío’ (México), calcinada en el exterior sin control de temperaturas y tiempos de quema.

Determinación de características químicas, mineralógicas y fases cristalinas

+ Fluorescencias de Rayos X: Composición química por análisis elemental por trazas de con micro fluorescencia de rayos X (MXRF). Se usa un Micro-Spot X-Trace de alto rendimiento para el equipo de SEM de la marca Bruker modelo XL 30 ESEM. Este análisis químico de la WSA mostró un alto contenido, porcentaje por peso, de sílice (Si) y potasio (K), 31,82% y 43,41% respectivamente, seguido del calcio (Ca), el fósforo (P), el cloro (Cl) y el hierro (Fe). Para las otras puzolanas se mostró un alto contenido en Si y Al, 61,32% y 15,64% respectivamente en BD, 53,04% y 21,03%, respectivamente en FA. En BD y FA se da también un alto contenido de hierro (Fe). Se muestran más detalles en la tabla 2. En este tipo de análisis cabe destacar que no se detectan elemento como el carbono (C) y el oxígeno (O) (tabla 5.2.3.2).

Tabla. 5.2.3.2. Composición química, por análisis elemental por trazas con micro fluorescencias de rayos X (XRF)

	Na(%)	Mg(%)	Al(%)	Si(%)	S(%)	K(%)	Ca(%)	Ti(%)	Cr(%)	Mn(%)	Fe(%)	Zn(%)	P(%)	Cl(%)	Br(%)	Sr(%)
BD	**1.56**	**0.42**	**15.64**	**61.32**	**0.39**	**5.14**	**4.38**	**1.59**	**0.04**	**0.21**	**9.18**	**0.06**	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**0.09**
FA	**0.00**	**0.58**	**21.03**	**53.04**	**0.45**	**3.37**	**8.51**	**1.83**	**0.00**	**0.00**	**11.02**	**0.04**	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**0.16**
VA	**4.09**	**1.55**	**14.11**	**50.73**	**0.09**	**4.49**	**11.49**	**1.47**	**0.05**	**0.18**	**11.41**	**0.03**	**0.18**	**0.00**	**0.00**	**0.17**
BSA	**4.12**	**1.23**	**2.72**	**21.15**	**2.47**	**38.03**	**10.02**	**0.29**	**0.08**	**0.10**	**3.50**	**0.05**	**0.70**	**15.24**	**0.11**	**0.09**
WSA	**0.41**	**1.46**	**1.02**	**31.82**	**1.50**	**43.41**	**9.53**	**0.26**	**0.00**	**0.22**	**2.37**	**0.09**	**4.21**	**3.56**	**0.07**	**0.09**

+ Fases cristalinas y componentes mineralógicos por difracción de rayos X (XRD). Se lleva a cabo un análisis de XRD de gran angular en un difractómetro Rigaku Ultima IV con condiciones de operación de 40 KV y 30 mA, con radiación CuKα y longitud de onda de λ= 1,5406 Å. Los resultados fueron recogidos de 5° a 80° en una escala de 2θ con el detector Solid State D/teX-ULTRA Detector y con una velocidad de 10°/min y un muestreo de 0,02 s. Se usó el programa computacional MDI Jade V 5.0.37. La figura 5.2.3.1 muestra los patrones de XRD de los materiales puzolánicos estudiados.

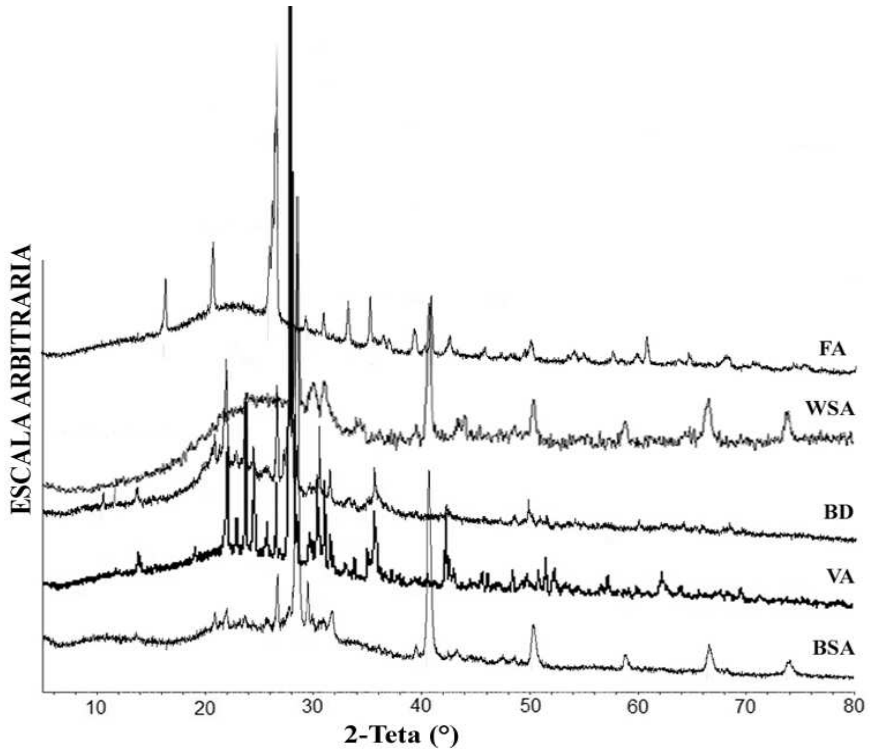


Fig. 5.2.3.1. Comparación de las fases cristalinas por DRX de FA, VA, WSA, BSA y BD

En las gráficas comparativas se denota un mayor carácter amorfo en el caso de BSA, FA y BD. La detección de las fases cristalinas se expone posteriormente en el caso de estas tres muestras.

+ Espectroscopia de Energía Dispersiva (SEM-EDS):

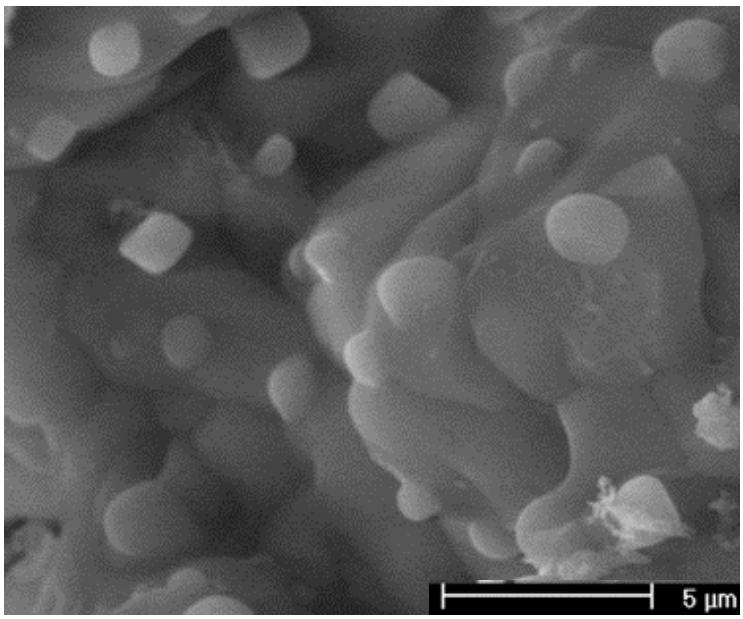


Fig. 5.2.3.3. Micrografía SEM de BSA a 5000x

SEM de BSA a 5000x

En la figura, se muestra la morfología y microestructura característica de BSA, a un aumento de 250x. En la siguiente figura se muestran diferentes morfologías, cuasi-esferas, como la geometría más característica, analizada a partir de un estudio EDS, como muestran las figuras 6 y 7. A partir de este EDS, reflejado en la figura 5.2.3.3, se detectó la presencia de Si, Al, K, Cl, Ca, Na, Mg y Fe. Se ve como prevalece la proporción de Silicio, seguido de Potasio y hierro, existiendo una porción considerable de Aluminio.

Tabla. 5.2.3.3. Composición química a partir del análisis EDS sobre los puntos 1, 2 y3 de la muestra BSA.

	Na(%)	Mg(%)	Al(%)	Si(%)	K(%)	Ca(%)	Fe(%)	Cl(%)
p1	2.12	0.66	1.74	13.92	6.72	2.02	4.22	1.59
p2	1.96	0.63	2.99	12.42	7.34	2.20	4.67	1.77
p3	1.25	0.56	3.09	8.67	8.07	1.87	1.86	2.47

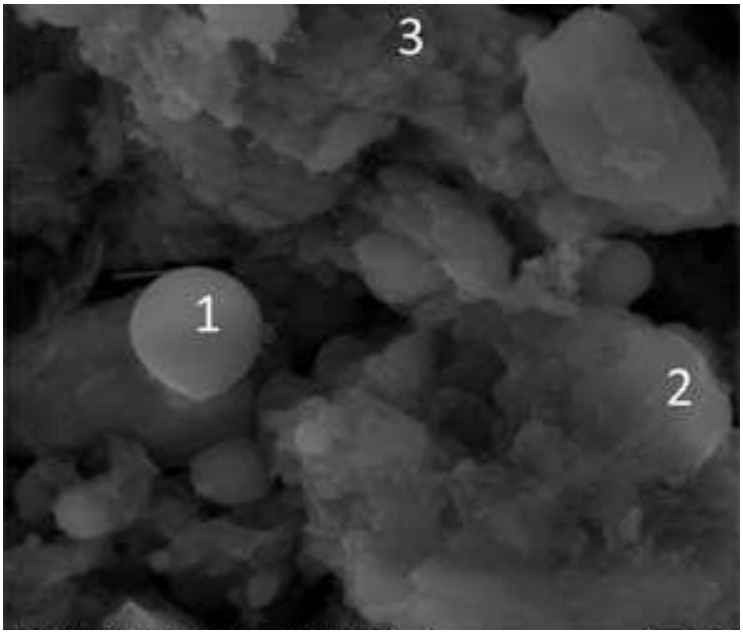


Fig. 5.2.3.4. MIcrografía SEM de BSA a 5000x, referencia para el análisis EDS

- Determinación de morfología micro-estructural:

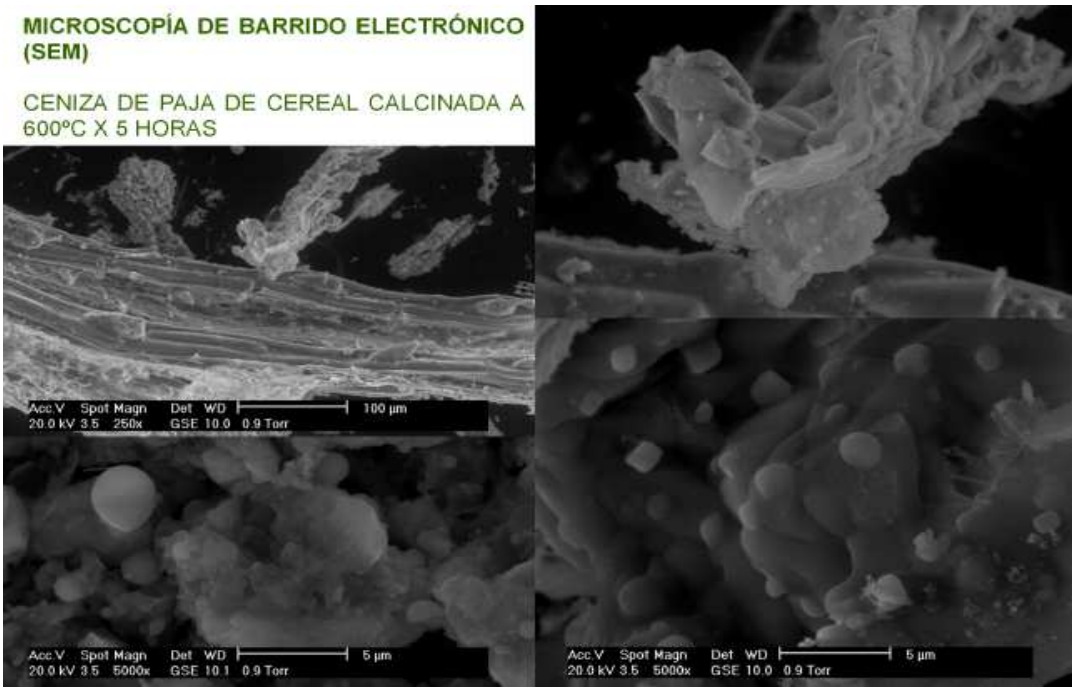


Fig. 5.2.3.5. MIcrografía SEM de BSA

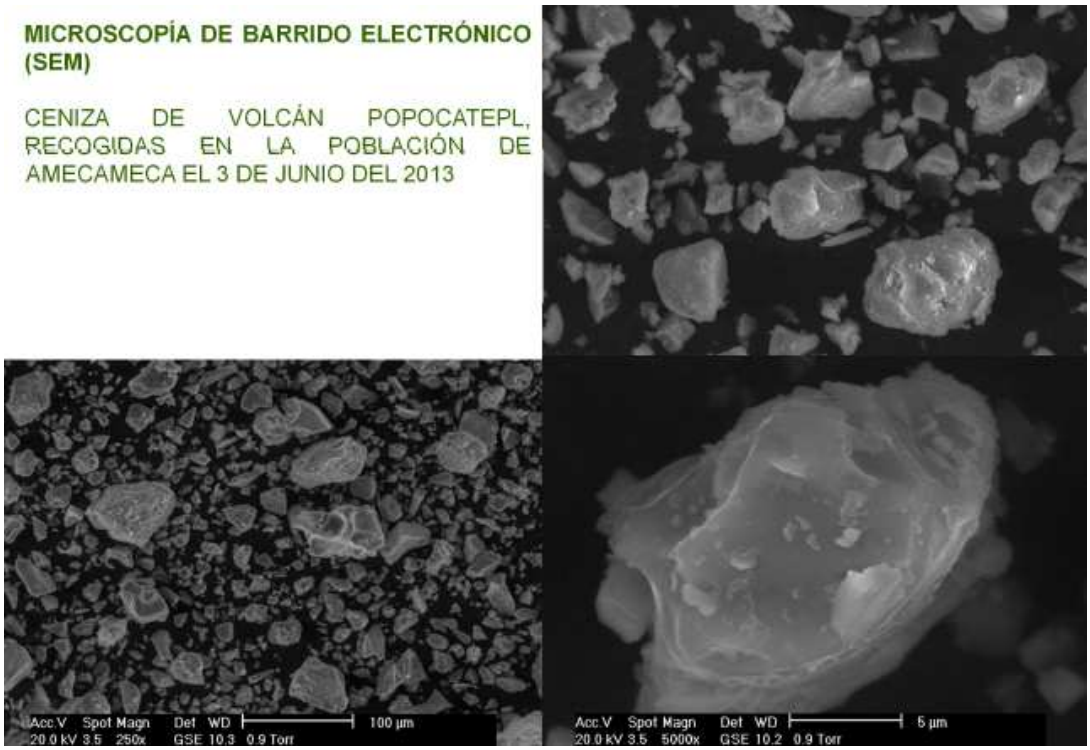


Fig. 5.2.3.6. MIcrografía SEM de VA



Fig. 5.2.3.7. MIcrografía SEM de BD

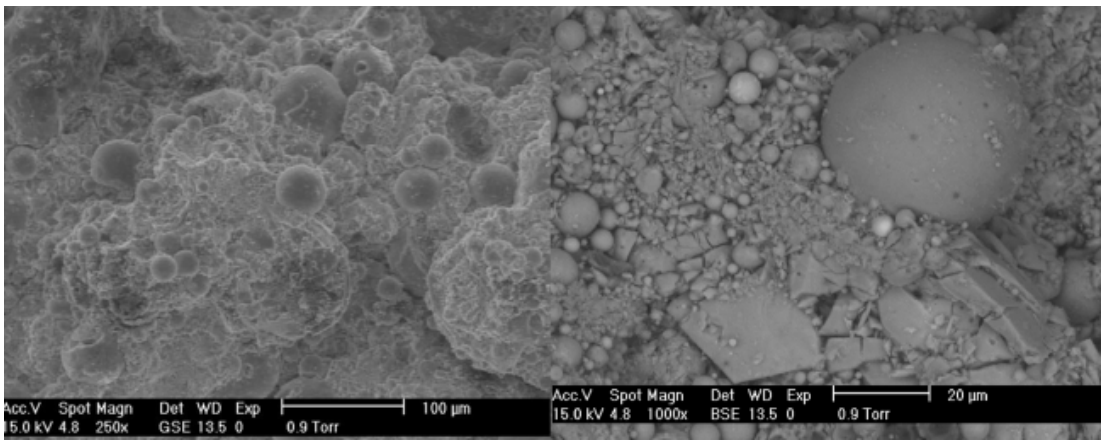


Fig. 5.2.3.8. MIcrografía SEM de FA

En la figura 5.2.3.5 observamos la formación de cuasi xeno-esferas, como estructura característica de la muestra BSA. En la figura 5.2.3.6 se observan estructuras escamosas, lo que es habitual en las imágenes SEM de las cenizas volcánicas, algo parecido observamos en el polvo de ladrillo en la figura 5.2.3.7, siendo en la figura 5.2.3.8 donde se observa la estructura más característica como son xeno-esferas de diferentes tamaños, algo característico

de las cenizas volantes y que puede ser señal de un posible posterior buen funcionamiento como material puzolánico.

Análisis de la actividad puzolánica

+ Fracción Soluble en Agua (WSF): BSA presenta un 33,10% de WSF, más que ninguna otra puzolana, seguido de BD y FA, con 31,10% y 31,20% respectivamente (Tabla 5.2.3.3.). Es importante asegurar un mínimo de WSF como para garantizar la reacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio. Así, BSA, BD y FA, mostraron resultados favorables.

Tabla. 5.2.3.4. Fracción soluble en agua (WSF)

	BD	FA	VA	BSA	WSA
WSF(%)	31.10	31.20	5.10	33.10	28.50

VA*: Ceniza volcánica tamizada

+ Tamaño de partícula (PS): el estudio de tamaño de partícula por porcentaje de retención en los tamices 30 (600 µm) y 200 (75 µm) muestra como BSA tiene un alto porcentaje de retención tanto en la malla de 75 µm como también en la de 600 µm. La mejor distribución de partículas o las puzolanas con mayor porcentaje de finos fueron BD y FA (Tabla. 5.2.3.4).

Tabla. 5.2.3.5. Tamaño de partícula (PS), por retención acumulativa al pasar por las mallas 30 y 200.

	Retenido 30(600µm) (%)	Retenido acumulado 30(600µm) (%)	Retenido 200(75µm) (%)	Retenido acumulado 200(75µm) (%)
BD	0.40	0.40	35.93	70.85
FA	0.29	0.29	30.68	49.77
VA	0.62	0.67	2.68	98.95
BSA	2.21	2.21	7.58	94.62
WSA	22.43	22.43	5.12	95.70

+ Distribución por intensidad del tamaño de partículas finas (SDI): como se muestra en la figura, se puede observar un porcentaje significativo de partículas finas de BSA y una más estrecha distribución por intensidad en comparación con las otras

puzolanas estudiadas, muy similar a BD y VA. FA presenta el peor resultado y WSA y VA fueron identificadas por tener una distribución bimodal de los tamaños de partículas finas.

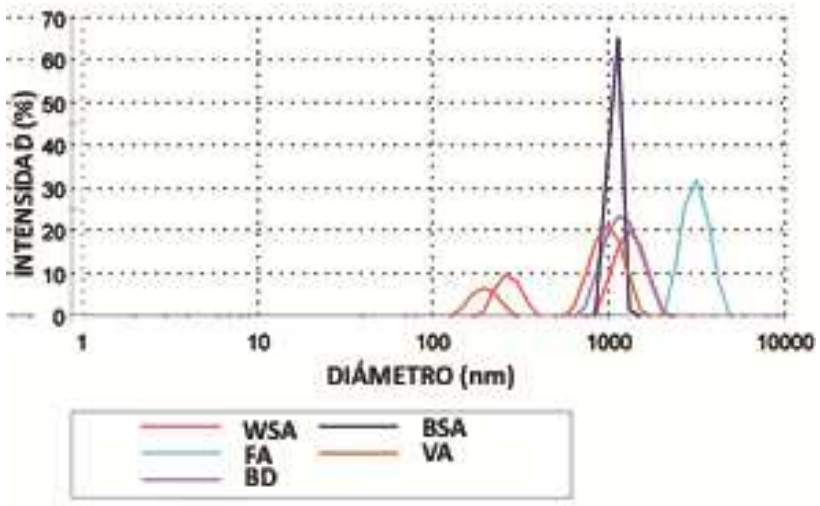


Fig. 5.2.3.9. Distribución de tamaño fino de partícula por intensidad

+ Desarrollo de resistencia de la mezcla puzolana-cal-arena: los resultados de esta prueba muestran como BSA no tiene un mal resultado en la medición a los 7 días en condiciones controlados en horno. Después de esto no se observa una evolución en el aumento de la resistencia bajo condiciones controladas a los 28 días. Los mejores resultados se obtuvieron para FA y BD en la evolución de la resistencia en los primeros 7 días y BD tuvo los mejores resultados en la prueba de resistencia a los 28 días (Figura 5.2.3.10).

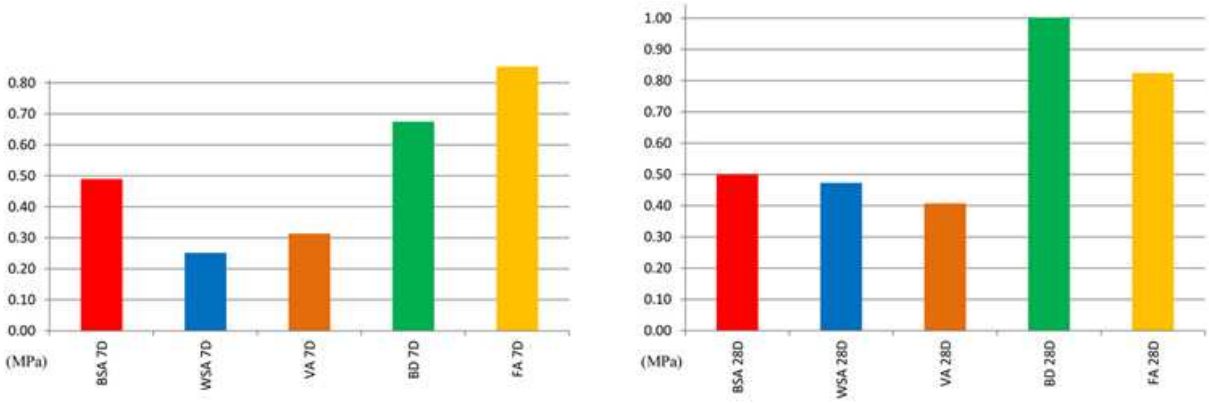


Fig. 5.2.3.10. Resistencia de compuesto de cal y puzolana a los 7 y 28 días bajo condiciones controladas

+ Medición de la conductividad eléctrica de una solución de cal y puzolana mezcla, su evolución en el tiempo y la obtención de los parámetros cinéticos (ECMM): los resultados obtenidos se muestran en la figura, donde se muestra la variación de la conductividad (μS/cm) en relación al tiempo de reacción (h). El punto inicial de cada curva se adapta para tener todos los puntos de inicio de reacción con el mismo valor y poder comparar las curvas entre ellas de manera más efectiva. Se observa una disminución de la conductividad eléctrica en la solución puzolana/CH. Este comportamiento es atribuido a la reacción puzolánica entre el sílice (Si) amorfo y el cal (CH), de donde se obtiene formaciones de gel (C-H-Si), con la correspondiente bajada en la concentración en la solución (Villar-Cociña et al. 2011). Se observa un fuerte descenso de la conductividad en la primera etapa de la reacción en todos los casos. La curva que representa esta caída de la conductividad tiende a estabilizarse en un periodo de tiempo más largo, cuando la reacción casi ha terminado. Se puede notar como las curvas de FA y BD presentan una caída más fuerte que las otras, lo que muestra una mejor reacción entre la puzolana y el CH en una primera etapa.

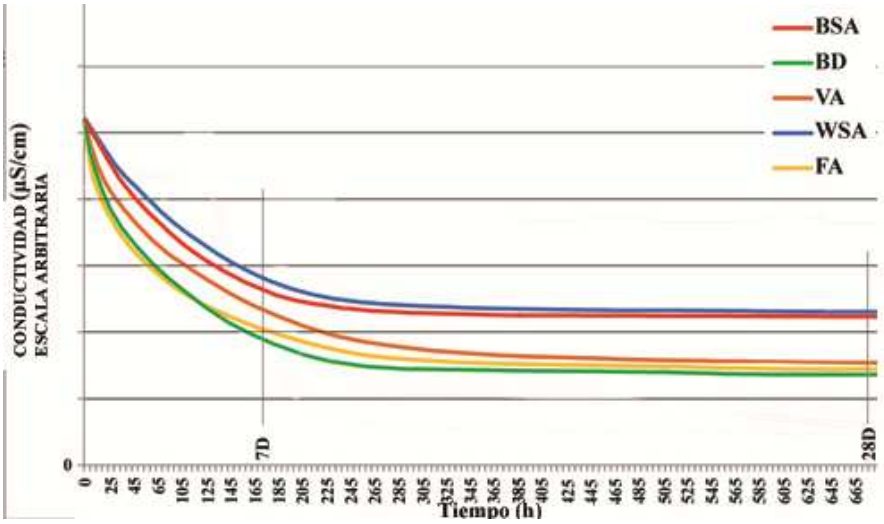


Fig. 5.2.3.11. Reacción cal- puzolana (Estudios de los parámetros cinéticos) según el método de medida de la conductividad eléctrica (ECMM).

+ Evolución de las fases cristalinas y composición mineralógica dentro de la reacción puzolana-cal por medio de Difracción de rayos X: Se compara la presencia de las fases cristalinas en BSA, BD y FA, como muestras ejemplificadoras, y de las mezclas BSA-CH-arena-agua, FA-CH-arena-agua y BD-CH-arena-agua a los 7 días y a los 28 días.

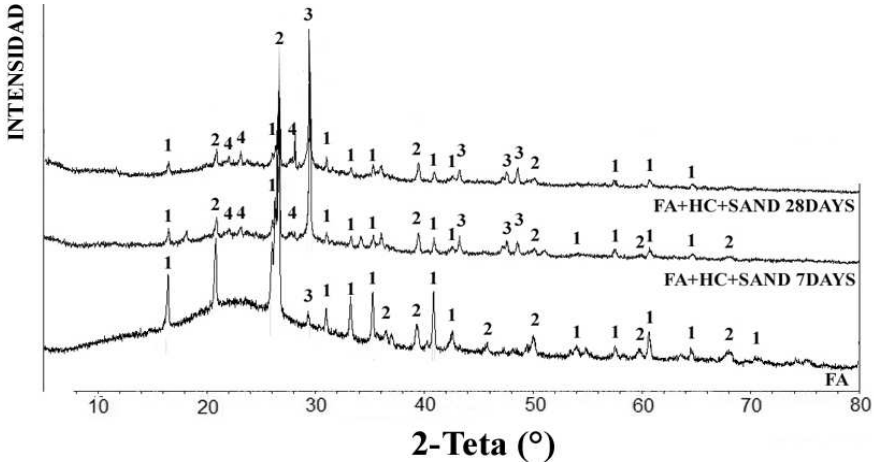


Fig. 5.2.3.12. Evolución de las fases cristalinas estudiadas a partir de difracción de rayos X (XRD) de FA. (1) Mulita (Al6Si2O13), (2) Cuarzo (SiO2), (3) Calcita (CaCO3) y(4) Albita (AlSi3O8)

En la figura 5.2.3.12 se muestra una comparación de los patrones de XRD de las fases cristalinas de FA y la mezcla FA-CH-arena-agua a los 7 días y a los 28 días. En este caso se identifica la presencia de mullita (Al6Si2O13), cuarzo (SiO2), calcita (CaCO3) y albita (AlSi3O8).

Se detecta la presencia estructuras cristalinas de silvita (KCl), cuarzo (SiO2), anortoclasa (AlSi3O8), albita (AlSi3O8) y calcita (CaCO3) en la muestra original de BSA y en la mezcla BSA-CH-arena-agua a los 7 días y a los 28 días (Figura). La silvita casi desaparece en la muestra de la mezcla a los 28 días, mientras que se observa un aumento de la presencia de la calcita. Cuarzo y calcita son las principales estructuras cristalinas.

En la figura 5.2.3.15 se muestra una comparación de los patrones de XRD de las fases cristalinas de BD y la mezcla BD-CH-arena-agua a los 7 días y a los 28 días. En el caso de BD, también se observa la presencia de cuarzo (SiO2), calcita (CaCO3) y albita (AlSi3O8), aunque también se observa yeso [Ca(SO4(H2O)2], anortita [(CaNa)(AlSi)2Si2O8)] como estructuras cristalina de alumino-silicatos. De nuevo la presencia de la calcita aumentó con el tiempo. De manera más evidente en el caso de BSA figura 5.2.3.13, más que en el caso de FA, figura 5.2.3.14, y BD, a lo largo del tiempo hay una mayor presencia de cristalinidad en los compuestos.

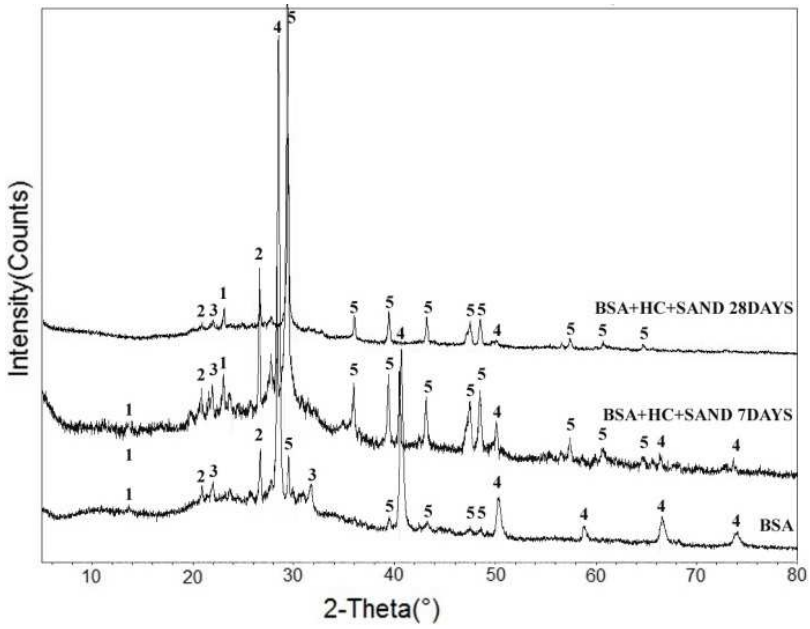


Fig. 5.2.3.13. Evolución de las fases cristalinas durante la reacción puzolánica por DRX de BSA: (1) anortoclasa ($AlSi_3O_8$), (2) cuarzo (SiO_2), (3) albita ($AlSi_3O_8$), (4) sylvita (KCl), y (5) calcita ($CaCO_3$)

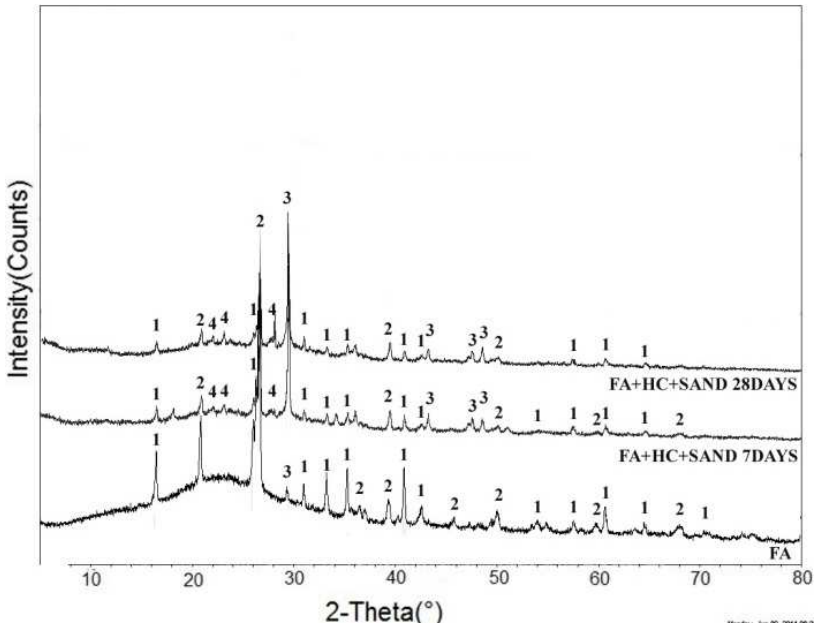


Fig. 5.2.3.14. Evolución de las fases cristalinas durante la reacción puzolánica por DRX de FA: (1) mulita ($Al_6Si_2O_{13}$), (2) cuarzo (SiO_2), (3) calcita ($CaCO_3$), y(4) albita ($AlSi_3O_8$)

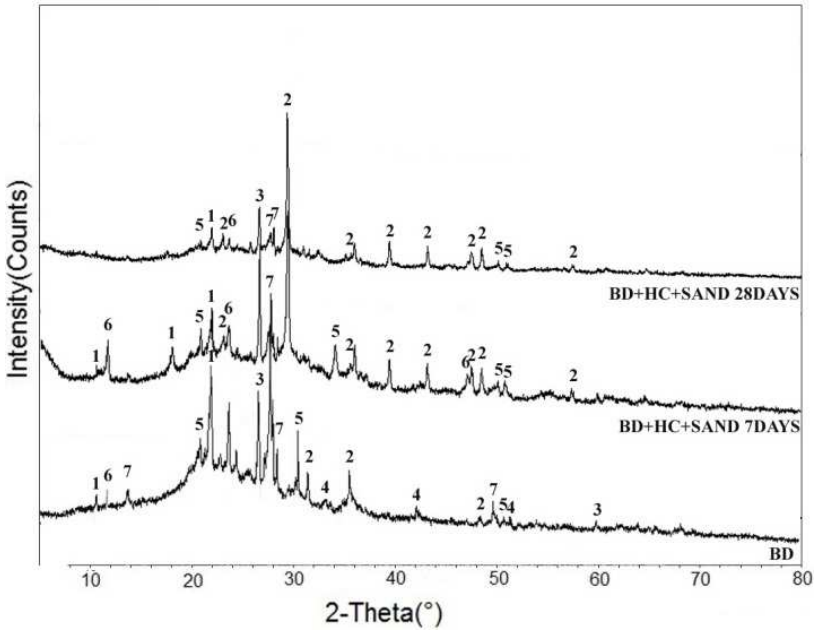


Fig. 5.2.3.15. Evolución de las fases cristalinas durante la reacción puzolánica por DRX de XRD of BD: (1) cordierita($Mg_2(Al_4Si_5O_{18})$), (2) calcita($CaCO_3$), (3) cuarzo (SiO_2), (4) yeso ($Ca(SO_4(H_2O)_2)$), (5) brushita ($CaPO_3(OH)_2(H_2O)$), (6) meixnerita ($((Mg_5Al_3(OH)_{16})(OH)_3(H_2O)_4)$), y (7) anortita ($((CaNa)(AlSi)_2Si_2O_8)$)

+ Evolución de la morfología microestructural dentro de la reacción puzolana-cal por medio Escaneo de Microscopia Electrónica: Se examina la evolución de la morfologíay microestructura de las muestra de BD, BSA y FA durante la reacción puzolánica usando las micrografías obtenidas por microscopía de escaneo electrónico (SEM) sobre las mismas muestras usadas en el estudio de la evolución de las fases cristalinas y en el test de desarrollo de resistencia a compresión Cal-Puzolana. En las figuras desde la 5.2.3.16 a la 5.2.3.21 se observa la aparición de nuevas microestructuras en la de la puzolana con el hidróxido de calcio y la arena después de 28 días.

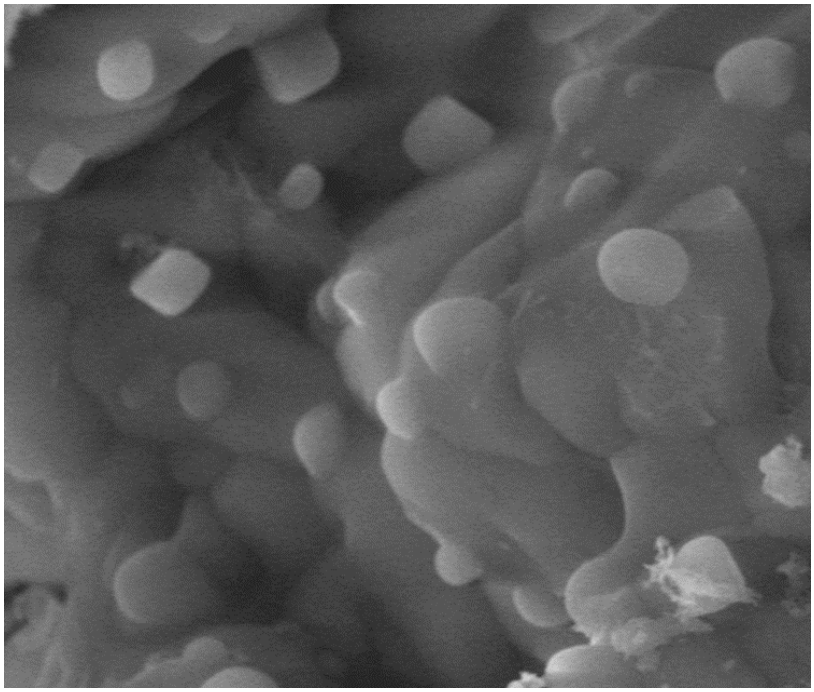


Fig. 5.2.3.16. Micrografía SEM de BSA a 5000x

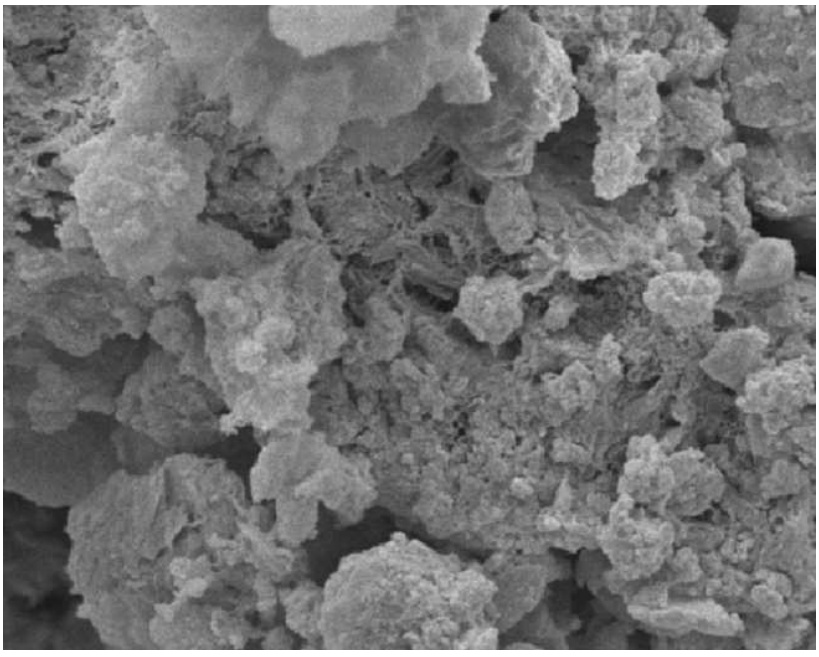


Fig. 5.2.3.17. Micrografía SEM de BSA+CH+Arena después de 28 días a 5000x

Las figuras 5.2.3.16 y 5.2.3.17 muestran la evolución morfológica en el caso del BSA y la reacción con el hidróxido de calcio y la arena, con nuevas estructuras cristalinas alrededor de las cuasi xeno-esferas detectadas en la figura 5.2.3.16.

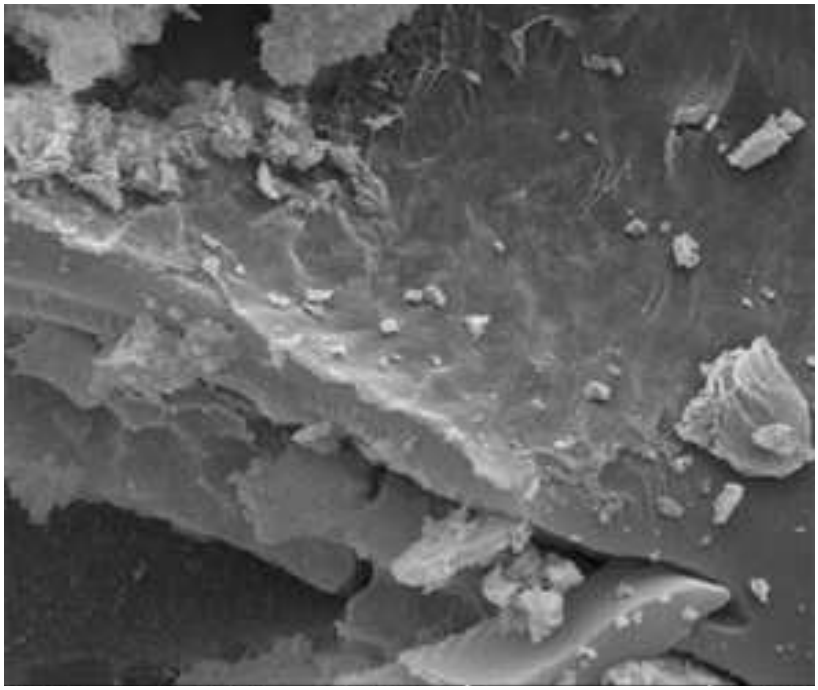


Fig. 5.2.3.18. MIcrografía SEM de BD a 5000x

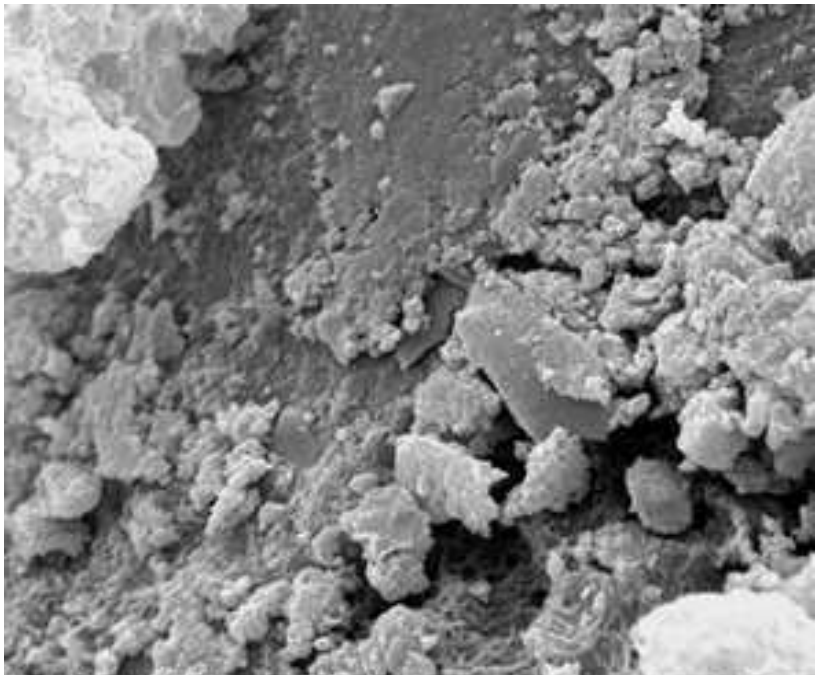


Fig. 5.2.3.19. MIcrografía SEM de BD+CH+Arena después de 28 días a 5000x

En la siguiente imagen, figura 5.2.3.20, se observan las características xenoesferas de la Ceniza Volante y en la figura 5.2.3.21 se observa claramente una

nueva microestructura cristalina alrededor de estas xeno-esferas y uniéndose diferentes elementos y creando nuevas microestructuras.

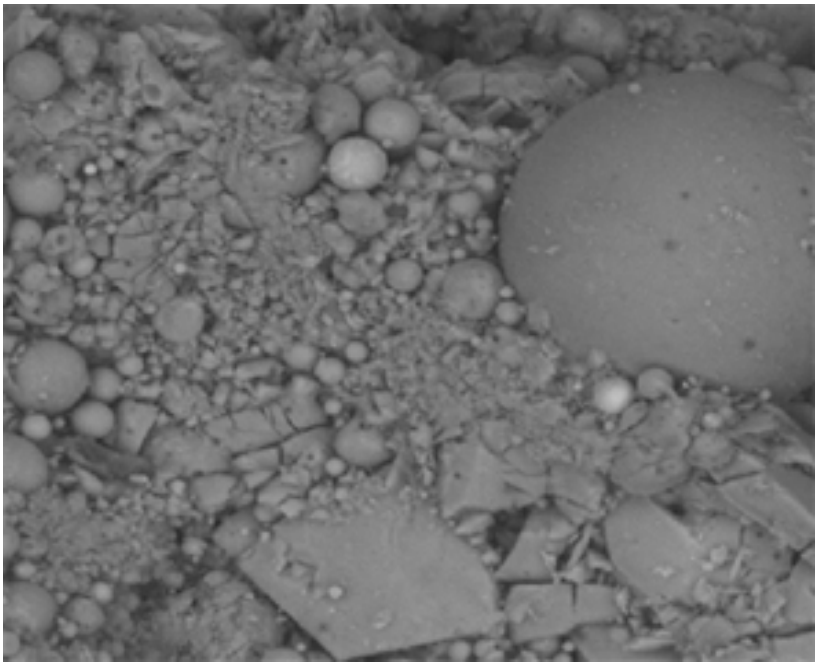


Fig. 5.2.3.20. Micrografía SEM de FA a 1000x

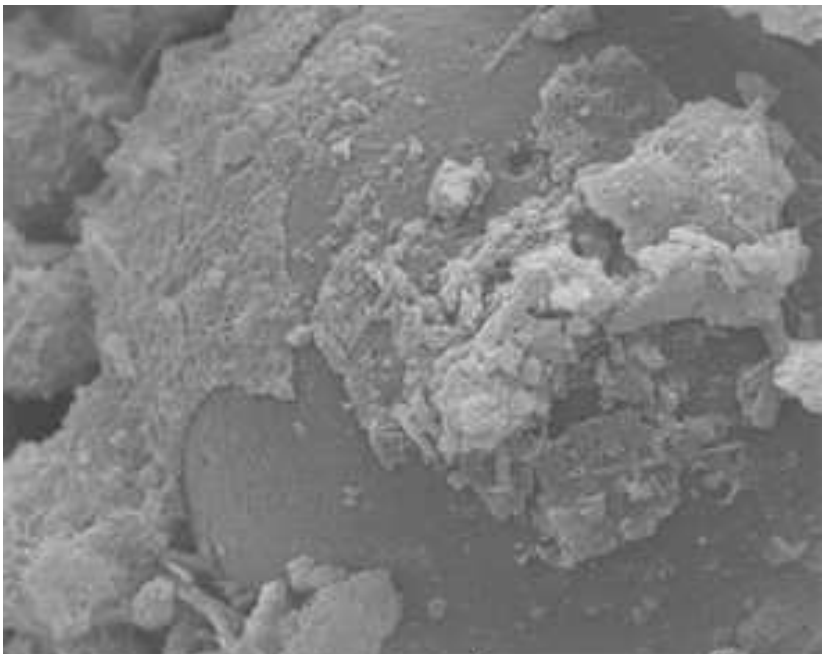


Fig. 5.2.3.21. Micrografía SEM de FA+CH+Arena después de 28 días a 1000x

Las micrografías SEM muestran como las puzolanas fueron activadas por el C h en combinación con la arena después de 28 días en condiciones controladas y como se crearon nuevas microestructuras. Se observa una conexión entre la evolución de las fases cristalinas durante la reacción puzolánica por XRD de BSA, FA y BD y los especímenes BSA-CH-Arena-Agua, BD-CH-Arena-Agua y FA-CH-Arena-Agua y las nuevas microestructuras detectadas en las micrografías SEM.

5.3 Caracterización del compósito

5.3.1 Definición, diseño definitivo y preparación de la campaña experimental

Tabla 5.3.1.1. Relación de los materiales componentes del compuesto arcilloso estudiado

Sigla	Producto	Origen y métodos de obtención
L	cal hidratada	producto comercial procedente de una planta de producción regional.
A	arena	producto comercial de producción regional.
AV	arena volcánica	arena del volcán Popocatépetl en el estado de Puebla (México), colectada en las faldas del mismo volcán.
AR	arenilla	producto comercial de producción regional.
SA	suelo arcilloso	extraído de suelo de terreno de la localidad cercana a Querétaro de La Solana.
PC	paja de cereal	paja de cereal de cebada recolectada en campo experimental INIFAP-Campo Experimental Bajío, Celaya.

Definición de dosificaciones preliminares:

Tabla 5.3.1.2. Relación de las dosificaciones del compuesto estudiados en la fase preliminar.

SIGLAS	DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA
PRE01.01	CEM:30% (L:100%)+SUE:70%(A:100%)
PRE01.02	CEM:30% (L:80%+BD:20%)+SUE:70%(A:100%)
PRE01.03	CEM:30% (L:80%+BSA:20%)+SUE:70%(A:100%)
PRE01.04	CEM:30% (L:80%+FA:20%)+SUE:70%(A:100%)
PRE01.05	CEM:24% (L:80%+BD:20%)+SUE:76%(A:60%+SA:40%)
PRE01.06	CEM:24% (L:80%+BSA:20%)+SUE:76%(A:60%+SA:40%)
PRE01.07	CEM:24% (L:80%+FA:20%)+SUE:76%(A:60%+SA:40%)
PRE01.08	CEM:50% (L:50%+BD:50%)+SUE:50%(A:70%+SA:30%)
PRE01.09	CEM:50% (L:50%+BSA:50%)+SUE:50%(A:70%+SA:30%)
PRE01.10	CEM:50% (L:50%+FA:50%)+SUE:50%(A:70%+SA:30%)
PRE01.11	CEM:30% (L:100%)+SUE:70%(A:70%+SA:30%)
PRE01.12	PC:2%+CEM:29% (L:100%)+SUE:69%(A:69%+SA:31%)
PRE01.13	PC:4%+CEM:28% (L:100%)+SUE:68%(A:68%+SA:32%)
PRE01.14	CEM:30% (L:70%+BD:30%)+SUE:70%(A:70%+SA:30%)
PRE01.15	PC:2%+CEM:29% (L:70%+BD:30%)+SUE:69%(A:70%+SA:30%)
PRE01.16	PC:4%+CEM:28% (L:70%+BD:30%)+SUE:68%(A:70%+SA:30%)
PRE01.17	CEM:30% (L:70%+BSA:30%)+SUE:70%(A:70%+SA:30%)
PRE01.18	PC:2%+CEM:29% (L:70%+BSA:30%)+SUE:69%(A:70%+SA:30%)
PRE01.19	PC:4%+CEM:28% (L:70%+BSA:30%)+SUE:68%(A:70%+SA:30%)
PRE01.20	CEM:30% (L:70%+FA:30%)+SUE:70%(A:70%+SA:30%)
PRE01.21	PC:2%+CEM:29% (L:70%+FA:30%)+SUE:69%(A:70%+SA:30%)
PRE01.22	PC:4%+CEM:28% (L:70%+FA:30%)+SUE:68%(A:70%+SA:30%)

Definición de dosificaciones finales:

Tabla 5.3.1.3. Relación dosificaciones utilizadas en pruebas de caracterización mecánica de los compuestos en su fase final.

SIGLAS	DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA
P01.01	SUELO: (A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P01.02	PC:2% + SUELO:98%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P01.03	PC:4% + SUELO:96%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P02.01	CEMENTANTE:10% (L:100%) + SUELO:90%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P02.02	PC:2% + CEMENTANTE:9% (L:100%) + SUELO:89%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P02.03	PC:4% + CEMENTANTE:8% (L:100%) + SUELO:88%(A20%+AV20%+AR:10%+SA:50%)
P03.01	CEMENTANTE:30% (L:50%+BD:50%) + SUELO:70%(AR:60%+SA:40%)
P03.02	PC:2% + CEMENTANTE:29% (L:50%+BD:50%) + SUELO:69%(AR:60%+SA:40%)
P03.03	PC:4% + CEMENTANTE:28% (L:50%+BD:50%) + SUELO:68%(AR:60%+SA:40%)
P04.01	CEMENTANTE:30% (L:50%+FA:50%) + SUELO:70%(AR:60%+SA:40%)
P04.02	PC:2% + CEMENTANTE:29% (L:50%+FA:50%) + SUELO:69%(AR:60%+SA:40%)
P04.03	PC:4% + CEMENTANTE:28% (L:50%+FA:50%) + SUELO:68%(AR:60%+SA:40%)



Fig. 5.3.1.1. Probetas cilíndricas 10x20cm y paneles 30x30cm para las pruebas para la caracterización mecánica del compuesto en su fase final.



Fig. 5.3.1.2. Probetas cilíndricas 10x20cm y paneles 30x30cm para las pruebas para la caracterización mecánica del compuesto en su fase final.

5.3.2 Desarrollo de la campaña experimental para la caracterización del compuesto

Determinación de características mecánicas básicas

- Resistencia a comprensión: Prueba preliminar de resistencia a compresión. En la figura 5.3.2.1 se puede observar, en primer lugar, una caída del valor de la resistencia a compresión en aquellos especímenes con porcentaje añadido de refuerzo fibroso en forma de paja. Los mayores valores logrados corresponden a las probetas PRE01.08, P01.09 y P01.10, que contienen un alto contenido de material cementante en comparación a la cantidad de suelo, pero que nos permite observar de manera clara la posible reacción entre la puzolana y la cal, destacándose la mezcla PRE01.08 con BD, seguido de la mezcla P01.10 con FA. En general, los resultados más destacables

son alcanzados con mezclas donde se incluye BD y FA, excepto en el caso del resultado de PRE01.03, que destaca el espécimen donde se ha añadido BSA con respecto a sus análogos PRE01.02 y PRE01.04.

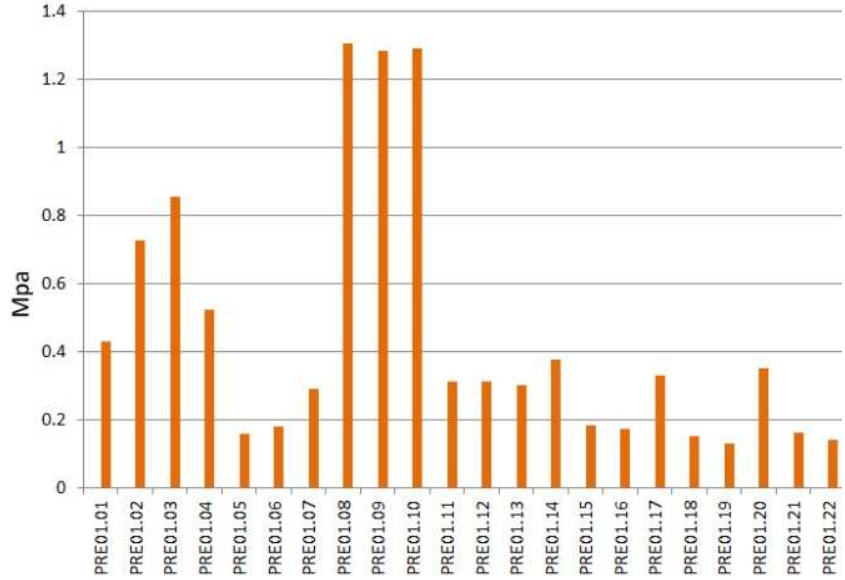


Fig. 5.3.2.1. Resultados de pruebas preliminares de resistencia a compresión, medido en Mpa.

- En la figura 5.3.2.2 se observa la comparativa entre las probetas cilíndricas 10x20 donde los especímenes se diferencian en trabajar la estabilización por medio del añadido de cal y puzolana, BD y FA, en el caso de P02.01, P02.02, P02.03, P03.01, P03.02, P03.03, donde sólo varía la cantidad de añadido del refuerzo fibroso, a diferencia de los especímenes P01.01, P01.02, P01.03, donde se trabaja la estabilización con un ajuste de la granulometría mezclando los dos diferentes tipos de arena y la arenilla con el suelo y sólo añadiendo la cal como elemento estabilizante sin puzolanas. Se muestran los resultados a 14 y 28 días. Se observa un mejor resultado en el caso P03.01, con parecidos resultados en el caso de P01.01 y P02.01, aunque se observa una evolución más favorable de los 14 días a los 28 de la probeta P02.01. Siempre bajan de manera significativa los valores cuando se añade refuerzo fibroso.

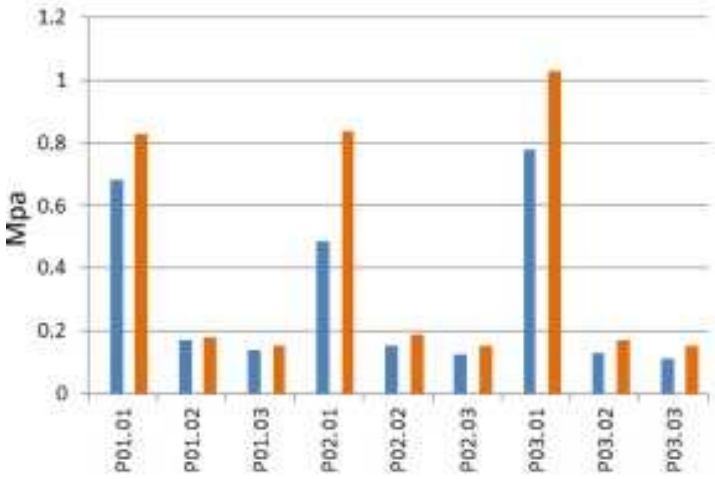


Fig. 5.3.2.2. Resultados de pruebas preliminares de resistencia a compresión, medido en Mpa.

+ Resistencia a flexo-comprensión: En la figura 5.3.2.3 se observa la comparativa entre los paneles 30x30x10 donde los especímenes se diferencian en su composición de manera análoga que en el caso de los cilindros 10x20, donde también se muestran los resultados a 14 y 28 días. También se observa un mejor resultado en el caso P03.01, con parecidos resultados en el caso de P01.01 y P02.01, y se observa una evolución más favorable de los 14 días a los 28 de la probeta P02.01. Siempre bajan de manera significativa los valores cuando se añade refuerzo fibroso.

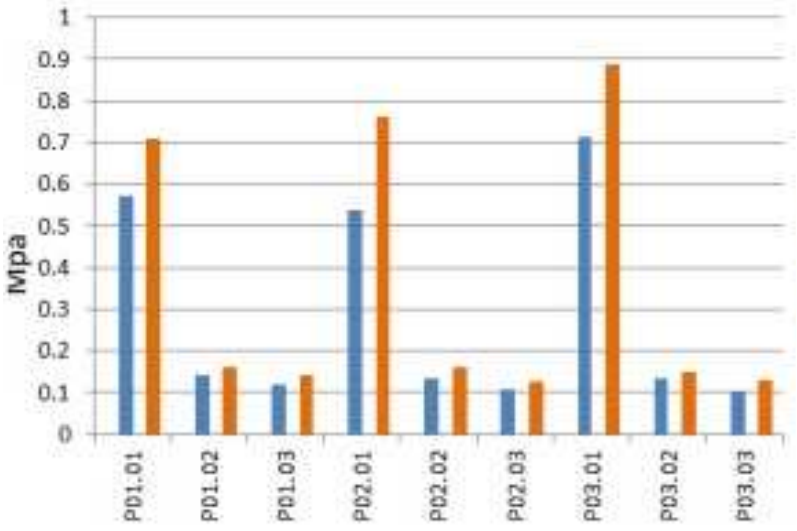


Fig. 5.3.2.3. Resultados de pruebas preliminares de resistencia a flexo-compresión, medido en Mpa**.**

Determinación de la durabilidad del material

- Capacidad de absorción de agua:

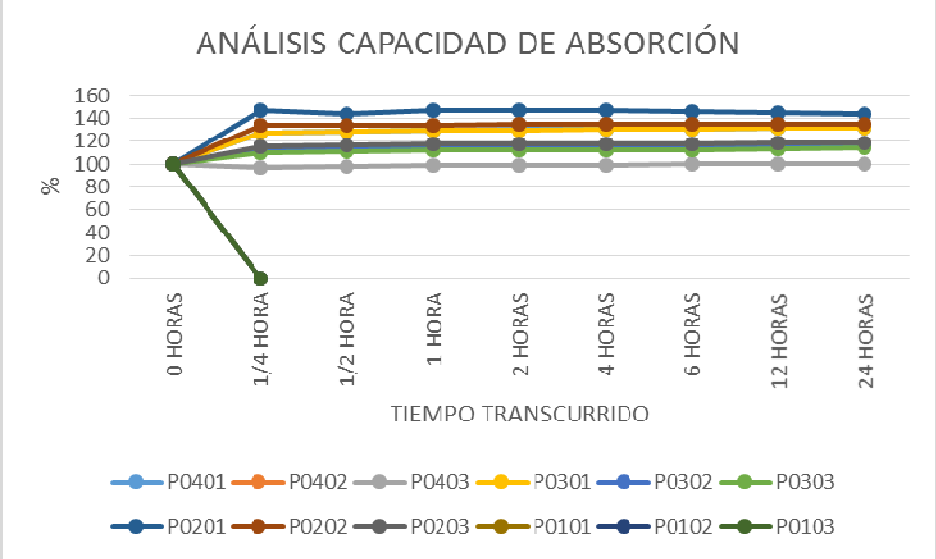


Fig. 5.3.2.4. Análisis de absorción con las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403.

En el análisis de capacidad de absorción, acción que no es favorable para el compuesto arcilloso, de las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 vemos como las probetas P0101, P0102 Y P0103, compuestos sin ningún estabilizante, pierden su consistencia en el primer ciclo. Los mejores resultados los obtenemos con la probeta P0403 y el peor resultado lo obtiene la probeta p0201.

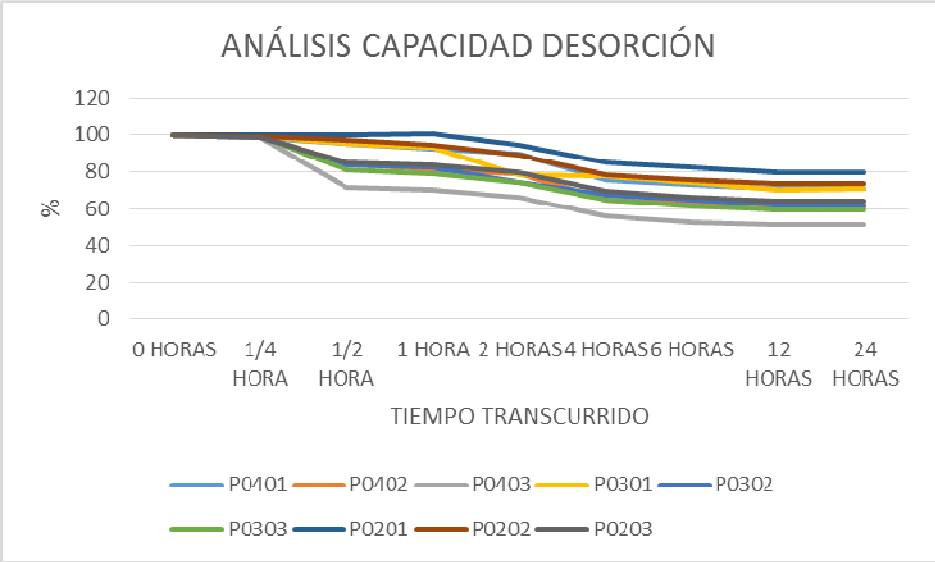


Fig. 5.3.2.5. Análisis de desorción con las probetas
P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403.

En la prueba de desorción de las probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 la desorción más alta la tenemos con la probeta P0403 y la más baja con la P0201.

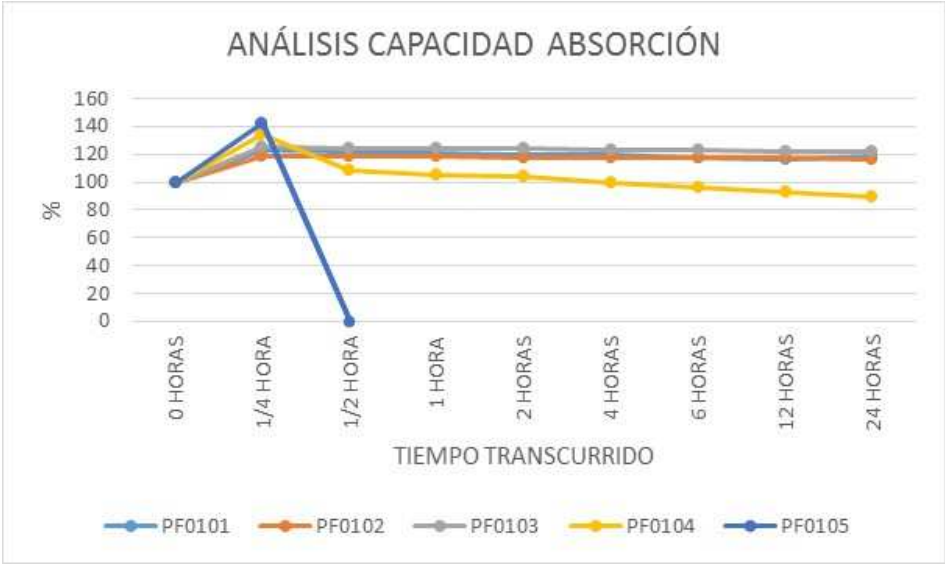


Fig. 5.3.2.6. Análisis de absorción con las probetas
PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105

En la prueba de absorción de las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105, vemos como la probeta PF0105 o resiste a la primera media hora si deshacerse, y el mejor resultado lo obtenemos con las probetas PF0103 y PF0102, al tener una más baja primera absorción y luego perder menos materia a lo largo de toda la prueba. El peor resultado lo obtendríamos con la probeta PF0104.

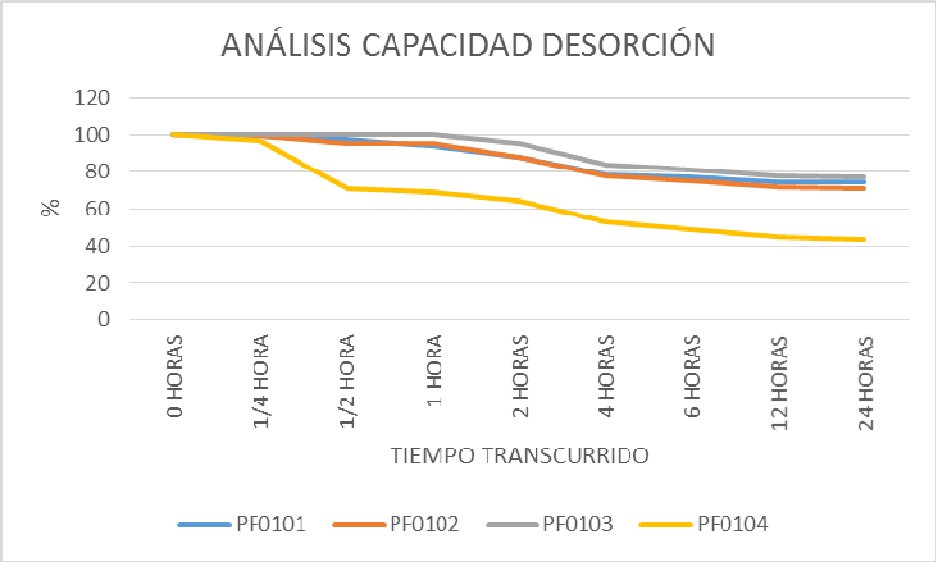


Fig. 5.3.2.7. Análisis de desorción con las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105

En la prueba de desorción de las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105, vemos como las probetas PF0101, PF0103 y PF0102 ofrecen los mejores resultados con un comportamiento muy similar. El peor resultado lo obtendríamos con la probeta PF0104.

- Método de envejecimiento acelerado, Ciclos de Mojado y Secado:

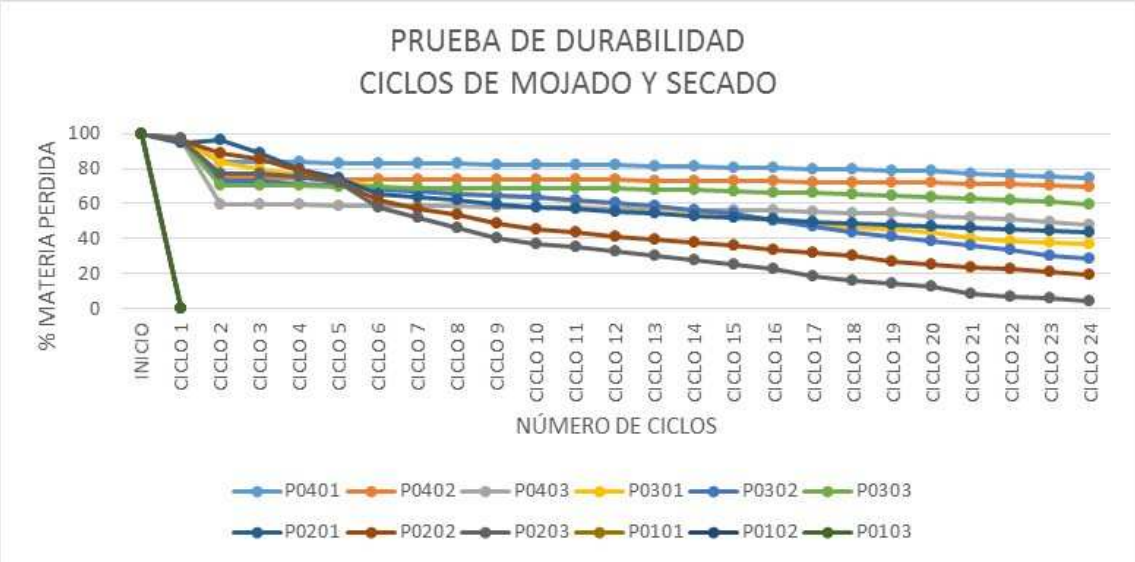


Fig. 5.3.2.8. Prueba de durabilidad con ciclos de mojado y secado con las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403.

La prueba de durabilidad por medio de ciclos de mojado y secado de las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 nos deja el resultado de que las probetas P0101, P0102, P0103, aquellas que no tienen ningún estabilizante, se disgregan en el primer ciclo y se observa como las probetas P0401, P0402 y P0303 son los que tienen mejor resultado, demostrando una mejor durabilidad, siendo la probeta P0203 y P0202 las que demuestran un peor comportamiento de durabilidad.

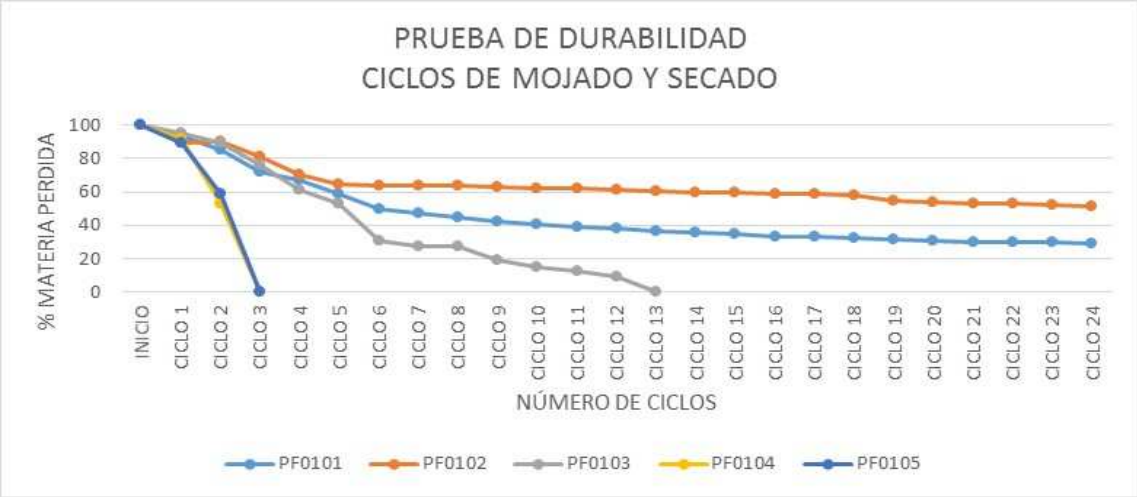


Fig. 5.3.2.9. Prueba de durabilidad con ciclos de mojado y secado con las probetas

PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105

La prueba de durabilidad por medio de ciclos de mojado y secado de las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105 nos deja el resultado de que la probeta PF0102 es la que obtiene un mejor resultado, seguido de la probeta PF0101, de hecho son las únicas probetas que resisten todos los ciclos de mojado y secado, siendo las probetas PF0105 y PF0102 los que demuestran un peor resultado.

- Método de envejecimiento acelerado, Ciclos de Mojado y Secado en ambiente sulfatado

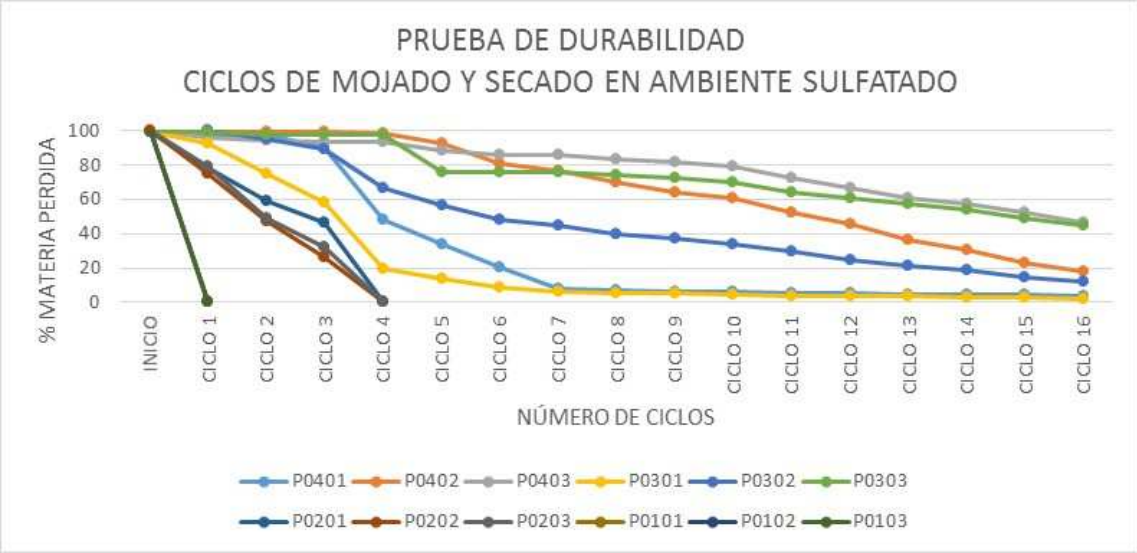


Fig. 5.3.2.10. Prueba de durabilidad con ciclos de mojado y secado en ambiente sulfatado con las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403.

La prueba de durabilidad por medio de ciclos de mojado y secado en ambiente sulfatado de las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 nos deja el resultado de que las probetas P0101, P0102, P0103, aquellas que no tienen ningún estabilizante, se disgregan en el primer ciclo y se observa como las probetas P0403 y P0303 son los que tienen mejor resultado, demostrando una mejor durabilidad, siendo la probeta P0203, P0202 y P0201 las que demuestran un peor comportamiento de durabilidad.

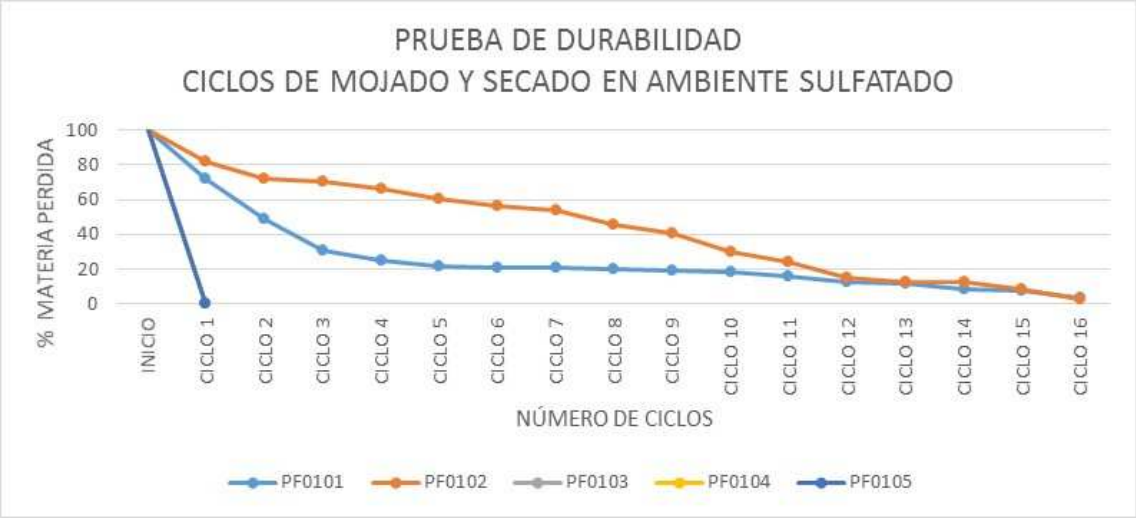


Fig. 5.3.2.11. Prueba de durabilidad con ciclos de mojado y secado en ambiente sulfatado con las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105.

La prueba de durabilidad por medio de ciclos de mojado y secado de las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105 nos deja el resultado de que la probetas PF0105, P0104 y PF0103 no aguantan los primeros ciclos de la prubea, obteniendo el mejor resultado con las probetas PF0101 y PF0102.



Fig. 5.3.2.4. Probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 en la prueba de durabilidad mojado-secado en su segundo ciclo.



Fig. 5.3.2.5. Probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401,

P0402 y P0403 en la prueba de durabilidad mojado-secado en su segundo ciclo.



Fig. 5.3.2.6. Probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 sumergidas en la prueba de durabilidad mojado-secado en su cuarto ciclo.



Fig. 5.3.2.7. Probetas PF0101, PF0102, PF0103 y PF0104, , en la prueba de durabilidad mojado-secado en ambiente sulfatado en su sexto ciclo.



Fig. 5.3.2.8. Probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 , en la prueba de durabilidad mojado-secado en su quinceavo ciclo.



Fig. 5.3.2.9. Probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 , en la prueba de durabilidad mojado-secado en ambiente sulfatado en su quinceavo ciclo.



Fig. 5.3.2.10. Probetas PF0101, PF0102, PF0103 y PF0104, , en la prueba de durabilidad mojado-secado en su quinceavo ciclo.



Fig. 5.3.2.11. Probetas PF0101, PF0102, PF0103 y PF0104,
, en la prueba de durabilidad mojado-secado en ambiente sulfatado en su quinceavo ciclo.



Fig. 5.3.2.12. Probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 sumergidas en la prueba de durabilidad mojado-secado en ambiente sulfatado en su decioctavo ciclo.



Fig. 5.3.2.13. Probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 sumergidas en la prueba de durabilidad mojado-secado en su decioctavo ciclo.



Fig. 5.3.2.14. Probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 en la prueba de durabilidad mojado-secado en su ventiavo ciclo.



Fig. 5.3.2.15. Probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 en la prueba de durabilidad mojado-secado en ambiente sulfatado en su ventiavo ciclo.



Fig. 5.3.2.16. Probetas P0401, P0402 y P0403 en la prueba de durabilidad mojado-secado en su último ciclo.



Fig. 5.3.2.17. Probetas P0301, P0302 y P0303 en la prueba de durabilidad mojado-secado en su último ciclo.



Fig. 5.3.2.18. Probetas P0201, P0202 y P0203 en la prueba de durabilidad mojado-secado en su último ciclo.

5.4 Definición y caracterización del panel

Tabla 5.4.1. Dosificaciones planteadas para la conformación de los paneles.

SIGLAS	DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA
PF01.01	CEMENTANTE:20% (L:50%+FA:50%) + SUELO:80%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
FP01.02	PC:1% + CEMENTANTE:19.5% (L:50%+FA:50%) + SUELO:79.5%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
PF01.03	PC:2% + CEMENTANTE:19% (L:50%+FA:50%) + SUELO:79%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
PF01.04	PC:4% + CEMENTANTE:18% (L:50%+FA:50%) + SUELO:78%(A:32%+AR:8%+SA:60%)
PF01.05	PC:8% + CEMENTANTE:16% (L:50%+FA:50%) + SUELO:76%(A:32%+AR:8%+SA:60%)

Los paneles PF0101 no son contabilizados en las pruebas que siguen pues no resisten el proceso de secado y fraguado sin disgregarse y agrietarse en el proceso de secado/retracción.



Fig. 5.4.1. Paneles PF0101 con fracturas y grietas por contracción/retracción



Fig. 5.4.2. Paneles PF0101 con fracturas y grietas por contracción/retracción



Fig. 5.4.3. Paneles PF0101 con fracturas y grietas por contracción/retracción

5.4.1 Desarrollo de la campaña experimental para la caracterización del panel

5.4.1.1 Caracterización mecánica

Medición, geometría y pesos

Los siguientes datos son los obtenidos de las mediciones de los paneles, tomando como dos valores de cada lado y obtener un promedio.



Fig. 5.4.1.1.1. Paneles de la serie final PF, en proceso de secado y curado.



Fig. 5.4.1.1.2. Paneles PF0102 en proceso de secado y curado



Fig. 5.4.1.1.3. Paneles PF0103



Fig. 5.4.1.1.4. Paneles PF0104 en proceso de secado y curado



Fig. 5.4.1.1.5. Paneles PF0105



Fig. 5.4.1.1.6. Paneles PF0105

Tabla 5.4.1.1.1. Dimensiones principales y peso promedio.

	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ALTO (cm)	PESO (Kg)
PF0102	59.64	6.16	29.52	13.55
PF0103	59.18	6.03	29.53	13.28
PF0104	59.09	6.01	29.03	10.85
PF0105	59.50	6.00	29.55	10.85

Tabla 5.4.1.1.2. Relaciones geométricas principales y densidad promedio.

PF0102 - PROMEDIO	
SUPERF. BASE (cm2)	367.33
VOLUMEN PROMEDIO (m3)	0.01
DENSIDAD (kg/m3)	1305

PF0103 - PROMEDIO	
SUPERF. BASE (cm2)	356.86
VOLUMEN PROMEDIO (m3)	0.01054
DENSIDAD (kg/m3)	1260
PF0104 - PROMEDIO	
SUPERF. BASE (cm2)	355.35
VOLUMEN PROMEDIO (m3)	0.01
DENSIDAD (kg/m3)	1051.58
PF0105 - PROMEDIO	
SUPERF. BASE (cm2)	356.72
VOLUMEN PROMEDIO (m3)	0.0105
DENSIDAD (kg/m3)	727.96

Ensayo a compresión (norma ASTM e72-02)



Fig. 5.4.1.1.7 Prueba de compresión con medición de deformación



Fig. 5.4.1.1.8. Prueba de compresión con medición de deformación

Resultados para el panel tipo PF0102

Tabla 5.4.1.1.3. Relación esfuerzo-deformación del panel PF0102

PF0102	ESFUERZO (Kg/cm2)	DEFORMACIÓN mm/mm
1	0.00	0.00000
2	0.14	0.01131
3	0.29	0.01483
4	0.43	0.01755
5	0.57	0.01916
6	0.71	0.02060
7	0.86	0.02268
8	1.00	0.02467
9	1.14	0.02598
10	1.29	0.02728
11	1.43	0.02936
12	1.57	0.03166
13	1.71	0.03346
14	1.86	0.03395
15	2.00	0.03453
16	2.14	0.03696
17	2.29	0.03838

18	2.43	0.03895
19	2.57	0.03935
20	2.60	0.04000
21	2.86	0.04500
22	3.00	0.05115
23	3.04	0.05291

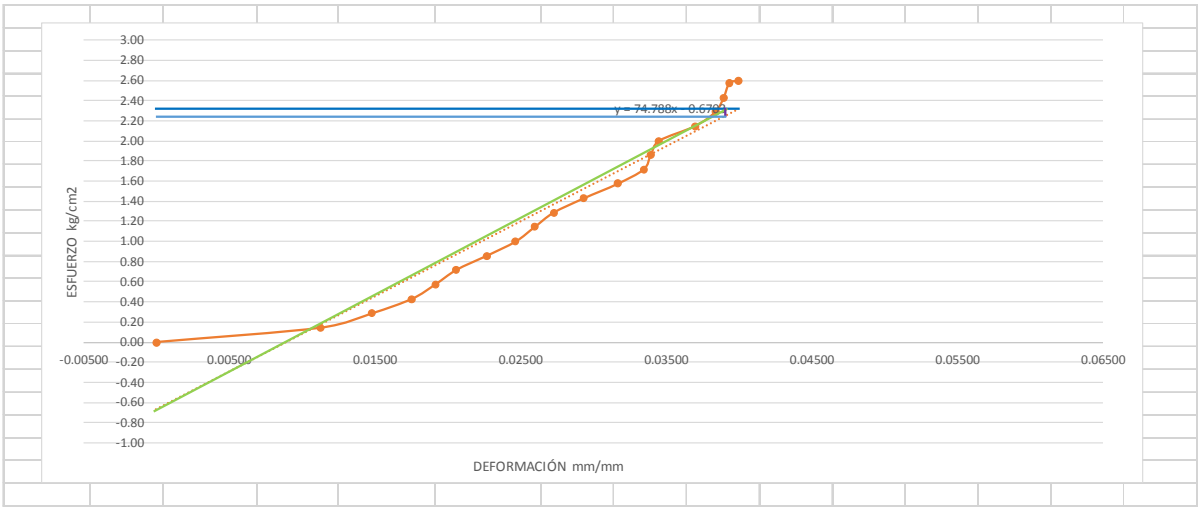


Fig. 5.4.1.1.9. Gráfica de relación esfuerzo deformación del panel tipo PF0102, esfuerzo último y esfuerzo de diseño

De acuerdo al método Corzo:

El esfuerzo último: **fm** = **2.326** kg/cm2

El esfuerzo de diseño: **f´m** = **2.245** kg/cm2.

El módulo de elasticidad: **E** = **7391.19** kg/cm^2



Fig. 5.4.1.1.10. Imagen de panel tipo PF0102 tras ser sometido a la prueba de compresión

Resultados para el panel tipo PF0103

Tabla 5.4.1.1.4. Relación esfuerzo-deformación del panel PF0103

PF0103	ESFUERZO (Kg/cm2)	DEFORMACIÓN mm/mm
1	0.00	0.00000
2	0.14	0.00326
3	0.29	0.00566
4	0.43	0.00750
5	0.57	0.00908
6	0.71	0.01052
7	0.86	0.01191
8	1.00	0.01325
9	1.14	0.01465
10	1.29	0.01598
11	1.43	0.01739
12	1.57	0.01886
13	1.71	0.02043
14	1.86	0.02218
15	2.00	0.02408
16	2.14	0.02647
17	2.29	0.02950
18	2.42	0.03344
19	2.52	0.03565
20	2.71	0.03617
21	2.86	0.03722
22	2.98	0.04392

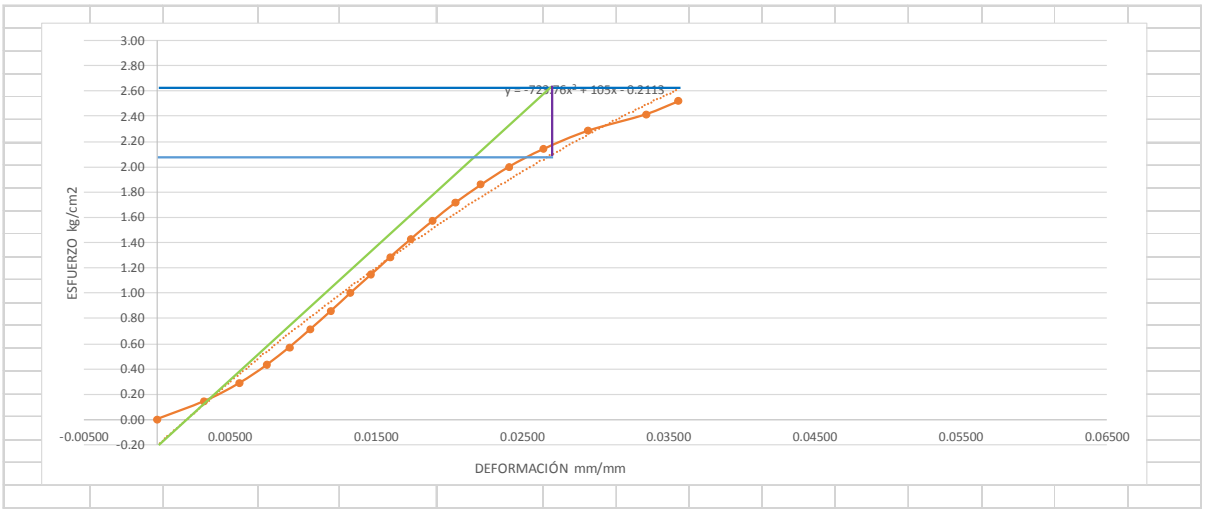


Fig. 5.4.1.1.11. Gráfica de relación esfuerzo deformación del panel tipo PF0103, esfuerzo último y esfuerzo de diseño

De acuerdo al método Corzo:

El esfuerzo último: **fm** = **2.61** kg/cm2

El esfuerzo de diseño: **f´m** = **2.045** kg/cm2.

El módulo de elasticidad: **E** = **8,965.21** kg/cm^2

En la siguiente fotografía se presentan las fisuras que se originaron debido a la presión ejercida en los paneles (Figura 5.4.1.3). Se puede observar como hubo despostillamiento y desmoronamiento en los especímenes, esto es evidencia del esfuerzo estructural al que está sometido el elemento. Este despostillamiento y desmoronamiento se hace más visible en la parte superior del elemento, esto debido al aplastamiento que sufre esta zona, además de que se puede considerar la zona como recubrimiento, debido a la falta de paja en esta altura del elemento. A través de los golpes, que reciben los moldes que contienen la mezcla para sacar el aire de la mezcla en la elaboración de los elementos, la paja tiende a asentarse dentro del molde.



Fig. 5.4.1.1.12. Imagen de las fisuras ocasionadas en la prueba de compresión de uno de los paneles PF0103



Fig. 5.4.1.1.13. Imagen de las fisuras ocasionadas en la prueba de compresión de uno de los paneles tipo PF0103



Fig. 5.4.1.1.14. Imagen de las fisuras ocasionadas en la prueba de compresión de uno de los paneles tipo PF0103

Resultados para el panel tipo PF0104

Tabla 5.4.1.1.5. Relación esfuerzo-deformación del panel PF0104

PF0104	ESFUERZO (Kg/cm2)	DEFORMACIÓN mm/mm
1	0.00	0.00000
2	0.14	0.00471
3	0.29	0.00906
4	0.43	0.01227
5	0.57	0.01510
6	0.71	0.01835
7	0.84	0.02292
8	0.80	0.01914
9	0.90	0.02449
10	0.49	0.01418

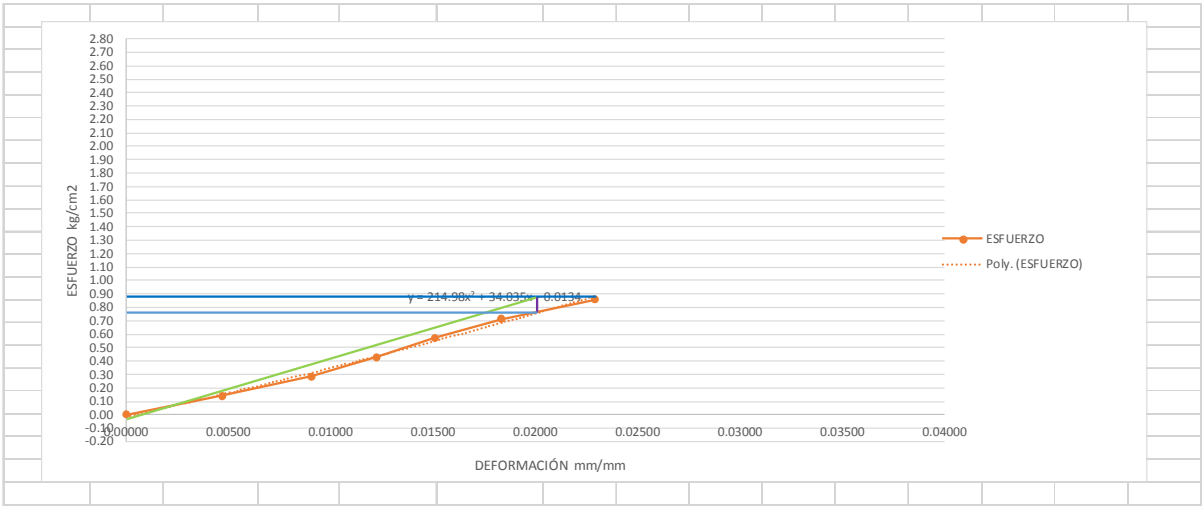


Fig. 5.4.1.1.15. Gráfica de relación esfuerzo deformación del panel PF0103, esfuerzo último y esfuerzo de diseño.

De acuerdo al método Corzo:

El esfuerzo último: **fm** = 0.853 kg/cm2

El esfuerzo de diseño: **f´m** = 0.825 kg/cm2.

El módulo de elasticidad: **E** = **4518.29** kg/cm^2

PF0105

Tabla 5.4.1.1.6. Relación esfuerzo-deformación del panel PF0105

PF0105	ESFUERZO (Kg/cm2)	DEFORMACIÓN mm/mm
1	0.00	0.00000
2	0.14	0.02503
3	0.29	0.02993
4	0.43	0.03948
5	0.57	0.04677
6	0.71	0.05437
7	0.86	0.06362
8	0.92	0.06779
9	1.12	0.04305

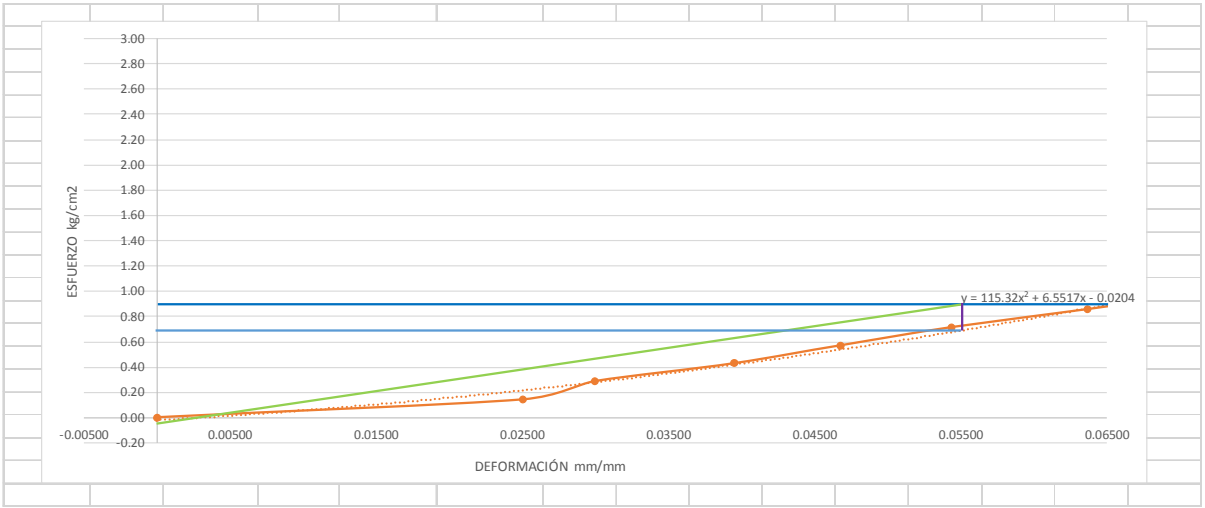


Fig. 5.4.1.1.16. Gráfica de relación esfuerzo deformación del panel PF0103, esfuerzo último y esfuerzo de diseño

De acuerdo al método Corzo:

El esfuerzo último: **fm** = 0. 905 kg/cm2

El esfuerzo de diseño: **f´m** = 683 kg/cm2.

El módulo de elasticidad: **E** = **2272.37** kg/cm^2

Comparativa de resultados:

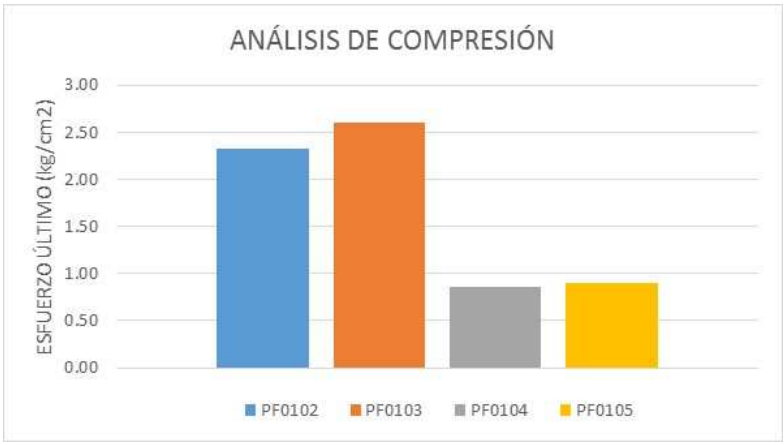


Fig. 5.4.1.1.17. Comparativa de resultados ante el esfuerzo último sobre los paneles PF0104, PF0103, PF0102 y PF0101.

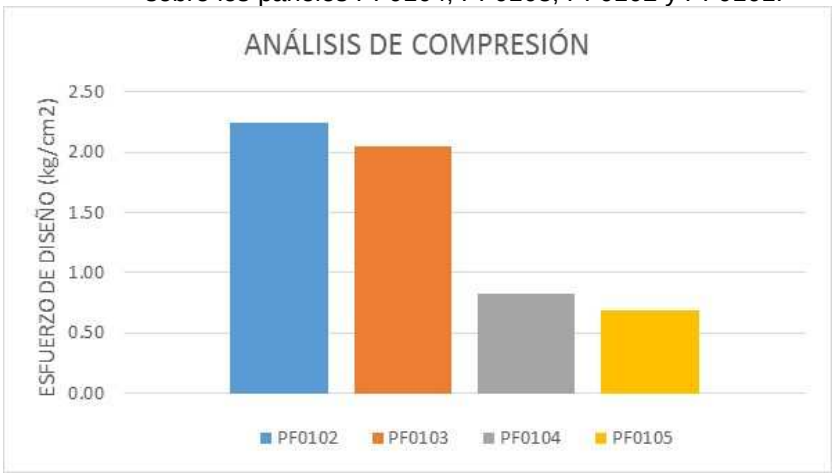


Fig. 5.4.1.1.18. Comparativa de resultados de esfuerzo de diseño sobre los paneles PF0104, PF0103, PF0102 y PF0101.

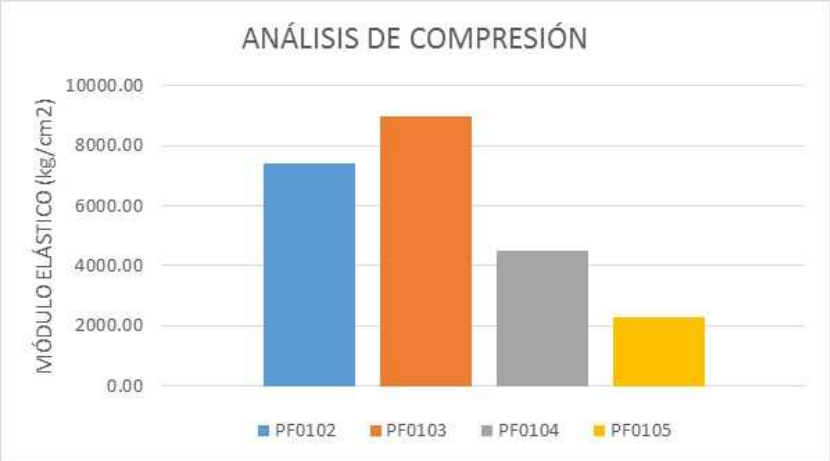


Fig. 5.4.1.1.19. Comparativa de resultados de módulo elástico de los paneles PF0104, PF0103, PF0102 y PF0101.

Tabla 5.4.1.1.7. Resistencia a compresión de otros materiales (Bestraten *et al.,* 2011)

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Kg/cm2)
CONCRETO EN MASA (2400 Kg/m3)	285.5 – 509.9 (HASTA 2039)
ADOBE	5.4 – 17.50
TAPIAL	15.3 – 81.5
BTC	10.2 – 102

En la prueba de compresión sobre los paneles con formato 30x60x6cm se ve como los paneles con menor proporción de refuerzo fibroso demuestran un mejor comportamiento en su resistencia y en su módulo elástico, teniendo el panel tipo PF0102 el mejor resultado en su valor de resistencia a compresión, teniendo en cuenta el esfuerzo límite de diseño, seguido del panel tipo PF0103 y el panel PF0103 el mejor resultado en el valor del módulo elástico.

Con respecto a otros valores de referencia de otros materiales en base a tierra o pétreo, se observa un valor muy bajo de la resistencia a compresión.

En las figuras 5.4.1.1.10, 5.4.1.1.11, 5.4.1.1.12 y 5.4.1.1.14. se observa como por efecto del esfuerzo a compresión se producen muchas fisuras en el panel, perpendiculares y paralelas al esfuerzo aplicado, de manera más intensa en las esquinas superiores donde las fisuras se tornan también diagonales. Este esquema de fisuras se repite en los diferentes tipos de paneles, siendo más evidente en los paneles tipo PF0102 y PF0103.

Ensayo a flexión vertical (norma ASTM c1185-03)



Fig. 5.4.1.1.20. Imagen de procedimiento de ensayo a flexión vertical

Tabla 5.4.1.1.8. Resistencia máxima a flexión vertical del panel tipo PF0102

PANEL	P (N)	L(mm)	B(mm)	D(mm)	R(Mpa)	R(Kg/cm2)
1	80.98	501.8	295.18	61.59	0.05	0.56
2	100.3	501.8	295.18	61.59	0.07	0.69
3	104.07	501.8	295.18	61.59	0.07	0.71
4	113.11	501.8	295.18	61.59	0.08	0.78
				PROMEDIO	0.04	0.46

Tabla 5.4.1.1.9. Resistencia máxima a flexión vertical del panel tipo PF0103

PANEL	P (N)	L(mm)	B(mm)	D(mm)	R(Mpa)	R(Kg/cm2)
1	93.86	501.8	295.3	60.3	0.07	0.67
2	216.06	501.8	295.3	60.3	0.15	1.54
3	142.36	501.8	295.3	60.3	0.10	1.02
4	109.46	501.8	295.3	60.3	0.08	0.78
5	138.17	501.8	295.3	60.3	0.10	0.99
6	50.25	501.8	295.3	60.3	0.04	0.36
				PROMEDIO	0.09	0.89

Tabla 5.4.1.1.10. Resistencia máxima a flexión vertical del panel tipo PF0104

PANEL	P (N)	L(mm)	B(mm)	D(mm)	R(Mpa)	R(Kg/cm2)
1	116.03	501.8	290.28	60.14	0.08	0.85
2	12	501.8	290.28	60.14	0.01	0.09
3	68.4	501.8	290.28	60.14	0.05	0.50
4	12	501.8	290.28	60.14	0.01	0.09
				PROMEDIO	0.02	0.25

Tabla 5.4.1.1.11. Resistencia máxima a flexión vertical del panel tipo PF0108

PANEL	P (N)	L(mm)	B(mm)	D(mm)	R(Mpa)	R(Kg/cm2)
1	80.98	501.8	295.55	59.95	0.06	0.59
2	100.30	501.8	290.28	60.14	0.07	0.73
3	104.07	501.8	290.28	60.14	0.07	0.76
4	113.11	501.8	290.28	60.14	0.08	0.83
				PROMEDIO	0.05	0.48

Tabla 5.4.1.1.12. Módulo elástico en prueba a flexión vertical del panel tipo PF0102

PANEL	P1 (kg)	P2(kg)	Y1(mm)	Y2(mm)	L(mm)	B(mm)	D(mm)	E(kg/mm2)	E(kg/cm2)
1	0.00	28.49	1.65	5.22	501.8	295.18	61.59	3.66	365.61
2	0.00	35.29	1.12	4.49	501.8	295.18	61.59	4.80	479.71
3	0.00	36.62	1.89	5.40	501.8	295.18	61.59	4.78	477.89
4	0.00	39.80	4.41	7.83	501.8	295.18	61.59	5.33	533.07
						MÓDULO ELÁSTICO E		3.09	31.55

Tabla 5.4.1.1.13. Módulo elástico en prueba a flexión vertical del panel tipo PF0103

PANEL	P1 (kg)	P2(kg)	Y1(mm)	Y2(mm)	L(mm)	B(mm)	D(mm)	E(kg/mm2)	E(kg/cm2)
1	0.00	33.03	0.00	0.69	501.8	295.3	60.3	23.35	2335.20
2	0.00	76.02	0.00	2.37	501.8	295.3	60.3	15.65	1565.02
3	0.00	50.09	1.96	3.91	501.8	295.3	60.3	12.53	1253.27
4	0.00	38.52	1.58	8.61	501.8	295.3	60.3	2.67	267.30
5	0.00	48.62	2.44	6.32	501.8	295.3	60.3	6.11	611.33
6	0.00	17.68	0.22	1.03	501.8	295.3	60.3	10.65	1064.99
								11.83	120.61

Tabla 5.4.1.1.14. Módulo elástico en prueba a flexión vertical del panel PF0104

PANEL	P1 (kg)	P2(kg)	Y1(mm)	Y2(mm)	L(mm)	B(mm)	D(mm)	E(kg/mm2)	E(kg/cm2)
1	0.00	40.83	0.00	2.11	501.8	290.28	60.14	9.68	968.09
2	0.00	4.22	0.00	0.64	501.8	290.28	60.14	3.30	330.09
3	0.00	24.07	0.00	7.46	501.8	290.28	60.14	1.61	161.42
4	0.00	4.22	1.30	8.61	501.8	290.28	60.14	0.29	28.90
						MÓDULO ELÁSTICO E		2.48	25.30

Tabla 5.4.1.1.15. Módulo elástico en prueba a flexión vertical del panel PF0105

PANEL	P1 (kg)	P2(kg)	Y1(mm)	Y2(mm)	L(mm)	B(mm)	D(mm)	E(kg/mm2)	E(kg/cm2)
1	0.00	28.49	1.56	5.22	501.8	295.55	59.95	3.86	386.11
2	0.00	35.29	1.12	4.49	501.8	290.28	60.14	5.24	523.96
3	0.00	36.62	1.89	5.40	501.8	290.28	60.14	5.22	521.97
4	0.00	39.80	1.41	2.52	501.8	290.28	60.14	17.94	1793.93
						MÓDULO ELÁSTICO E		5.38	54.82

Comparativa de resultados:

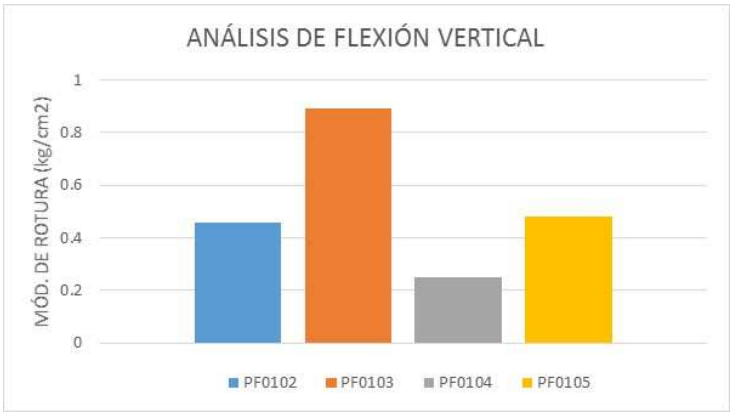


Fig. 5.4.1.1.21. Comparativa de resultados de resistencia a flexión vertical de los paneles PF0104, PF0103, PF0102 y PF0101.

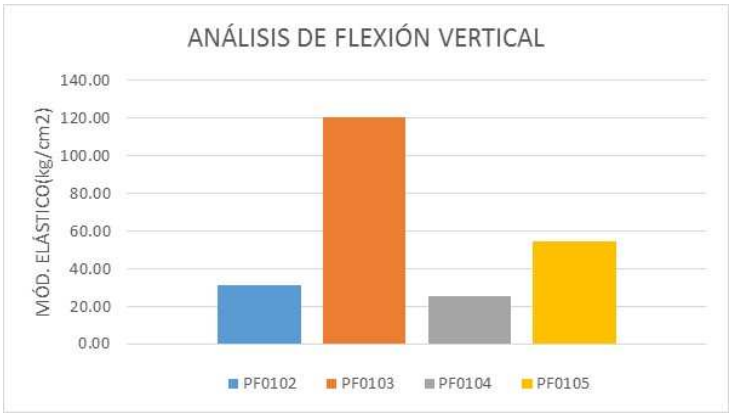


Fig. 5.4.1.1.22. Comparativa de resultados de resistencia a flexión vertical de los paneles PF0104, PF0103, PF0102 y PF0101.

Tabla 5.4.1.1.16. Valores de referencia de otros materiales

MATERIAL	MÓDULO ELÁSTICO E (kg/mm^2)	RESISTENCIA A FLEXIÓN (Mpa)
PANEL DE YESO (800 Kg/m3)	14.28 (2)	2.22 (2)
OSB (550 Kg/m3)	122.44 (3)	7 (3)
CONCRETO (2400 Kg/m3)	2448.97 (9)	1092 (9)
PANEL DE PAJA COMPRIMIDA (380 Kg/m3)	9.20 (6)	1.46 (6)

A continuación se muestra la grieta presentada comúnmente en el ensayo a flexión. La pequeña grieta horizontal, resaltada con color azul, está ubicada exactamente detrás del rodillo de carga colocado a L/3. Este es el punto donde el panel soporta la carga aplicada por la máquina. La constante aplicación de la carga causa el

agrandamiento de las grietas y su desplazamiento hacia los costados del panel. Consecuentemente el compeusto empieza a fallar (Figura 5.4.1.1.23).



Fig. 5.4.1.1.22. Imagen de las fisuras ocasionadas en la prueba de flexión vertical de uno de los paneles PF0103



Fig. 5.4.1.1.23. Imagen de las fisuras ocasionadas en la prueba de flexión vertical de uno de los paneles PF0102



Fig. 5.4.1.1.24. Imagen de las fisuras ocasionadas en la prueba de flexión vertical de uno de los paneles PF0102



Fig. 5.4.1.1.25. Imagen de las fisuras ocasionadas en la prueba de flexión vertical de uno de los paneles PF0104

El esquema de rotura o formato de grieta se repite en la mayoría de los casos destacado en alguno de los puntos de las barras sobre la que se aplica la carga sobre el panel. En algún caso, figura 5.4.1.1.24., con un panel de tipo PF0102, se puede observar una grieta en una posición central del propio panel.

En la prueba de caracterización a flexión vertical se consigue el mejor resultado con el panel tipo PF0103, con un valor de 0.09 Mpa (0.9 Kg/cm2), muy por debajo del

valor de resistencia a flexión vertical de otros materiales comerciales con un uso parecido.

El peor resultado se obtiene con el panel tipo PF0104.

Con respecto al módulo elástico el mayor valor lo tenemos nuevamente con el panel tipo PF0103 con un valor de 11.8 Kg/mm2 (118 Kg/cm2), en este caso con valores superiores al panel de paja comprimida comercializado por la marca Stramit o similar al valor que presenta el panel de yeso, productos comerciales con los que podría competir.

Ensayo a carga de impacto (norma ASTM e695-03)

Resultado en paneles tipo PF0102

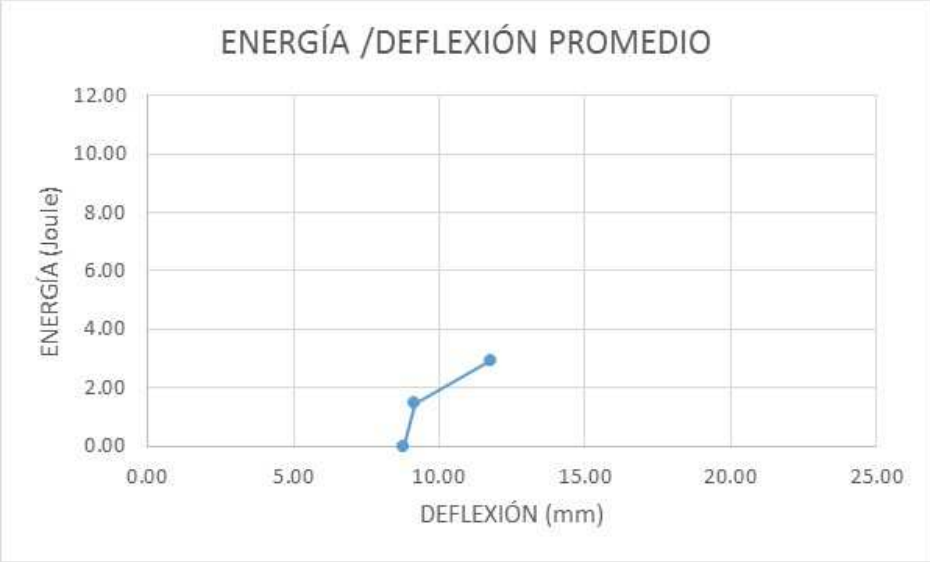


Fig. 5.4.1.1.26. Gráfica de la relación de la deflexión ocasionada por impacto y la energía de impacto recibida en un panel de tipo PF0102

Resultado en paneles tipo PF0103

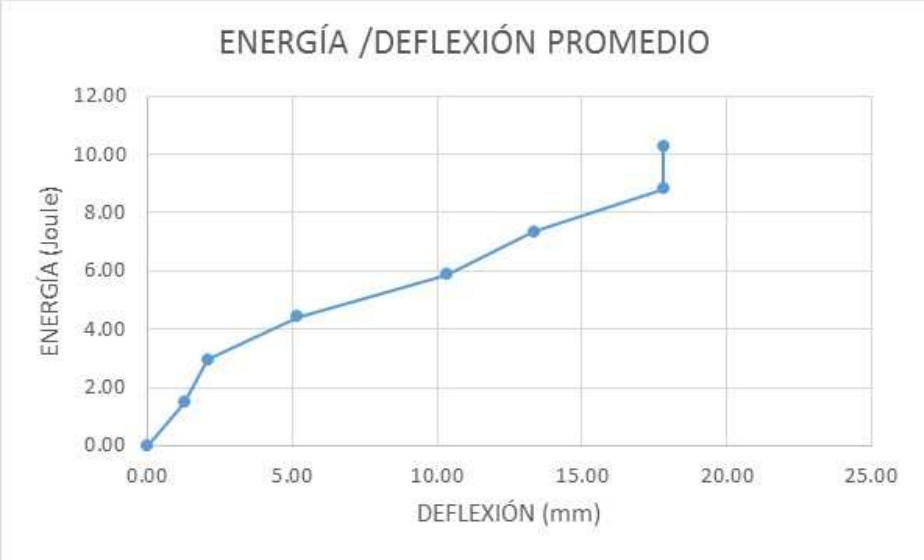


Fig. 5.4.1.1.27. Gráfica de la relación de la deflexión ocasionada por impacto y la energía de impacto recibida en un panel de tipo PF0103

De la gráfica anterior se puede observar, que el panel prefabricado tiene muy poca capacidad de absorber y disipar la energía. En la siguiente fotografía se puede corroborar este argumento, ya que en todos los especímenes al probarse el ensayo a impacto, hubo fractura con un peso muy pequeño).



Fig. 5.4.1.1.28. Imagen de rotura de panel tras recepción de impacto un panel de tipo PF0103

Resultado en paneles tipo PF0104

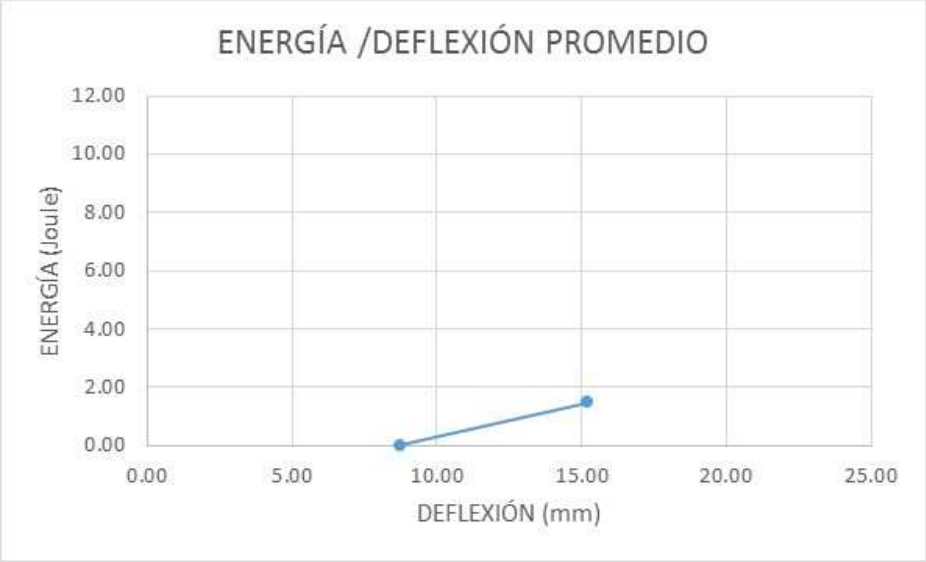


Fig. 5.4.1.1.28. Gráfica de la relación de la deflexión ocasionada por impacto y la energía de impacto recibida en un panel de tipo PF0104

Resultado en paneles tipo PF0104

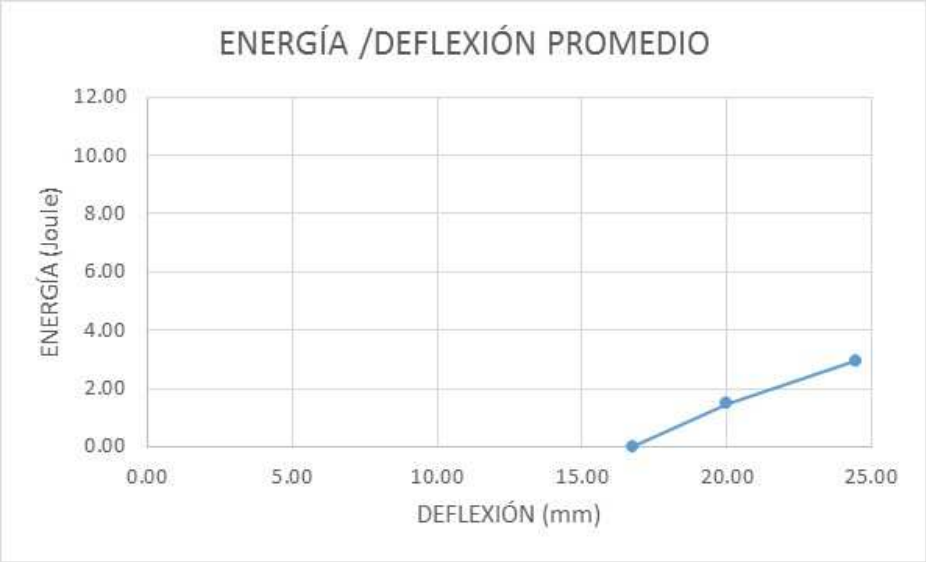


Fig. 5.4.1.1.29. Gráfica de la relación de la deflexión ocasionada por impacto y la energía de impacto recibida en un panel de tipo PF0105

Comparativa de resultados de la prueba de resistencia a impacto

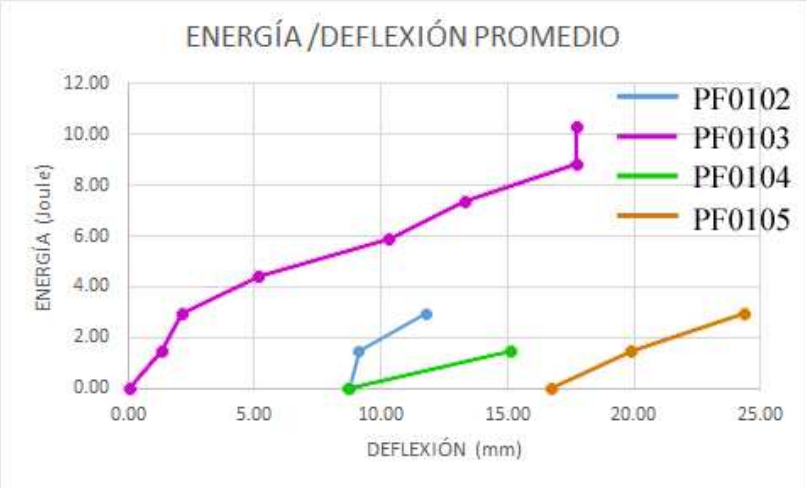


Fig. 5.4.1.1.30. Gráfica de la relación de la deflexión ocasionada por impacto y la energía de impacto recibida en un panel de tipo PF0105

En la prueba de resistencia a impacto se siguen denotando resultados muy por debajo de las expectativas creadas, donde el panel en sus diferentes versiones demuestra una baja capacidad de resistencia en este aspecto.

Con el panel tipo PF0103, nuevamente es con el tipo de panel que se adquiere el mejor resultado, destacando con diferencia con respecto a los demás, siendo el panel PF0102 el que obtiene el peor resultado.

Discusión de los resultados y conclusiones sobre la campaña experimental para la caracterización del panel

El análisis y la interpretación de los resultados que se recolectaron al ensayar los paneles prefabricados, indican que este nuevo sistema de construcción reúne condiciones de factibilidad y funcionalidad por lo que debe ser tomado en consideración solamente para muros divisorios y fachadas siempre sin carácter portante, en vista de las propiedades mecánicas que se obtuvieron con los ensayos de la ASTM, se propone que los paneles no sean utilizados de ninguna manera en forma estructural.

Algo muy significativo fue el comportamiento de la paja dentro del compuesto, ya que le da esfuerzos extras de unión al panel, cuando la mezcla fallaba por compresión el bloque seguía absorbiendo carga, menor a la máxima pero igual de importante puesto que nos da una idea de cómo la paja actúa dentro del compósito; vemos al final el trabajo que aporta la fibra a un material compuesto.

Los factores que más afectan las características finales del producto son: concentración de los agregados, tamaño y proporción de la paja y un proceso de mezclado que permita asegurar la impregnación de toda la paja, ya que la paja le da refuerzo al panel.

Se observa como baja la resistencia a compresión a medida que aumenta el contenido de paja como refuerzo fibroso, lo que denota la importancia del contenido de la paja para evitar los problemas de retracción pero la influencia negativa que puede tener esta con respecto a la resistencia a compresión.

Teniendo en cuenta la caracterización mecánica de los paneles en sus diferentes versiones a partir de las diferentes dosificaciones y contenidos de paja, el panel del tipo PF0103, con un añadido de un 2% de paja sobre el peso total, es el que se puede considerar que tiene mejor comportamiento en las diferentes pruebas realizadas.

5.4.1.2 Caracterización térmica

Determinación de la Conductividad Térmica



Fig. 5.4.1.2.1. Valores de conductividad de paneles
del tipo de la fase previa a la final, P0401, P0301, P0201 y P0101



Fig. 5.4.1.2.2. Valores de conductividad de paneles
del tipo PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105,



Fig. 5.4.1.2.3. Valores de conductividad de paneles
del tipo de la fase previa a la final y comparativa con los de la fase final

Tabla 5.4.1.2.1. Valores de referencia de otros materiales

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD λ (W/m℃)
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) (15 Kg/m3)	0.035 – 0.040 (6)
PANEL DE YESO (800 Kg/m3)	0.160 – 0.650 (5)
OSB (550 Kg/m3)	0.130 (4)
CONCRETO (2400 Kg/m3)	0.59 (8)
PANEL DE PAJA COMPRIMIDA (380 Kg/m3)	0.102 (6)
ADOBE (1200 Kg/m3)	0.81 (10)
TAPIAL (1600 Kg/m3)	0.6 – 1.6 (10)
BTC (1700 Kg/m3)	0.46 (10)
PARED DE LADRILLO MACIZO (2170 Kg/m3)	1.04 (10)

PARED BLOQUE DE CONCRETO COMÚN (860 Kg/m3)	0.91 (10)

Primero se pueden comparar los valores de los paneles de la fase previa a la final sin ningún contenido de refuerzo fibroso con el panel PF0101, panel del tipo de la caracterización de la fase final sin contenido de paja añadido. En esta comparativa podermos observar como es el compuesto sin añadido de estabilizante el que sufre un peor resultado, siendo el panel P0401 el segundo con peor resultado y el panel PF0201 el que obtenta un mejor resultado, aquel en el cual el estabilizante está caracterizado por estar compuesto exclusivamente por cal.

En los paneles PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105 de la fase final se obtiene un resultado lógico donde a medida que aumenta el contenido de paja como refuerzo fibroso, este mismo aporta aislamiento térmico y la conductividad térmica baja.

El panel PF0105 por lo tanto obtiene el mejor resultado con un valor por debajo de 0.100 W/m℃, por lo que se le puede considerar q ue tiene carácter de material aislante, presentando el peor resultado el panel PF0101, que no tiene una característica de aislamiento destacada.

Determinación del calor específico

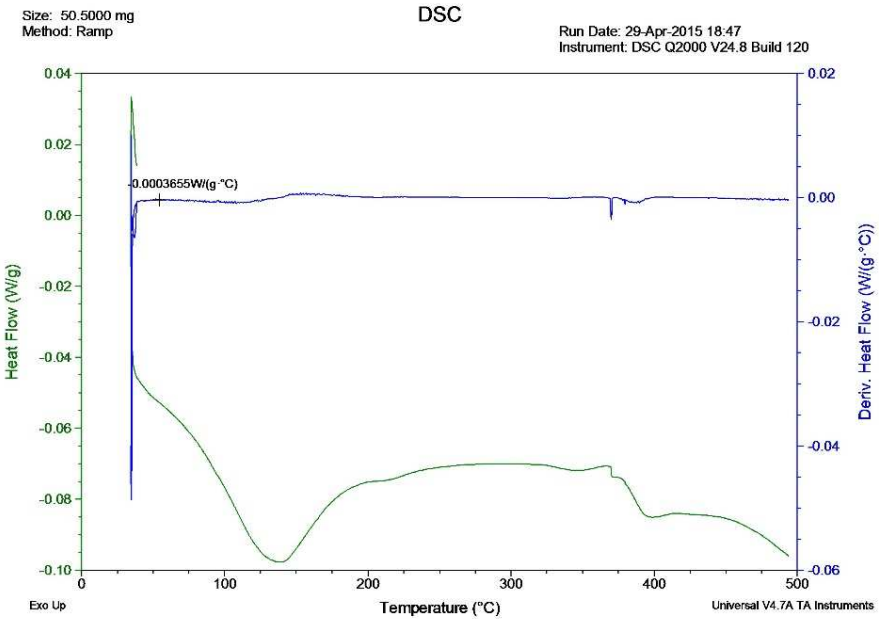


Fig. 5.4.1.2.4. Curva DSC y su derivada del panel del tipo PF0101

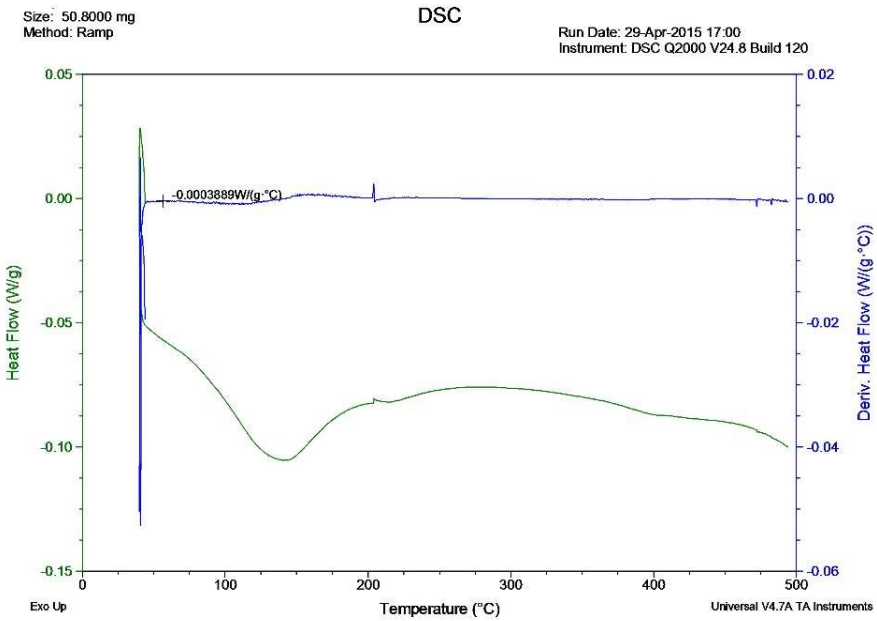


Fig. 5.4.1.2.5. Curva DSC y su derivada del panel del tipo PF0102

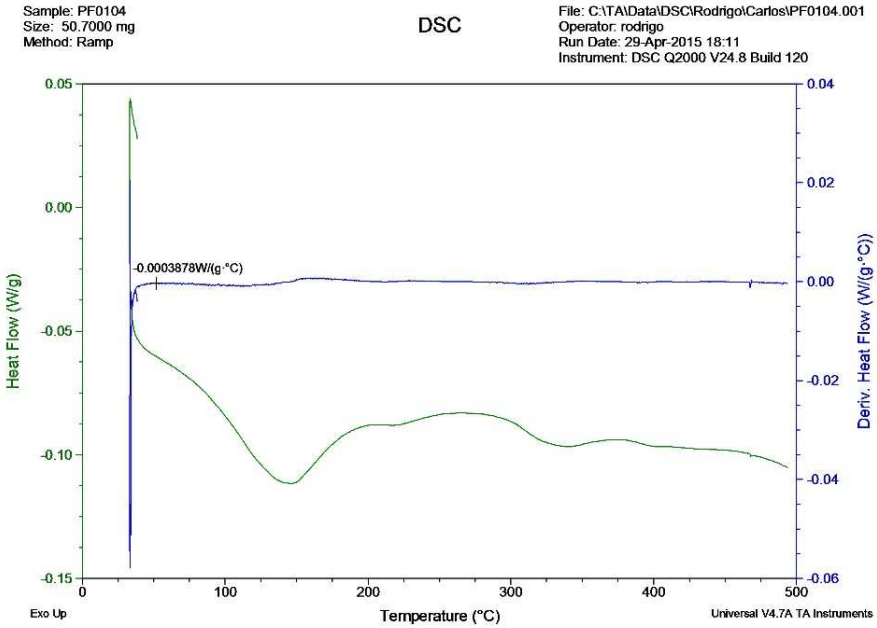


Fig. 5.4.1.2.6. Curva DSC y su derivada del panel del tipo PF0103

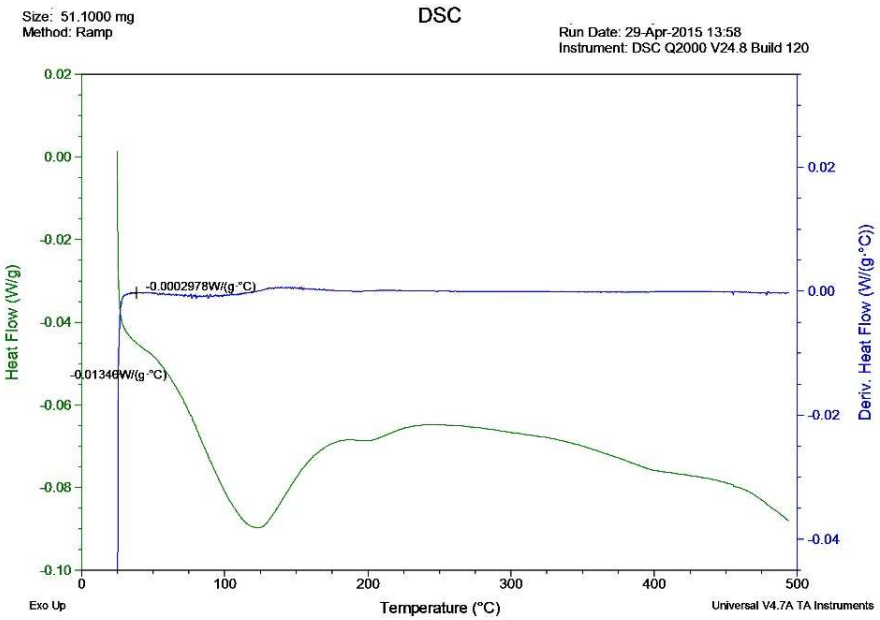


Fig. 5.4.1.2.7. Curva DSC y su derivada del panel del tipo PF0104

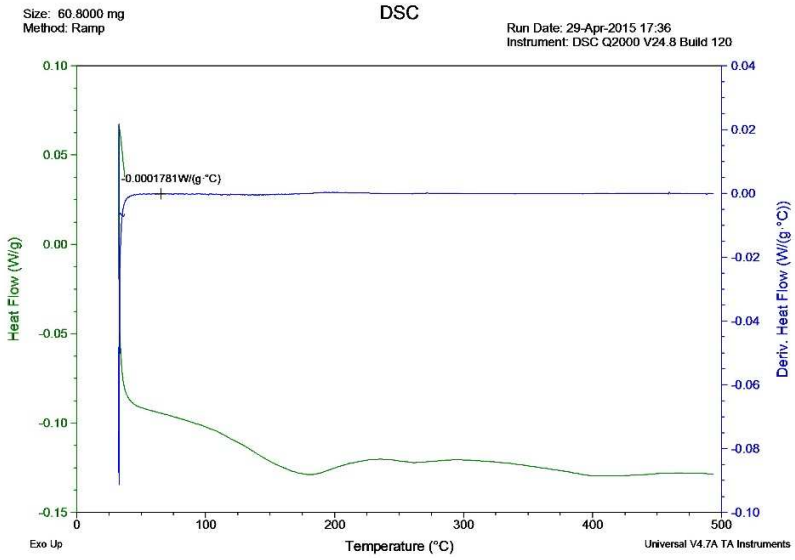


Fig. 5.4.1.2.8. Curva DSC y su derivada del panel del tipo PF0104

De la curva de la derivada se obtiene el valor de la derivada coincidente con el pico correspondiente al tramo de pendiente constante previo al cambio brusco que se da en cada una de las gráficas anteriores. Este valor se introduce en la fórmula con la que obtenemos el calor específico de cada uno de los compuestos de cada uno de los paneles caracterizados.



Fig. 5.4.1.2.9. Gráfica con la comparativa de los valores de Calor Específico de los materiales correspondientes a los paneles PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105,

El valor del calor específico es básico como característica de un material que puede ofrecer un alto rendimiento en base a su inercia térmica. En este caso es el panel PF0101 donde encontramos un valor más alto, lo que conllevará la posibilidad de tener un material con mayor inercia térmica y el panel del tipo PF0105 es el que demuestra tener un valor más desfavorable en este sentido.

Termografía

Como caracterización complementaria se obtienen los resultados de las termografías estudiadas en los diferentes tipos de paneles con resultados muy comparables a los que resultados que se obtuvieron en la caracterización del Calor Específico de los materiales de los paneles, guiándonos los resultados sobre la posible inercia térmica que puedan tener los paneles respecto a los cambios de temperatura y condiciones climáticas del ambiente.



Fig. 5.4.1.2.10. Imagen de la cámara termográfica utilizada para el estudio.



Fig. 5.4.1.2.11. Paneles predispuestos sobre firme de concreto para la prueba de termografía.



Fig. 5.4.1.2.12. Paneles predispuestos sobre firme de concreto para la prueba de termografía.

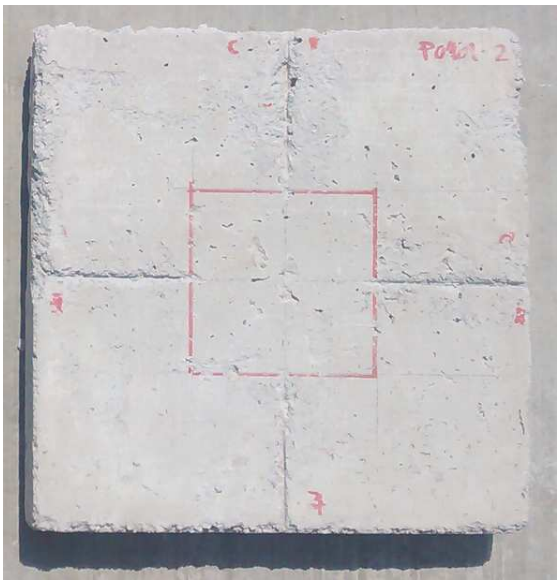


Fig. 5.4.1.2.13. Paneles predispuestos sobre firme de concreto para la prueba de termografía.

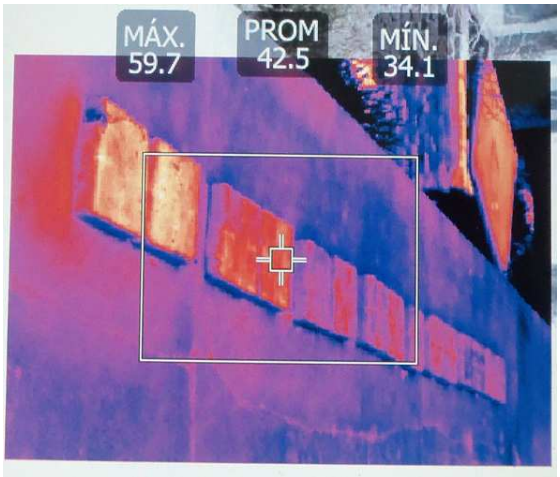


Fig. 5.4.1.2.14. Imgaen termográfica sobre el conjunto de los paneles.

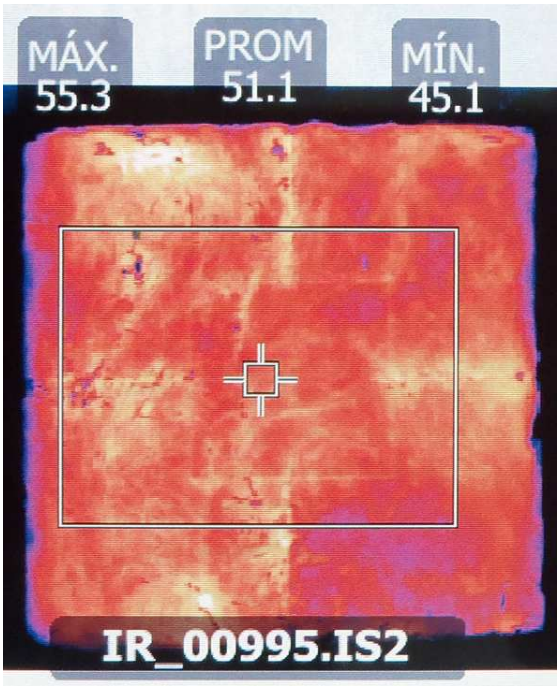


Fig. 5.4.1.2.15. Imagen termográfica sobre el conjunto de los paneles tomada el día 21/03/2015



Fig. 5.4.1.2.16. Imagen termográfica de los diferentes tipos de paneles tomada a las 05:00am del día 21/03/2015



Fig. 5.4.1.2.17. Imagen termográfica de los diferentes tipos de paneles tomada a las 12:00pm del día 21/03/2015



Fig. 5.4.1.2.18. Imagen termográfica de los diferentes tipos de paneles Tomada a las 06:00pm del día 21/03/2015



Fig. 5.4.1.2.19. Imagen termográfica de los diferentes tipos de paneles tomada a las 06:00pm del día 21/03/2015

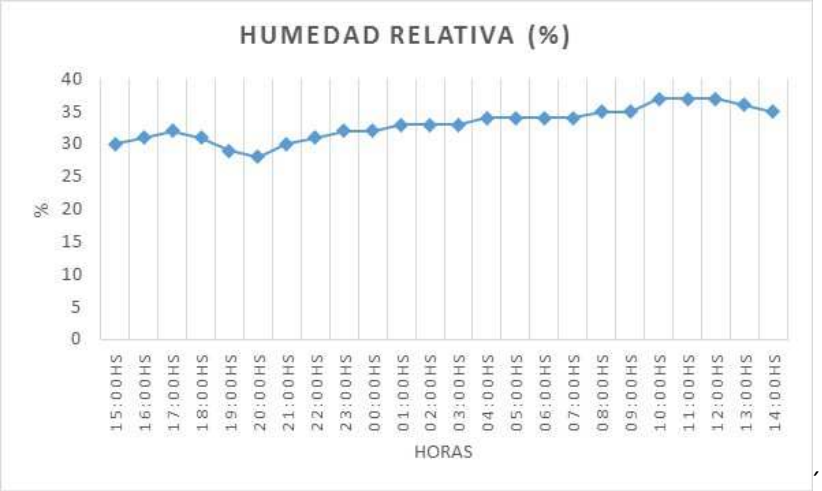


Fig. 5.4.1.2.20. Resumen de las condiciones de Humedad relativa el día de las tomas de las imágenes termográficas, el 21/03/2015



Fig. 5.4.1.2.21. Resumen de las condiciones de Radiación sobre el plano horizontal el día de las tomas de las imágenes termográficas, el 21/03/2015

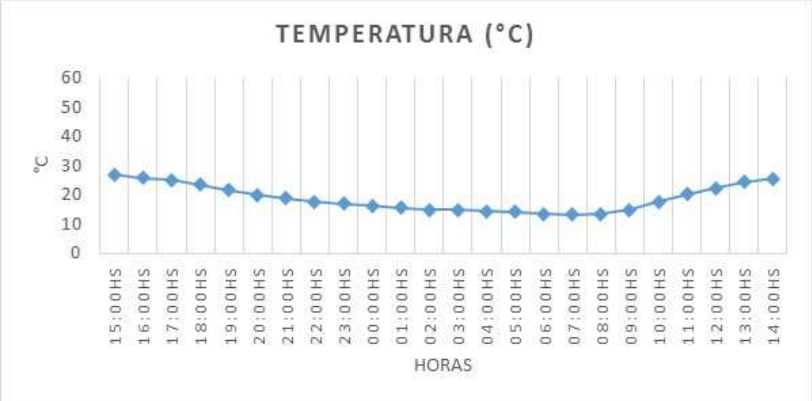


Fig. 5.4.1.2.22. Resumen de las condiciones de temperatura el día de las tomas de las imágenes termográficas, el 21/03/2015

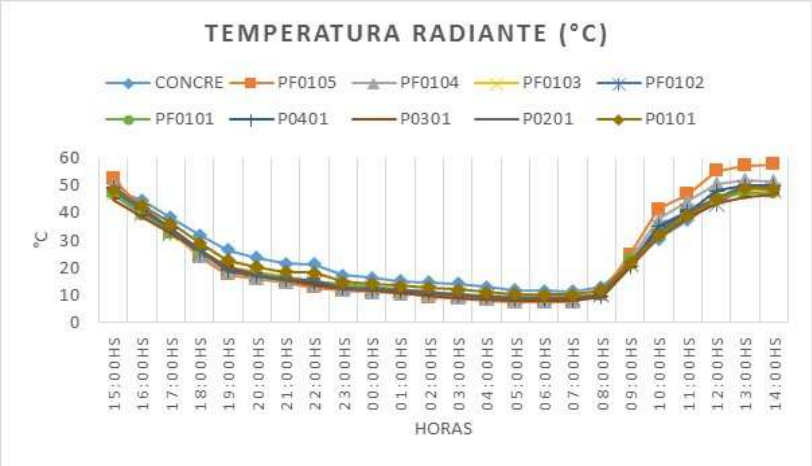


Fig. 5.4.1.2.23. Temperatura radiante promedio de los diferentes tipos de paneles por horas del día 21/03/2015

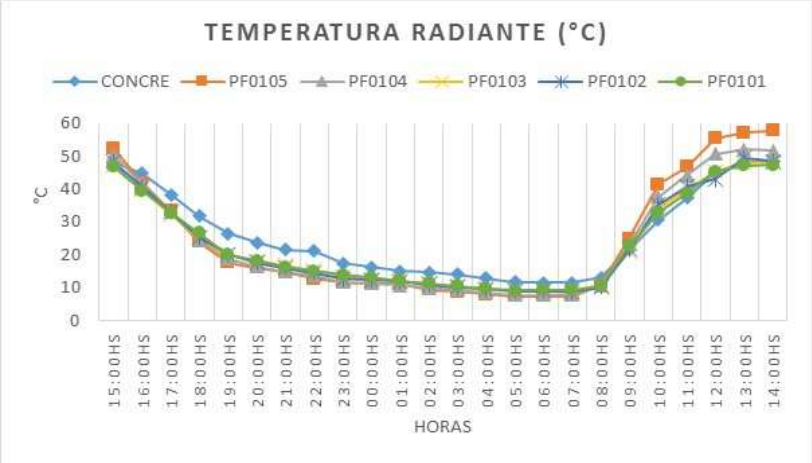


Fig. 5.4.1.2.24. Temperatura radiante promedio de los diferentes tipos de paneles por horas del día 21/03/2015

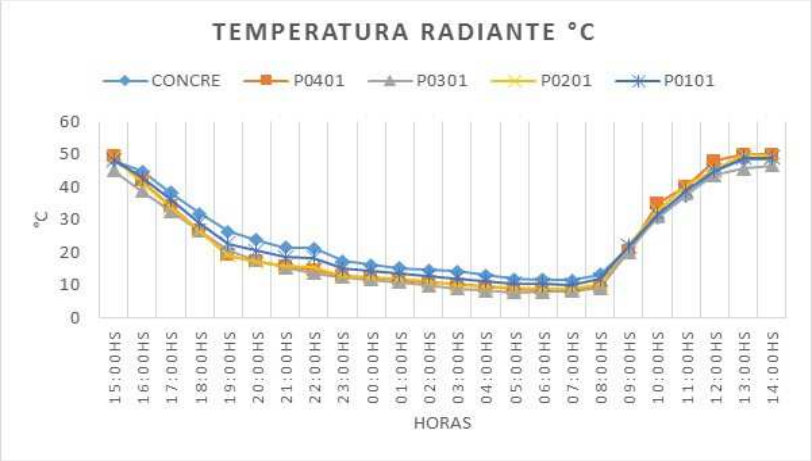


Fig. 5.4.1.2.24. Temperatura radiante promedio de los diferentes tipos de paneles por horas del día 21/03/2015

En los resultados obtenidos se observa como existe una relación directa entre la variación de la radiación sobre el plano horizontal, lo que más influye de manera característica, y la variación de la temperatura con la variación de la temperatura radiante de los diferentes tipos de paneles.

Un panel con una mayor inercia será influenciado de una manera menos extrema que aquel panel que tiene menos inercia térmica. En este caso, estudiando los paneles previos a los usados en la fase final, tenemos un mejor resultado en el caso del panel del tipo P0101, con mejor resultado que su equivalente, sin refuerzo fibroso, de los de la fase final PF, dónde tenemos el mejor resultado con el panel PF0101.

Siempre obtenemos la comparativa con el valor del suelo de concreto que siempre tendrá mayor inercia térmica que el resto de los paneles por estar en contacto con el suelo.

5.4.1.3 Caracterización acústica

Determinación de las propiedades de aislamiento acústico.

Tabla 5.4.1.3.1. Valores de aislamiento acústico de referencia

MATERIAL	AISLAMIENTO ACÚSTICO (dB)
PANEL DE YESO (800 Kg/m3)	28.8
OSB (550 Kg/m3)	21.5
CONCRETO (2400 Kg/m3)	54.3
PANEL DE PAJA COMPRIMIDA (380 Kg/m3)	27.00 (6)
ADOBE (1200 Kg/m3)	53.04 (10)
TAPIAL (1600 Kg/m3)	57.85 (10)
BTC (1700 Kg/m3)	56.32 (10)
PARED DE LADRILLO MACIZO (2170 Kg/m3)	46.10 (10)
PARED BLOQUE DE CONCRETO COMÚN (860 Kg/m3)	58.61 (10)
VALOR MÍNIMO DE AISLAMIENTO GLOBAL EN FACHADA VIV.	30 (11)

Resultados obtenidos en los diferentes tipos de paneles según el método analítico utilizado:

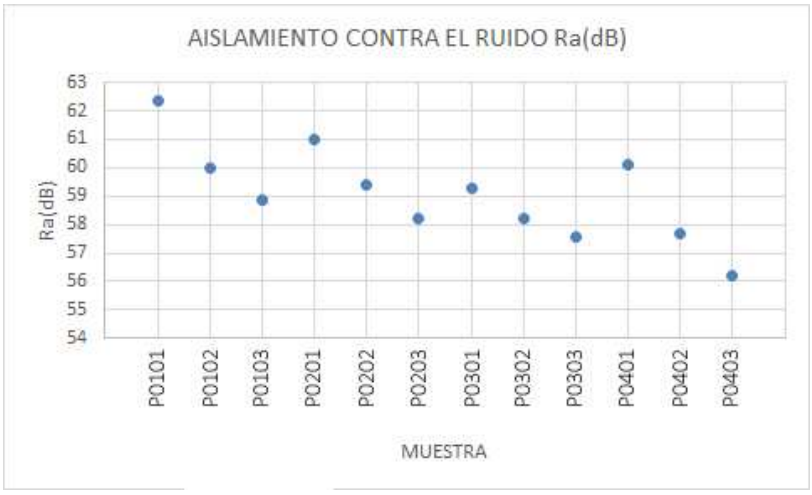


Fig. 5.4.1.3.1. Aislamiento acústico de los paneles de la fase previa a la final Ra en dB

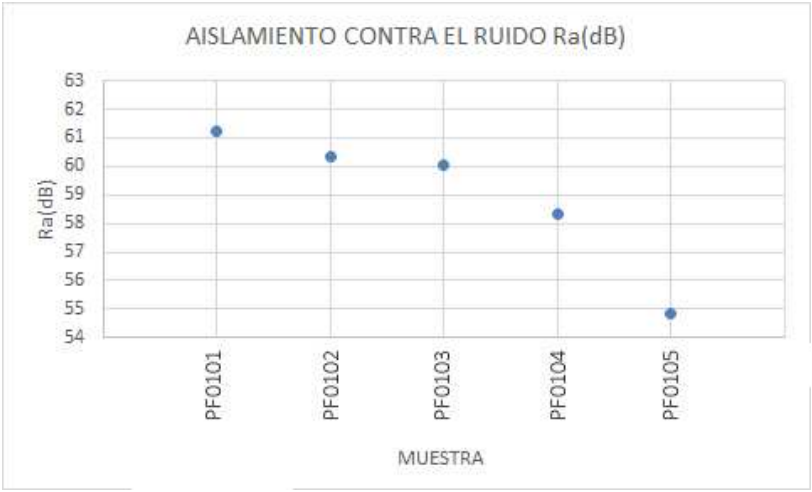


Fig. 5.4.1.3.2. Aislamiento acústico de los paneles del tipo PF, Ra en dB

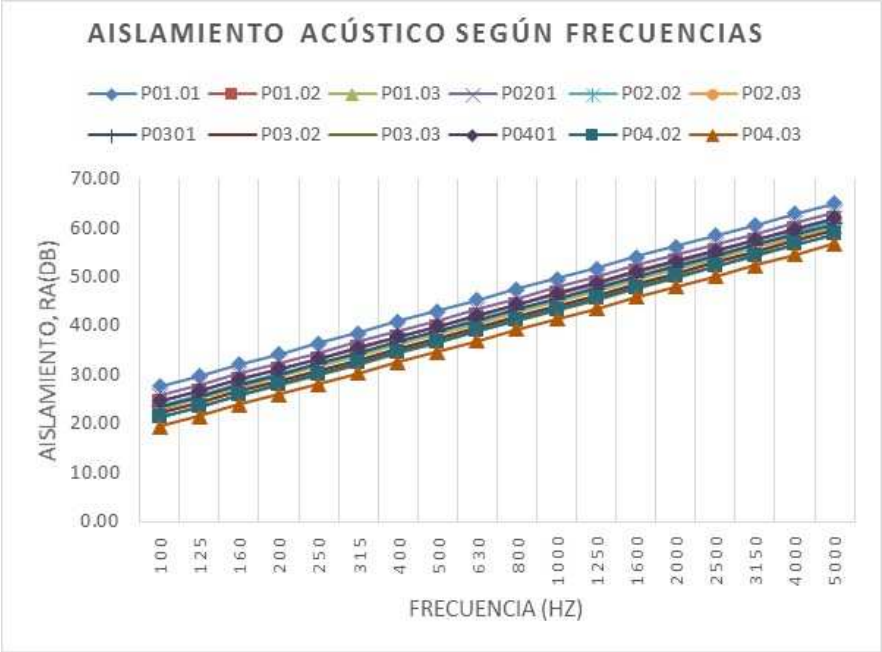


Fig. 5.4.1.3.3. Aislamiento acústico de los paneles
de la fase previa a la final Ra en dB según una frecuencia dada aplicada

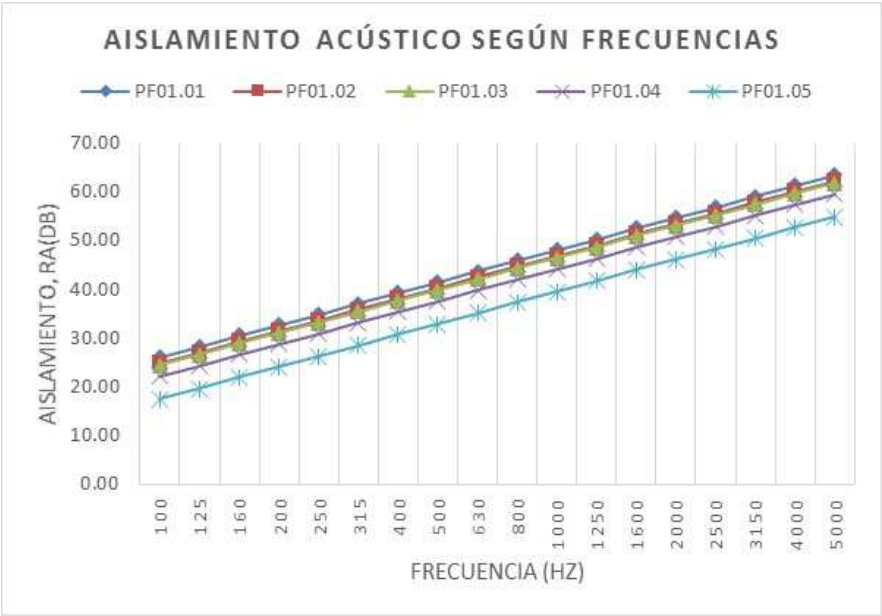


Fig. 5.4.1.3.4. Aislamiento acústico de los paneles del tipo PF,
Ra en dB según una frecuencia dada aplicada

Como es conocido, el aislamiento acústico de un material es función directa de su masa, de su densidad. Por esto, son aquellos tipos de paneles con una mayor densidad los que obtienen un mayor valor en términos de aislamiento acústico. De los

paneles PF nos quedamos con que un valor término medio aceptable es el del panel del tipo PF0103.

6 CONCLUSIONES FINALES

Conclusiones finales

- Acceso y calidad de la vivienda

La vivienda es un derecho básico. La vivienda, como acción edificatoria, debe estar ligada a la utilidad social de satisfacer las necesidades de cobijo, la habitabilidad, ligada a la idea de vivienda digna y adecuada. Se deben cumplir las exigencias básicas en cuanto al confort termo-acústico, la salubridad y el ahorro de energía, lo que está ligado íntimamente a la envolvente. En general, la edificación residencial es poco permeable a los avances técnicos, con cierto anacronismo dentro del modelo actual donde la innovación es una necesidad permanente. La vivienda y su precariedad es actualmente uno de los problemas más graves de las ciudades latinoamericanas

La calidad del hábitat construido y el acceso a una vivienda digna en México son prioridades nacionales. Para el año 2050 habrá 166 millones de habitantes en el país y en los próximos 30 años se construirá el 35% de las viviendas que hoy existen en México. Para la tercera década del presente siglo, en México habrá casi 40 millones de hogares. El crecimiento poblacional durante los últimos cuarenta años ha generado problemas en el sector de la vivienda y ante la imposibilidad de los organismos encargados de apoyar al sector

Una vivienda digna, además de proporcionar el espacio suficiente, accesibilidad, seguridad, garantía de tenencia, estabilidad y durabilidad estructural, ha de ser confortable ambientalmente para distintas condiciones higro-térmicas exteriores. El porcentaje de viviendas particulares habitadas con materiales durables en muros (tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto) es de 86.3%, lo que es mejorable.

- Impacto del sector de la construcción y aporte de la industrialización y la prefabricación a este problema.

La industria de la construcción es una de los mayores y más activos sectores en crecimiento a nivel mundial. Industria de la construcción = áreas económicas y sociales más importantes. El sector de la construcción, por acciones directas o indirectas, consume más del 40% de la energía producida y es responsable del 30% de las emisiones de CO2, por acciones directas o indirectas y consume más materia prima que ninguna otra actividad económica.

Se plantea que la industrialización en la arquitectura y en la edificación puede ser una pieza clave para poder hacer eficiente la gestión de los flujos materiales implicados, al poderse racionalizar, cuantificar y regir de manera más adecuada la producción de la arquitectura y del propio edificio, y si bien todavía quede camino por recorrer para el logro de soluciones sostenibles definitivas, por lo menos, desde los principio de la Ecología Industrial, se pueden plantear medidas paliativas que aporten en este compromiso que tenemos que tomar con el medio que nos rodea y la sociedad en la que estamos inmersos.

Existen autores que, partiendo del análisis de los sistemas constructivos tradicionales, valoran las posibilidades técnicas y económicas de la industria contemporánea para mejorar los procesos de fabricación y puesta en obra, y abogan por una industrialización y una especialización del sector de la construcción. Con la industrialización se establece una relación plenamente bilateral entre industria y arquitecto, entendiendo que ninguno debe subordinarse al otro sino que ambos trabajan para la sociedad. Por medio de la industrialización, los sistemas constructivos evolucionan

Por medio de la industrialización y la prefabricación en la vivienda se plantea la optimización energética de cerramientos multicapas y ligeros, optimización de cerramientos con integración de sistemas solares activos, optimización acústica de cerramientos multicapa ligeros ante impacto y ruido aéreo y la optimización de sistemas

de divisiones interiores, de tabiques e instalaciones, por medio de sistema ligeros que hagan más eficiente la vivienda

Actualmente en México, los materiales de construcción que más se usan para vivienda son el tabique rojo y el block. Los hornos empleados para la producción de ladrillos rojos presentan los siguientes problemas: Emplean residuos como combustibles, son grandes generadores de contaminación, dan uso irracional del suelo, conforman un sector marginado, la gente que se dedica a la cocción de ladrillos no cuenta con recursos para invertir en tecnología. Los blocks conllevan todos los problemas que conllevan los materiales basados en el cemento, alto consumo de energía, de combustibles fósiles, consumo de recursos naturales. No sólo hay que pensar en el tipo de edificio, el sistema constructivo y los materiales, sino también en la gestión de los recursos a lo largo de su vida útil. Si pensamos en los recursos y los materiales como nutrientes, ya sean biológicos o técnicos, se puede recuperar el valor económico del residuo, al considerarlo como recurso.

- El aporte de la construcción con tierra.

El uso de la tierra en la construcción constituye una oportunidad de reducir el impacto ambiental en la edificación, fuente de abastecimiento de material ilimitada, permitiéndonos la posibilidad, incluso, de utilizar tierra de las propias excavaciones, favoreciendo la reducción de residuos de la obra y los gastos de transporte de material. Es necesario analizar los antecedentes de construcción y arquitectura en tierra

Actualmente diferentes autores e investigadores proponen nuevas e innovadoras técnicas para trabajar con suelos arcillosos para su uso en construcción. El uso de materiales de la región y sistemas constructivos tradicionales con la implementación de tecnologías apropiables y actuales es una posibilidad de mucho interés.

El hombre ha construido con tierra desde hace aproximadamente 9000-10000 años. La mitad de la población mundial vive o trabaja en edificios construidos con tierra, barro o arcilla. En México, la arquitectura tradicional que hasta hace quince años era un patrimonio cultural en la mayoría de los estados, casi se ha perdido en su totalidad. La

arquitectura vernácula mexicana tiene particularidades tanto locales como regionales, patrimonio arquitectónico olvidado, sin embargo, constituyendo la gran mayoría del patrimonio construido del país. Arquitectura vernácula muy cercana a poder ser sinónimo de arquitectura en tierra. En términos generales, cuando se habla de arquitectura en tierra en México nos referimos básicamente al adobe

Actualmente, casi el 50% de la población vive en construcciones de tierra, mayoritariamente localizada en países en vía de desarrollo. Sin embargo, también se puede encontrar interés en la construcción con tierra en países desarrollados. Hoy en día las construcciones con tierra y madera han venido recuperando su valor histórico y cultural (Aguirre 2012). En la última década surgen varias iniciativas de recuperación de la tradición constructiva con tierra, aplicando mejoras tecnológicas. Se busca incentivar el prestigio del material constructivo

La construcción con tierra y el uso de materiales arcillosos ha dado un paso adelante en los procesos de fabricación. Con la industrialización de los materiales de tierra se mejoran las características naturales del material y se garantizan unas calidades óptimas para su empleo y puesta en obra, reduciendo los tiempos de ejecución. En los últimos tiempos se ha desarrollado la prefabricación del tapial y la introducción en taller de sistemas de instalaciones dentro de los muros. El cambio de tendencia en el interés científico por la construcción con tierra ha originado también un aumento en el número de normativas y códigos de regulación respecto a ella

El camino de la construcción con tierra de hoy en adelante, pasa por trabajar en la investigación en varios campos: la industrialización y mecanización para la optimización de procesos; la adición de materiales que aporten estabilización y protección frente a la humedad; la introducción de aligerantes que no comprometan la resistencia del material; y las posibilidades de incorporación de residuos de diferentes industrias.

- Estabilización de compuestos arcillos por medio de materiales puzolánicos. Caracterización del material puzolánico.

Se pudo caracterizar de manera adecuada la BSA por medio de la composición química por XRF, donde se mostraba una concentración media de aluminio y sílice reactivo. Comparando entre BSA, BD y FA estos últimos presentan una mayor concentración de aluminio y sílice reactiva y una buena concentración de hierro. La alta concentración de Al y Si indica una mayor posibilidad de reacción con el CH y una mayor probabilidad de constituir un material cementicio, sustituto del cemento como para utilizarlo como estabilizador de un compuesto arcilloso.

La posible aplicación o no de la tierra como material de construcción en el siglo 21 depende del conocimiento de las propiedades química, física y mecánicas del suelo. La construcción contemporánea en tierra se puede englobar en tierra estabilizada y tierra sin estabilizar, prescribiéndose la tierra estabilizada como una solución adecuada para la crisis de vivienda urbana y la sostenibilidad medioambiental y siendo necesaria para cumplir con los estándares necesarios requeridos en el mercado. Se ha estudiado el potencial del uso de residuos industriales para la estabilización de suelos con resultados bastante prometedores. Puzolana como sustituto del cemento portland.

- Caracterización del compuesto arcilloso – refuerzo fibroso.

Con respecto a la prueba de absorción de la fibra, los resultados de notan una alta tasa de absorción en las primeras horas de contacto de la fibra con el agua, llegándose a una estabilización del peso en la dinámica de absorción a las 6 horas. Está por encima de valores de absorción de fibras naturales como el cáñamo, Jute, Sisal o algodón según la bibliografía estudiada que adquieren la estabilización en peso por absorción de agua en más tiempo que la paja de cereal, entre 8 y 12 horas. Se tiene la referencia de que fibras como la fibra de maíz tiene una mayor absorción pudiendo alcanzar el punto de saturación en los primeros 10 minutos de inmersión. En comparación con el valor de desorción de otra fibra de cereal como es la fibra de maíz, no tiene un mal resultado. Teniendo en cuenta que el 100% es el peso de saturación tras un tiempo de la fibra sumergida en agua, se obtiene una estabilización en el 70% de este peso a las 48 horas, mientras que en el caso de la fibra de maíz esta situación se da a las 120 horas.

Se puede decir que la fibra de paja de cereal tiene un comportamiento inestable ante el agua lo que denota su carácter poroso, que hay que tener en cuenta a la hora de establecer las dosificaciones del compuesto que conforma el panel, por la alta absroción y desorción del material.

Con respecto a la caracterización de su comportamiento mecánico: Se obtiene un bajo valor de resistencia a tracción de 63.5 Mpa, en comparación con valores de 175 Mpa de la fibra de maíz, 550 Mpa de la fibra de cáñamo, 400 Mpa de la fibra de Yute o 600 MPa de la fibra de Sisal como valores de referencia.

- Caracterización del compuesto arcilloso – suelo arcilloso:

Se observan diferentes fases cristalinas destacando la claridad de exposición de la silvita y la calcita, son resultados que nos pueden ofrecer conclusiones cuando se analice en comparación a las modificaciones que puede tener con la calcinación que se analiza en el estudio de la ceniza de paja de cebada. En las gráficas de difracción de rayos x aplicadas a los diferentes suelos arcillosos que se estudian se observa una estructura y composición cristalográfica y una existencia de fases cristalinas muy similares.

En el análisis granulométrico de los diferentes suelos arcillosos estudiados se observa una mejor distribución del tamaño de grano en las muestras “La Solana” y San Nicolás B”, con un reparte más homogéneo de los diferentes tamaños, como se aconsejan diferentes autores (Guillaud, 2008). Las muestras “La Solana” y “San Nicolás B”, con un 33.06% y un 32.41% respectivamente, también se caracterizan por tener un buen porcentaje de finos, que conviene que esté entre el 25 y 35% según Guillaud, 2008.

Según los diferentes estudios realizados se determina que es el suelo arcillos “La Solana” el que resulta más adecuado de los diferentes suelos estudiados con sus características más favorables a la hora de hablar de granulometría, retracción y límite líquido Por esta razón y por la localización geográfica del banco de donde se obtiene se

decide utilizar el suelo “La Solana” como suelo para hacer el compuesto base para fases posteriores de experimentación.

- Caracterización del compuesto arcilloso – material puzolánico:

A partir del XRD, a partir de un análisis gráfico y cualitativo, se observa como BSA presenta como un 50% de fase amorfa, sin embargo, se observa como BD presenta una mayor proporción de estructura amorfa. A partir de este análisis por XRD se pudo identificar estructuras cristalinas como aluminosilicatos, algo que caracteriza a las puzolanas con buenas características puzolánicas.

En general, BD y FA, que en un principio mostraron la mayor concentración de silicio y aluminio reactivo, tuvieron los mejores resultados en el desarrollo de resistencia a compresión con la mezcla puzolana-arena-cal-agua a diferentes tiempos y en condiciones reguladas, denotándose una mejor actividad puzolánica (Parámetros cinéticos) a edades tempranas según el método de medición por conductividad eléctrica. Al mismo tiempo también se pudo observar una mayor evolución y creación de nuevas fases cristalinas en respuesta a esta reacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio.

Existe una relación directa de los resultados antes enunciados, de la actividad y reacción puzolánica, con la concentración de partícula fina y la fracción de material soluble en agua. En general se puede concluir que el parámetro más importante para determinar el buen comportamiento puzolánico de una puzolana es la cantidad y/o contenido combinado de sílice y aluminio, pero también es determinante el tamaño de partícula, la cantidad de tamaños finos de partícula y la fracción de puzolana soluble en agua.

Fueron suficientemente claros y efectivos los diferentes métodos aplicados como para determinar el mejor y peor comportamiento como puzolana y la actividad puzolánica de las diferentes puzolanas con las que se hizo la comparación.

Sería necesario y útil estudiar el comportamiento de BSA y WSA obtenido bajo condiciones controladas de temperatura y tiempos de calcinación y hacer una comparativa con BSA y WSA obtenido en las mismas condiciones que se exponen en el actual artículo.

Con el presente estudio se abre la puerta a mejorar la estabilización química de compuestos arcillosos y materiales en base a ellos en combinación con el hidróxido de calcio o cal y, por lo tanto, se abre la puerta a un avance en el bajo impacto ambiental y sostenibilidad de este tipo de materiales.

- Caracterización del compuesto arcilloso:

También se observa un mejor resultado en el caso P03.01, con parecidos resultados en el caso de P01.01 y P02.01, y se observa una evolución más favorable de los 14 días a los 28 de la probeta P02.01. Siempre bajan de manera significativa los valores cuando se añade refuerzo fibroso. En el análisis de capacidad de absorción, acción que no es favorable para el compuesto arcilloso, de las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 vemos como las probetas P0101, P0102 Y P0103, compuestos sin ningún estabilizante, pierden su consistencia en el primer ciclo. Los mejores resultados los obtenemos con la probeta P0403 y el peor resultado lo obtiene la probeta p0201.

En la prueba de desorción de las probetas P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 la desorción más alta la tenemos con la probeta P0403 y la más baja con la P0201. En la prueba de absorción de las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105, vemos como la probeta PF0105 o resiste a la primera media hora si deshacerse, y el mejor resultado lo obtenemos con las probetas PF0103 y PF0102, al tener una más baja primera absorción y luego perder menos materia a lo largo de toda la prueba. El peor resultado lo obtendríamos con la probeta PF0104.

En la prueba de desorción de las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105, vemos como las probetas PF0101, PF0103 y PF0102 ofrecen los mejores

resultados con un comportamiento muy similar. El peor resultado lo obtendríamos con la probeta PF0104.

La prueba de durabilidad por medio de ciclos de mojado y secado de las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 nos deja el resultado de que las probetas P0101, P0102, P0103, aquellas que no tienen ningún estabilizante, se disgregan en el primer ciclo y se observa como las probetas P0401, P0402 y P0303 son los que tienen mejor resultado, demostrando una mejor durabilidad, siendo la probeta P0203 y P0202 las que demuestran un peor comportamiento de durabilidad.

La prueba de durabilidad por medio de ciclos de mojado y secado de las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105 nos deja el resultado de que la probeta PF0102 es la que obtiene un mejor resultado, seguido de la probeta PF0101, de hecho son las únicas probetas que resisten todos los ciclos de mojado y secado, siendo las probetas PF0105 y PF0102 los que demuestran un peor resultado. La prueba de durabilidad por medio de ciclos de mojado y secado en ambiente sulfatado de las probetas P0101, P0102, P0103, P0201, P0202, P0203, P0301, P0302, P0303, P0401, P0402 y P0403 nos deja el resultado de que las probetas P0101, P0102, P0103, aquellas que no tienen ningún estabilizante, se disgregan en el primer ciclo y se observa como las probetas P0403 y P0303 son los que tienen mejor resultado, demostrando una mejor durabilidad, siendo la probeta P0203, P0202 y P0201 las que demuestran un peor comportamiento de durabilidad.

La prueba de durabilidad por medio de ciclos de mojado y secado de las probetas PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105 nos deja el resultado de que la probetas PF0105, P0104 y PF0103 no aguantan los primeros ciclos de la prubea, obteniendo el mejor resultado con las probetas PF0101 y PF0102.

- Caracterización del panel:

Los paneles PF0101 no son contabilizados en las pruebas que siguen pues no resisten el proceso de secado y fraguado sin disgregarse y agrietarse en el proceso de secado/retracción.

En la prueba de compresión sobre los paneles con formato 30x60x6cm se ve como los paneles con menor proporción de refuerzo fibroso demuestran un mejor comportamiento en su resistencia y en su módulo elástico, teniendo el panel tipo PF0102 el mejor resultado en su valor de resistencia a compresión, teniendo en cuenta el esfuerzo límite de diseño, seguido del panel tipo PF0103 y el panel PF0103 el mejor resultado en el valor del módulo elástico. Con respecto a otros valores de referencia de otros materiales en base a tierra o pétreo, se observa un valor muy bajo de la resistencia a compresión.

Por efecto del esfuerzo a compresión se producen muchas fisuras en el panel, perpendiculares y paralelas al esfuerzo aplicado, de manera más intensa en las esquinas superiores donde las fisuras se tornan también diagonales. Este esquema de fisuras se repite en los diferentes tipos de paneles, siendo más evidente en los paneles tipo PF0102 y PF0103.

En la prueba de caracterización a flexión vertical se consigue el mejor resultado con el panel tipo PF0103, con un valor de 0.09 Mpa (0.9 Kg/cm2), muy por debajo del valor de resistencia a flexión vertical de otros materiales comerciales con un uso parecido. El peor resultado se obtiene con el panel tipo PF0104. Con respecto al módulo elástico el mayor valor lo tenemos nuevamente con el panel tipo PF0103 con un valor de 11.8 Kg/mm2 (118 Kg/cm2), en este caso con valores superiores al panel de paja comprimida comercializado por la marca Stramit o similar al valor que presenta el panel de yeso, productos comerciales con los que podría competir.

El panel prefabricado nos mostró en su comportamiento la baja resistencia que tiene de compresión, flexión e impacto, dejándonos claro el hecho de que no puede ser utilizado como muro de carga, ni siquiera ser comparado con paneles de concreto, pero como panel para muro divisorio y fachada es una opción muy viable.

Los factores que más afectan las características finales del producto son: concentración de los agregados, tamaño y proporción de la paja y un proceso de mezclado que permita asegurar la impregnación de toda la paja, ya que la paja le da refuerzo al panel por ser fibra.

Se considera que es necesario la adición de un cementante para aumentar la resistencia del mortero.

En los paneles PF0101, PF0102, PF0103, PF0104 y PF0105 de la fase final se obtiene un resultado lógico donde a medida que aumenta el contenido de paja como refuerzo fibroso, este mismo aporta aislamiento térmico y la conductividad térmica baja. El panel PF0105 por lo tanto obtiene el mejor resultado con un valor por debajo de 0.100 W/m℃, por lo que se le puede considerar que tiene carácter de material aislante, presentando el peor resultado el panel PF0101, que no tiene una característica de aislamiento destacada.

El valor del calor específico es básico como característica de un material que puede ofrecer un alto rendimiento en base a su inercia térmica. En este caso es el panel PF0101 donde encontramos un valor más alto, lo que conllevará la posibilidad de tener un material con mayor inercia térmica y el panel del tipo PF0105 es el que demuestra tener un valor más desfavorable en este sentido.

Como caracterización complementaria se obtienen los resultados de las termografías estudiadas en los diferentes tipos de paneles con resultados muy comparables a los que resultados que se obtuvieron en la caracterización del Calor Específico de los materiales de los paneles, guiándonos los resultados sobre la posible inercia térmica que puedan tener los paneles respecto a los cambios de temperatura y condiciones climáticas del ambiente. En los resultados obtenidos se observa como existe una relación directa entre la variación de la radiación sobre el plano horizontal, lo que más influye de manera característica, y la variación de la temperatura con la variación de la temperatura radiante de los diferentes tipos de paneles. Un panel con

una mayor inercia será influenciado de una manera menos extrema que aquel panel que tiene menos inercia térmica. En este caso, estudiando los paneles previos a los usados en la fase final, tenemos un mejor resultado en el caso del panel del tipo P0101, con mejor resultado que su equivalente, sin refuerzo fibroso, de los de la fase final PF, dónde tenemos el mejor resultado con el panel PF0101. Siempre obtenemos la comparativa con el valor del suelo de concreto que siempre tendrá mayor inercia térmica que el resto de los paneles por estar en contacto con el suelo.

Como es conocido, el aislamiento acústico de un material es función directa de su masa, de su densidad. Por esto, son aquellos tipos de paneles con una mayor densidad los que obtienen un mayor valor en términos de aislamiento acústico. De los paneles PF nos quedamos con que un valor término medio aceptable es el del panel del tipo PF0103.

Propuesta de un panel prefabricado en base a tierra estabilizada para vivienda industrializada

Se decide optar por la composición base PF0103, donde con un aporte de cementante del 19% del peso total se añade un 2% de recuerso fibroso frente a la parte de suelo en un 79%, con 60% de suelo arcilloso, 32% de arena y 8% de arenilla.

El formato puede ser desde el estudiado en la caracterización 30x60x6cm, como formatos de mayor tamaño, que tendrán que ser caracterizados en futuras investigaciones, de 60x60x6cm, 60x60x9cm, 60x60x12cm o 60x120x12cm, 60x120x6cm, según las necesidades y aplicación.

Por las características del compuesto y del panel se sugiere la aplicación de estos paneles con el apoyo sobre una subestructura y como componente hoja interior de un sistema prefabricado de fachada ventilida, donde se complementen los aportes del panel con otros componentes que sumen a su beneficio.

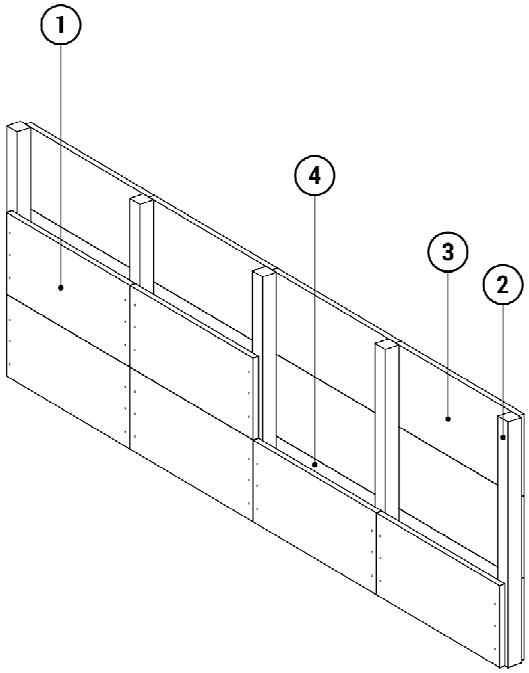


Fig. 6.1. Propuesta de aplicación del panel prefabricado en base a tierra estabilizada dentro de un sistema prefabricado de fachada ventilada

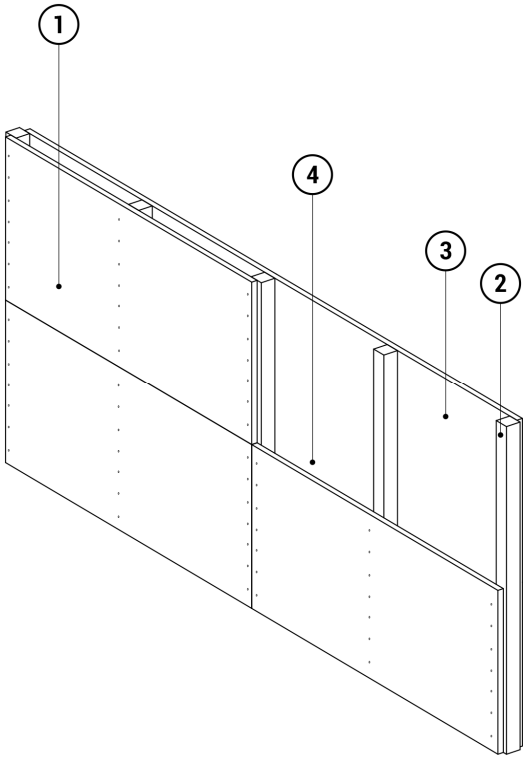


Fig. 6.2. Propuesta de aplicación del panel prefabricado en base a tierra estabilizada dentro de un sistema prefabricado de fachada ventilada

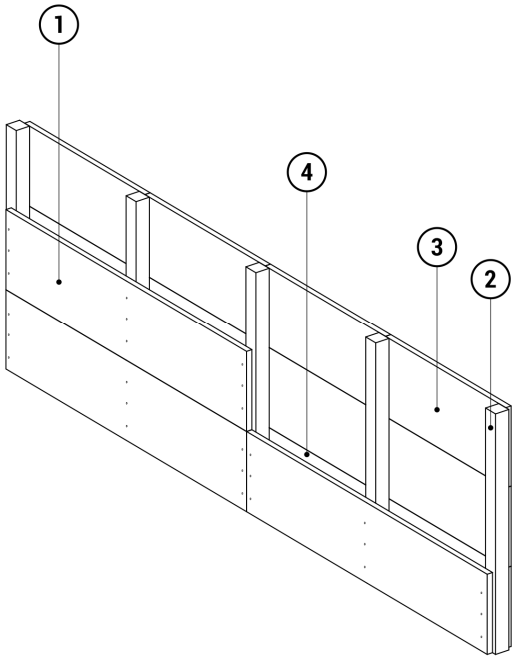


Fig. 6.3. Propuesta de aplicación del panel prefabricado en base a tierra estabilizada dentro de un sistema prefabricado de fachada ventilada

7 REFERENCIAS

AAVV., 2008. Catálogo “Home Delivery, Fabricating the Modern Dwelling”, Museo de Arte Moderno de Nueva York, Nueva York

AAVV., 2009. Inventario de las Capillas Familiares Otomí-Chichimecas en el espacio cultural”. Lugares de Memoria y Tradiciones Vivas de los Pueblos Otomí-Chichimecas de Tolimán”. La Peña de Bernal, guardián de un territorio sagrado, Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Dirección de Sitios y Monumentos de Querétaro, México

AAVV. 1979. Cobijo, Ed. H. Blume Ediciones, Madrid

AAVV. 1998. Marruecos Presahariano. Hábitat y Patrimonio, Ed. ColLegi D’aparelladors i Arquitectes Técnics De Barcelona, Barcelona

AAVV. 2007. XS ecológico: Grandes ideas para pequeños edificios, Ed. Gustavo Gili S.L., Barcelona

Aguirre, R. 2012. Prácticas demostrativas, Horizontes Revista de Arqutiectura, 4

Allenby, B. (1992). Industrial Ecology: The Materials Scientist in an Environmentally Constrained World. MRS Bulletin, Vol. 17, Issue 03, 46-51

Al-Akhras, N.M., Abu-Alfoul, B.A., 2002. Effect of wheat Straw ash on mechanical properties of autoclaved mortar. Cement and Concrete Research 32, 859-863

Allinson, D, Hall, M., 2010. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. Energy Build 42, 845-52

Álvarez, L. 2009. Tradición constructiva de la Sierra Gorda, “De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro”, Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro.

American Concrete Institute Committee, 2002. 232.2R-96, Use of Fly Ash in Concrete, 34.

Anderson, R. (1998). Mid-Course Correction. Toward a Sustainable Enterprise. Ed. The Peregrinzilla Press, Atlanta

Arcas, J., Pagés, A., Casals, M., 2010. Habitabilidad, la otra clave de la edificación sostenible. Memorías de ponencias del congreso SB10mad-Sustainable Building Conference 2010, San Sebastián, España

Ashour, T, Georg, H, Wu, W., 2011. An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale buildings. Appl Thermal Eng 31, 293-303

ASTM D4753-07, Standard Guide for Evaluating, Selecting, and Specifying Balances and Standard Masses for Use in Soil, Rock, and Construction Materials Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

Ausubel, J. (1992). Ecología Industrial: Reflexiones en un coloquio. Proc. Natl. Acad. Ciencias. Vol.89, 874-884

Barbeta, G. 2002. Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el siglo XXI, Tesis Doctoral, ETSAB. Escola Técnica Superior D'Arquitectura DE Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Bensted, J., Munn, J., 2000. A discussion of the paper ``Study of pozzolanic properties of wheat straw ash'' by H. Biricik, F. AkoÈz, I. Berktay and A.N. Tulgar. Cement and Concrete Research 30, 1507-1508

Berge, B. (2009). The Ecology of Building Materials. 2 ed. Ed. Architectural Press, Elsevier, Oxford

Bestraten, S., Hormías, E., Altemir A., 2011. Construcción con tierra en el siglo XXI. Informes de la Construcción, Vol. 63, 523, 5-20

Binici, H., Aksogan, O., Shah, T., 2005. Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. Construction and Building Materials 19, 313-8

Biricik, H., Akoz, F., Berktay, I., Tulgar, A., 1999. Study of pozzolanic propierties of wheat straw ash. Cement and Concrete Research 29, 637-643

Blount, E., Clarimón, L., Cortés, Riechmann, J., Romano, D. (2007). Industria como naturaleza. Hacia la producción limpia. Ed. Los Libros de la Catarata, Madrid

Bouhicha, M., Aouissi, S., Kenai, S., 2005. Performance of composite soil reinforced with barley straw. Cement and Concrete Composites 27, 5, 617-621

Bowyer, J.L. y Stockmann, V.E., 2001. Agricultural Residues: An exciting Bio-based Raw Material for the Global Panels Industry. Forest Products Journal, 51(1)

Brown, E. 2009. Fiber Processing and Re-Manufacture Mill - Community Development Plan for Masonite Site, Ed. Easterbrook, Ukiah.

Caballero, A. 2012. Bioconstruction: the old seen with new eyes, Horizontes Revista de Arqutiectura, 4

Cano, J. F. 2008). Introducción del urbanismo, Limusa.

Cassinello, P., 2008. Eduardo Torroja y la industrialización de la “machine à habiter” 1949-1961. Informes de la Construcción Vol. 60 (512), 5-18

Castellanos, C. 2009. Perspectivas mundiales, “De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro”, Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro.

Chikara, H., Iwamoto, S., Yoshimura, T., 2009. Indoor air pollution of volatile organic compounds: indoor/outdoor concentrations, sources and exposures. Nippon eiseigaku zasshi. Japan J Hygene 64, 683-8

Ciurilenau, G. T. y Horvarth, I. B. 2012. Modular building using rammed earth, ACTA Technic Napocensis: Civil Engineering & Architecture, 55 (2)

Cobreros, C., 2009. Uso de Fibras Vegetales procedentes de Explotaciones Agrícolas en la Edificación Sostenible, Tesina de grado de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T., Oliveira, D., Silva, R., 2012. Soil stabilization using alkaline activation of fly ash for self-compacting rammed earth construction. Ed. Elsevier, Construction and Building Materials 36, 727-735

Cristelo, N., Glendinning, S., Teixeira Pinto, A., 2011. Deep soft soil improvement by alkaline activation. Proc ICE – Ground Improv 164(2), 73–82

Cuchí, A. (2005). Arquitectura y Sostenibilidad. Ed. Univ. Politécnica de Cataluña, Barcelona

Cuchí, A. 2009. Apuntes de clase Asignatura Impacto Ambiental en la arquitectura, Master AEM curso 2008-2009, Univesidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Del Río, S. (1998). Residuo cero, Boletín Greenpeace 2002, Vol. III, 30-31

Del Río, M. y Sáinz, A. 2010. La evolución de los sistemas constructivos en tierra, X CIATTI 2013, Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra, Cuenca de Campos, Valladolid

Delgado, M.C.J., Guerrero, I.C., 2006. Earth building in Spain. Construction and Building Materials 20, 679–690

Díaz, D. 2004. Diseño de material compuesto a partir de polietileno reciclado y bagazo de caña de azúcar, Tesis de Máster en Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad de La Habana, La Habana.

Etchebarne, R. 2012. Earthen homes for sustainable development: the experience in Uruguay, Horizontes Revista de Arqutiectura, 4

Estévez, A. y Martín-Lara. 2013. Casa s-low. Sistema innovador de bioconstrucción modular con entramado de madera y tapial, X CIATTI 2013. Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra Cuenca de Campos, Valladolid.

Fernández, J. (2007). MIT – building technology program. MITCOURSES Ecologies of Construction – Architecture. 4-406-spring-2007. ITM, Massachusets

Ferreiro, A. 2012. Arquitectura con tierra en uruguay. Horizontes Revista de Arquitectura, 4

Folch, R. (1999). Diccionario de socioecología, Ed. Planeta, Barcelona

Frosh, R.A. (1992). Industrial ecology: A philosophical introduction. Proc. Natl. Acad. Ciencias,Vol.89, 800-803

Galván, M., 2008. Desarrollo de nuevos materiales polifásicos para construcción basados en hidróxido de calcio. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Doctorado en Ingeniería, Querétaro

Gartner, E., MacPhee, E., 2011. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. Cement and Concrete Research, 41, 736–749

Ghavami, K., Toledo Filho, R., Barbosac., N. 1999. Behaviour of Composite soil reinforced with natural fibers. Cem Concr Compos, 27, 617-21.

Ghiassian H., Jamshidi R., Tabarsa R., 2008. Dynamic performance of Toyoura sand reinforced with randomly distributed carpet waste strips. In: 4th Dec geol. earth eng. and soil dyn. conf., Sacramento, California, USA

Gómez, A., Horta, J., 2014. Análisis de una vivienda económica digna en México. Memorias del X Congreso Internacionales de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

González, A. 2012. Incorporación de técnicas de BTC a construcciones rurales, Horizontes Revista de Arqutiectura, 4

Gropius, G., W., A., 1930. Las bases sociológicas de las viviendas mínimas. Memorias del II congreso de CIAM

Guerrero, L. 2009. Tecnología constructiva y patrimonio intangible, "De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro", Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro.

Guerrero, L. 2013. Revitalización de la tradición constructiva en tierra y bambú en comunidades rurales y urbanas de Oaxaca, México, X CIATTI 2013, Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra, Cuenca de Campos, Valladolid.

Guillaud, H., 2008. Characterization of earthen materials. En: Avrami, E., Guillaud H., Hardy, M., editors. Terra literature review-an overview of research in earthen architecture conservation, Ed. The Getty Conservation Institute, Los Ángeles

Hall, M., Allinson, D., 2009. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. Building and Environment 44, 1935-42

Halvarsson, S., Norgren, M., and Edlun, H., 2004. Manufacturing of fiber composite medium density fiberboards (MDF) based on annual plant fiber and urea formaldehyde resin. International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products, Fernando Pessoa University, September 22-24, 131-147

Hammond, G., Jones, C., 2008. Inventory of Carbon & Energy (ICE), Sustainable Energy Research Team (SERT), Department of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath

Hejazi, S.M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S.M., Zadhoush, A., 2012. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and Building Materials 30, 100-116

Hossain, K.M.A., Mol, L., 2011. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. Construction Building Materials 25, 3495-3501

Houben, H. y Guillaud, H. 1994. Earth Construction - A Comprehensive Guide. ITDG Publishing, London

Jamshidi R., Towhata I., Ghiassian H., Tabarsa R., 2010. Experimental evaluation of dynamic deformation characteristics of sheet pile retaining walls with fiber reinforced backfill. Soil Dyn. Earthq. Eng.; 30:438-, 6

Jaquin, PA., 2008. Analysis of historic rammed earth construction. PhD thesis. Durham University, Durham

Jiménez, N. J., Guerrero, L. y Caeiro, J. B. 2013. La vivienda tradicional de adobe en los altos de Chiapas, México: un patrimonio vivo, X CIATTI 2013, Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra, Cuenca de Campos, Valladolid.

Karade S.R., 2010. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. Construction and Building Materials, 24, 1323-1330

Kieran, S., Timberlake, J. (2009). Refabricating architecture: How manufacturing methodologies are poised to transform building construction. Ed. McGraw-Hill, New York

Kumar, C., Patel, N. (1992). Industrial ecology. Proc. Natl. Acad. Ciencias. Vol.89, 798-799

Lal, A. K., 1995. Handbook of low cost housing. Ed. New Age International Publishers, New Delhi

Larbi, J.A., Bijen, M. J. M., 1990. The chemistry of the Pore Fluid of Silica Fume Blended Cement Systems. Cement and Concrete Research 20, 506-516

Lawrence RMH, Heath AC, Walker P (2008). Mortars for thin unfired clay masory walls. In: Proceedings of LEHM 5th International conference on Building with Earth, Koblenz, Germany, 66-73

Li C., 2005. Mechanical response of fiber-reinforced soil. Phd. Thesis, Faculty of the graduate School of the University of Texas, Austin

Lima, S. A., Varum, H., Sales A., Neto, V. F., 2012. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. Construction and Building Materials 35, 829-837

Little B. y Morton M. 2001. Building with earth in scotland: innovative design and sustainability, Scottish Executive Central Research Unit, Chief Research Officer at the Central Research Unit, Edinburgh

Liuzzi, S., Petrella, M., Stefanizzi, P., 2010. Building with earth, a sustainable material for efficient buildings. In: Proceedings of XXXVII IAHS. Santander: October, 26-28

Liuzzi, S., Hall, M.R., Stefanizzi, P., Casey, S.P., 2013. Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. Building and Env. 61, 82-92

Leliveld J., Crutzen P.J., 1992. Indirect chemical effects of methane on climate warming. Nature; 355, 339-41

López, F. J. 1987. Arquitectura vernácula en México, Ed. Trillas, México D. F.

López de Corral, J., J., 2009. 156 Viviendas Industrializadas en Vitoria-Gasteiz. Informes de la Construcción Vol. 61 (513), 101-109

Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R.V., Mandavgane, S.A., 2013. Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. Construction and Building Materials 38, 872-878

Maini, M., Dayal, A., Chattopadhyay, R.N., 2007. An assessment into the sustainability of earthen structure and modern transitions. International Symposium on Earthen Structures, Indian Institute of Science, Bangalore, 22-24 August. Ed. Interline Publishing, Bangalore

Maldonado, L.; Vela Cossio, F.; Hoz, J., 2003. Diccionario de construcción tradicional. Tierra. Ed. Nerea, San Sebastian

Malhotra, S. K., Dave, N.G., 1999. Investigations into the effect of adittion of fly ash and burn clay puzzolana on certain engineering properties of cement composites. Cement and Concrete Composites 21, 285-291

Mangino, A. 1990. Arquitectura meso-americana, relaciones espaciales, Ed. trillas s.a. de c. v., México

Manzano, A., Pineda, J., Ghavami, K., 2007. Characterization of Clay for Human Habitat. International Symposium on Earthen Structures, Indian Institue of Science, Bangalore

Manzano, A., Pineda, J., Reyes, J.L., 2011. Prototipo de vivienda sustentable para zonas rurales. En Amigó, V., Savastano, H., Delvasto, S., Manzano, A., 2011. Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción. Ed. Universitat Politécnica de Valencia, Valencia

Marín, L. G. y Recuero, M. 2008. Análisis y Comparación de Aislamiento Acústico en Viviendas y Edificios de Nueva Construcción, Revista de la Construcción, 7, 20-26

Marín, M., Reyes, J.L., Manzano, A., Pineda, J., Hernández, M.A., Pérez, J.J., Marroquín, A., 2011. Effect of fly ash and hemihydrate gypsum on the properties of unfired compressed clay bricks. Int.Journal of the Physical Sciences 17, 4264-4272

Martí, J. 2009. En AAVV. 2009. Fibras vegetales, las plantas nos ayudan a vivir, Ed. Ayuntament de Barcelona, Institut de Cultura, Museu de Ciencias Naturals de Barcelona, Jardí Botánic de Barcelona, Barcelona.

Massazza, F., 1998. Puzzolana and Pozzolanic cements. In: Hewlwtt, P. C., (ed), Lea's chemestry of cement and concrete. 4 ed. New York: J. Wiley, 471-631

Mathur V.K., 2005. Composite materials from local resources. Const. and Building Materials 20, 470-477

May, J., 2011. Casas hechas a mano y otros edificios tradicionales. Arquitectura Popular, Ed. Art Blume, S. L., Barcelona

McDonough, W., Braungart, M. (1998). The next industrial revolution, The Atlantic, (versión electrónica en www.theatlantic.com/issues/98oct/industry.htm)

McDonough, W., Braungart, M. (2002). Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. Ed. North Point Press, New York

Mckinley, J.D., Thomas, H.R., Williams, K.P., Reid, J.M., 2001. Chemical analysis of contaminated soil strengthened by the addition of lime. Eng. Geol. 60 (1–4), 181–192

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., and Behrens III, W.W. (1972). Limits to Growth. Ed. New American Library, New York

Meraz, L., Rescaldo, D. y Medina, L. F. 2013. Casas de adobe mexicanas. Una visión contemporánea, X CIATTI 2013, Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra, Cuenca de Campos, Valladolid.

Millogo, Y., Hajjaji, M., Ouedraogo, R., 2008. Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. Constr Build Mater 22, 2386-92

Minke, G., 2001. Manual de construcción en tierra. Ed. Nordan-Comunidad, Montevideo

Minke, G., Mahlke, F., 2005. Materiales de construcción con fardos de paja. Ed. Fin de Siglo, Montevideo

Miraki, M.K., Ghavami,K., and Daneshmand, F., 2006. Reinforced adobes as low-cost, energy saving building materials. Brasil-NOCMAT 2006 - Salvador,conference in Bahia, 1-12

Monserrat, J. M. 2009. En AAVV. 2009. Fibras vegetales, las plantas nos ayudan a vivir, Ed. Ayuntament de Barcelona, Institut de Cultura, Museu de Ciencias Naturals de Barcelona, Jardí Botánic de Barcelona, Barcelona

Morton, T., 2008. Earth masonry – design and construction guidelines, Ed. HIS BRE Press, London

Muntohar, A.S., 2011. Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick. Construction Building Materials 25(11), 4215–20

Neila, F.J., 2004. Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible. Ed. Munilla-Lería, Madrid

Noelle, L., 2012. Juan José Díaz Infante (1932-2012). Audacia creadora. Revista Arquine, Ed. Arquine, 61, pp. 12

Okagbue, C.O., Yakubu, J.A., 2000. Limestone ash waste as a substitute for lime in soil improvement for engineering construction. Bulletin of Eng. Geol. Environ. 58, 107–113

Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J., 2009. Engineering properties of unfired clay masonry bricks. Eng Geol 107, 130-139

Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J., 2010. Design thermal values for unfired clay bricks. Mater Des 31, 104-12

Oxford English Dictionary. http://oxforddictionaries.com/

Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. Construction and Building Materials Vol. 29, 512-519

Parra-Saldivar, M.L., Batty, W., 2006. Thermal behaviour of adobe constructions. Building Environment 41, 1892-1904

Piattoni, Q., Quagliarini, E., Lenci, S., 2011. Experimental analysis and modeling of the mechanical behavior of earthen bricks. Construction and Building Materials 25 (4), 2067-2075

Pich-Aguilera, F., Batlle, T., Casaldáliga, P., 2008. La arquitectura residencial como una realidad industrial. Tres ejemplos recientes. Informes de la Construcción Vol. 60 (512), 47-60

Pineda, J., Vega, J.T., Manzano, A., Pérez, J.F., Balmori, H., Hernández, M.A., 2007. Enhancement of mechanical and hydrophobic properties of Adobes for Building Industry by addition of polymeric agents. Building and Enviroment 42, 877-883

Pineda, J., Mendoza, M.L., Manzano, A., Pérez, J.F., Vega, J.T., 2007. Water diffusion in clays with added organic surfactants. Journal of Physics D: Applied Physics; 40, 4991-4997

Prabakar, J. y Sridhar, R. S. 2002. Effect of random inclusión of sisal fibre on strength behaviour of soil, Construction and Building Materials, 16, 123-131.

RAE. Real Academia de la Lengua Española. http://www.rae.es/rae.html

Reboux, G., Bellanger, A-P., Roussel, S., Grenouillet, F., Millon, L., 2011. Moulds in dwellings: health risk and involved species. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement 72, 352-62

Reddy, B.V.V., 2007. Indian standard code of practice for manufacture and use of stabilized mud blocks for masonry. International Symposium on Earthen Structures, Indian Institute of Science, Bangalore, 22-24 August. Ed. Interline Publishing, Bangalore

Rodrígues-Filho R. 2007. El uso de la tierra como elemento constructivo en Brasil: Un corto panorama del proceso histórico, manejo, usos, desafíos y paradigmas, Apuntes, Pontifica Universidad Javeriana, Bogotá

Rodríguez, Manuel. 2011. Introducción a la arquitectura Bioclimática, Limusa, México D. F.

Roux, R. S. 2010. Los Bloques de Tierra Comprimida BTC, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Plaza y Valdés

Rowell, R.M., Young, R.A. y Rowell, J.K. 1997. Paper and Composites from Agro-Based Resources, Ed. CRC Press, Inc

Rudofky, B., 1973. Arquitectura sin arquitectos, Ed. Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires

Ruth, M. (1998). Mensh and mesh: Perspectives on industrial ecology. Journal of Industrial Ecology, Vol. 2, 13-22

Ruiz-Larrea, C., Prieto, E., Gómez, A., 2008. Arquitectura, Industria y Sostenibilidad. Informes de la Construcción Vol. 60 (512), 35-45

Salas, J., 2008. De los sistemas de prefabricación cerrada a la industrialización sutil de la edificación: algunas claves del cambio tecnológico. Informes de la Construcción Vol. 60 (512), 19-34

Salas, J., Oteiza, I., 2009. Estrategias divergentes de industrialización abierta para una edificación pretenciosamente sostenible. Informes de la Construcción Vol. 61 (513), 11-13

Sanchez, J., 2012. La Vivienda “Social” en México. Pasado – Presente – Futuro?. Sistema Nacional de Creadores de Arte Emisión, México

Sanya, T., 2007. Living in Earth – the sustainability of earth architecture in Uganda. Phd. thesis, the Oslo School of Architecture and Design, Oslo

Ségalen, H. A. 2005. Le Chanvre En France: Cannabis Sativa L. Vulgaris, Ed. Le Rouergue, Rodex Cedex

Sivapullaiah, P.V., Lakshmikantha, H., 2005. Lime-stabilised illite as a liner. Ground Improvement 9 (1), 39–45

Soroushian, P., Aouadi, F., Chowdhury, H., Nossoni, H., Sarwar, G., 2004. Cement-bonded straw board subjected to accelerated processing. Cement & Concrete Composites, 26, 797-802

Stancato, A.C., Burke, A.K., Belardo, A.L., 2005. Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement. Cement and Concrete Composites 27, Issue 5, 599-603

Staniforth, A. R. 1986. Paja De Cereales, Zaragoza, Ed. Acribia,

Stulz, R. y Mukerji, K. 1993. Materiales de construcción apropiados. Catálogo de soluciones potenciales, Ed. SKAT & IT Publications, Switzerland,

Tamez-Tejeda, A. 1992. Arquitectura vernácula mexicana del noroeste,

Taylor, H.F.W., 1997. Cement Chemestry. Ed. Thomas Telford Services Ltd., London

Toledo Filho, R.D., Ghavami, K., England, G.L., Scrivener, K., 2003. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. Cement and Concrete Composites 25 (2), 185-196

Torres, M. E., 2011. Calidad habitaional en dos conjuntos pioneros de diseño urbano arquitectónico en Mérida, Yucatán. Nova Scientia, 3 (6), pp. 122-138

Vellinga, M., Oliver, P. y Bridge, A., 2007. Atlas of vernacular architecture of the world, ED. Routledge, Taylor&Francis Group, Oxon.

Villar Cociña, E., Frías, M., Talero, R., 2011. Adiciones activas al cemento: Inventario, caracterización y propiedades. En Amigó, V., Savastano, H., Delvasto, S., Manzano, A., 2011. Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción. Ed. Universitat Politécnica de Valencia, Valencia

Villar-Cociña, E., Valencia Morales, E., Santos, S.F., Savastano Jr., H., 2008. Bamboo leaf ash as pozzolanic material: study of the reaction kinetics and determination of the kinetic parameters, NOCMAT 2008, Cali

Villarruel, M., Álvares, L., Ortiz, H. 2009. Apuntes para la conservación de la arqutiectura vernácula, “De tierra y varas. Una muestra de arquitectura vernácula en la Sierra Gorda de Querétaro”, Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Querétaro, Querétaro.

Von Mag, A. y Rauch, M. 2011. Paredes de tapial y su industrialización (encofrados y sistemas de compactación), Informes de la Construcción, (63), 523, 35-40.

Vroomen, R., 2007. Gypsum stabilised earth, Thessis for MSc Arquitecture, Building & Planning Endhoven Uni. Technol, Eindhoven

Wadel, G., Avellaneda, J., Cuchí, A. (2010). La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales, Informes de la Construcción Vol. 62, 517, 37-51

Walker, P., Keable, R., Martin, J., Maniatidis, V., 2005. Rammed earth: Design and Construction Guidelines. Ed. BRE Bookshop, Zimbabwe

Wambua, P., Ivens, J. y Verpoest, I. 2003. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinfored plastics, Composites Science and Technology, 63, 1259-1264

Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D., 1998. Effect of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength

properties of lime-stabilized sulphate-bearing clay soils. Eng. Geol. 51 (4), 37–53

Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D., 1999. Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of limewith ground granulated blastfurnace slag. Eng. Geol. 51 (4), 257–277

Woolley, T. 2006. Natural Building. A guide to Materials and Techniques, Ed. The Crowood Press Ltd, Ramsbury, Marlborough

Worrell, E., Price, L, Martin, N., Hendricks, C., and Ozawa Meida, L., 2001. Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. Annual Review of Energy and Environment 26, 303-29

Yilmaz, I., Berrin, C., 2009. Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils. Applied Clay Sciences 44, 166-72

Youngguist, J.A.1996. Agricultural fibers for use in Building Components. The use of recycled wood and paper in building applications,

Zain-ul-Abdin, Bertil Svensson. 2008. Evolution in architectures and programming methodologies of coarse-grained reconfigurable computing. Microprocessors and Microsystems. 33 (2009), pp. 161-178.

Zami M. S., Lee A., 2010. Stabilized or unstabilized earth construction for contemporary urban housing. ICRM2010-Green