



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Construcción)

"Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento"

Tesis

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA
OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
(CONSTRUCCIÓN)

PRESENTA:
AMINTA REYES BARRAGÁN

DIRIGIDO POR:
DRA. TERESA LÓPEZ LARA

CENTRO UNIVERSITARIO QUERÉTARO, QRO.
SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO 30 DE OCTUBRE DEL 2025

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 licenciatario 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 licenciatario.



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.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Construcción)

“Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Construcción)

Presenta:

Aminta Reyes Barragán

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

Dra. Teresa López Lara

Presidente

Dr. Ricardo Montoya Zamora

Secretario

M.C. Gerardo Medellín Aguilar

Vocal

Dr. Jaime Moisés Horta

Suplente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

30 de octubre del 2025

México

AGRADECIMIENTOS

A mis docentes, agradezco que me ayudaron en todo el proceso de la maestría, principalmente a mi asesora de tesis, la Dra. Teresa López Lara y a mi coordinador el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, por sus consejos, su apoyo y conocimiento.

A la institución SECITHI, le agradezco que me diera la oportunidad de estudiar un posgrado con financiamiento.

A mi compañero y amigo Marcos García, le agradezco por todo su apoyo y conocimiento, por los días en los que pasó horas ayudándome en el proceso experimental.

A mis padres y hermano, agradezco que a distancia pudieron apoyarme con sus palabras de aliento, con sus consejos y sabiduría de Dios.

A mi novio Andrés Félix, por todo el apoyo emocional, por todo su amor, que siempre se esforzó por comprender mi estrés y sacarme una sonrisa en mis momentos más complicados.

Pero en primer lugar agradezco a Dios, por siempre darme oportunidades como esta, en donde puedo crecer como Arquitecta, por ser el ser que siempre me acompaña en mis metas.

La presente tesis se la dedico a mi yo del pasado y mi yo del futuro.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	0
I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	16
1.2 JUSTIFICACIÓN	19
II. ANTECEDENTES.....	21
III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	34
3.1 ORIGEN DE LOS TAPIALES.....	34
3.2 TIPOS DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DEL TAPIAL.....	37
3.2.1 MÉTODO CONSTRUCTIVO TRADICIONAL	37
3.2.1.1 CIMENTACIÓN	37
3.2.1.2 SELECCIÓN DEL SUELO.....	38
3.2.1.3 ESTABILIZACIÓN	41
3.2.1.4 ENCOFRADO	42
3.2.1.5 HUMEDECIMIENTO	44
3.2.1.6 COMPACTACIÓN	44
3.2.1.7 DESCIMBRADO Y RESANE	45
3.2.1.8 SELLO.....	45
3.2.2 MÉTODO DE TAPIA CALICOSTRADA.....	45
3.2.3 MÉTODO DE TAPIA VALENCIANA	46
3.2.4 MÉTODO DE TAPIA CON JUNTAS REFORZADAS.....	46
3.2.5 MÉTODO DE TAPIA REFORZADA CON PIEDRAS EN SU INTERIOR.....	46
3.2.6 BLOQUE DE TIERRA COMPACTADA (BTC)	47
3.3 DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS	48
3.3.1 COLOMBIA: NORMA COLOMBIANA NTC 5324 BLOQUES DE SUELO CEMENTO PARA MUROS Y DIVISIONES.....	48
3.3.1.1 SUELO (AGREGADOS)	48
3.3.1.2 AGUA	50
3.3.1.3 NATURALEZA DE LOS MATERIALES	50
3.3.1.4 DIMENSIONES	52
3.3.2 ESPAÑA: NORMA ESPAÑOLA UNE 41410 BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) PARA MUROS Y TABIQUES	52
3.3.2.1 TIERRA	52
3.3.2.2 GRANULOMETRÍA	53
3.3.2.3 PLASTICIDAD.....	53
3.3.2.4 AGUA	54
3.3.2.5 AGREGADOS	54
3.3.2.6 ESTABILIZANTES, ADITIVOS Y ADICIONES	54
3.3.2.7 ESTABILIZANTES.....	55
3.3.2.8 ADITIVOS	57
3.3.2.9 ADICIONES.....	57

3.3.3 PERÚ: NORMA E.080 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CON TIERRA REFORZADA.....	57
3.3.4 ESTADOS UNIDOS: E2392/E2392M DISEÑO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE MUROS DE TIERRA	59
3.4 TIPOS DE REFUERZOS EN EL TAPIAL	63
3.4.1 ACERO	63
3.4.2 FIBRAS NATURALES.....	64
3.4.3 POLÍMEROS.....	65
3.4.4 FIBRAS SINTÉTICAS	66
3.5 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL TAPIAL	67
3.5.1 COMPRESIÓN AXIAL.....	67
3.5.2 ESFUERZOS CORTANTES	68
3.6 CONDICIONES SÍSMICAS DE OAXACA	69
3.6.1 TIPO DE FALLAS ESTRUCTURALES EN EL TAPIAL.....	69
3.6.2 SISMICIDAD DE MÉXICO	71
3.6.3 SISMICIDAD DEL ESTADO DE OAXACA	75
IV. HIPÓTESIS	77
V. OBJETIVOS.....	77
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	77
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	77
VI. METODOLOGÍA	78
6.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO ARCILLOSO.....	79
6.1.1 MUESTREO DE SUEL.....	79
6.1.2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	86
6.1.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	86
6.1.4 HIDRÓMETRO.....	89
6.1.5 LÍMITES DE ATTERBERG.....	91
6.1.6 CONTENIDO DE AGUA.....	95
6.1.7 CLASIFICACIÓN DEL SUEL.....	95
6.1.8 PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS.....	98
6.1.9 PRUEBA DE SUPERFICIE ESPECÍFICA	98
6.1.10 PRUEBA DE PROCTOR ESTÁNDAR.....	99
6.1.11 PRUEBA DE RESISTENCIA DEL SUEL.....	100
6.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL AGREGADO GRUESO	101
6.2.1 ANAÍLISIS GRANULOMÉTRICO	101
6.2.2 PESO VOLUMÉTRICO SECO	102
6.2.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN	102
6.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS FIBRAS NATURALES Y SINTÉTICAS.....	103
6.3.1 DESCRIPCIÓN DE REFUERZOS NATURALES Y SINTÉTICAS	103
6.4 MODELO BTC - DOSIFICACIONES DEL BLOQUE DE TAPIAL.....	103
6.4.1 DOSIFICACIÓN Y FABRICACIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL	103
6.4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE TAPIAL	104
6.4.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS DE TAPIAL	104

6.4.3 DETERMINACIÓN DE LAS FIBRAS CON MEJOR RESISTENCIA	106
6.4.4 SELECCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES DEL BLOQUE DE TAPIAL O BTC	107
6.5 ANÁLISIS EXPERIMENTAL	109
6.5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	109
6.5.2 ELABORACIÓN DE BLOQUES DE TAPIAL	110
6.5.3 APLICACIÓN DE REFUERZOS	113
6.6 EXPERIMENTACIÓN FINAL	114
6.6.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS BTC	114
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	116
7.1 GRANULOMETRÍA	116
7.1.1 CURVA GRANULOMÉTRICA	118
7.2 HIDRÓMETRO	119
7.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA	121
7.4 CLASIFICACIÓN DEL SUELO	123
7.5 CONTENIDO DE AGUA	124
7.6 PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SÓLIDOS	124
7.7 PRUEBA DE SUPERFICIE ESPECÍFICA	125
7.8 PRÓCTOR ESTÁNDAR	127
7.9 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL SUELO	130
7.10 PARÁMETROS DEL AGREGADO GRUESO	132
7.10.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	132
7.10.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO	133
7.11 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS FIBRAS NATURALES Y SINTÉTICAS	135
7.11.1 DESCRIPCIÓN DE FIBRAS	135
7.12 MODELO BTC - DOSIFICACIONES DEL BLOQUE DE TAPIAL	138
7.12.1 DOSIFICACIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL	138
7.12.2 DEMOSTRACIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL	141
7.12.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE TAPIAL	143
7.12.2.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS DE TAPIAL	143
7.12.2.4 RESISTENCIA A TENSIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL	145
7.12.4 DETERMINACIÓN DE LAS FIBRAS CON MEJOR RESISTENCIA	147
7.12.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	148
-A compresión	148
7.12.6 SELECCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES DEL BLOQUE DE TAPIAL O BTC	149
7.13 ANÁLISIS EXPERIMENTAL	150
7.13.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	150
7.13.2 BLOQUES DE TAPIAL SIN REFUERZOS	150
7.13.3 APLICACIÓN DE REFUERZOS	151
7.14 EXPERIMENTACIÓN FINAL	151
7.14.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS BTC	151
VIII. CONCLUSIÓN	159

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161
X ANEXOS	166
10.1 PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SÓLIDOS.....	166
10.2 PRUEBA DE SUPERFICIE ESPECÍFICA.....	167
10.3 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL SUELO.....	168
10.4 DOSIFICACIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL.....	169
10.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS DE TAPIAL	170
10.6 COMPARATIVA DE RESISTENCIAS EN REFERENCIAS DE LA INVESTIGACIÓN	189
10.7 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	189
10.8 FICHA TÉCNICA DE CONSTRUCCIÓN DEL TAPIAL.....	189

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. GRIETAS EN LOS MUROS POR ACCIONES SÍSMICAS PERPENDICULARES AL PLANO (2016).....	17
FIGURA 2. FALLAS EN LOS MUROS DE ADOBE (2016).	18
FIGURA 3. DEFORMACIÓN DEL MURO POR CARGA SÍSMICA TRANSVERSAL (2016).....	18
FIGURA 4. MAPA DE MÉXICO, SISMICIDAD SEMANAL (SSN, 2024).....	19
FIGURA 5. TIPOS DE FALLAS DE OAXACA JUÁREZ (ATLAS DE RIESGOS, 2014).....	20
FIGURA 6. RED BIBLIOMÉTRICA (A. REYES, 2024)	24
FIGURA 7. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LAS MUESTRAS SELECCIONADAS (A. REYES, 2024)	25
FIGURA 8. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS SUELOS (A. REYES, 2024).....	25
FIGURA 9. COMPARATIVA DE REFUERZOS (A. REYES, 2024)	25
FIGURA 10. COMPARATIVA DE SUELO (A. REYES, 2024)	25
FIGURA 11. MURALLA DE SEVILLA (2015).....	35
FIGURA 12. MURALLA DE DAROCA, ZARAGOZA (2007).....	35
FIGURA 13. DETALLE DE LA CIMENTACIÓN CON SUS PARTES. NORMA E-080, MVCS (2013).....	38
FIGURA 14. DETECCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO (2018).	39
FIGURA 15. PRUEBA DEL PUÑO (2020).	40
FIGURA 16. GRÁFICOS DE ENCOFRADOS POR ARQ. GRACIELA M. VIÑUALES (2010)	43
FIGURA 17. APISONADO POR MEDIOS MANUALES (2016).....	44
FIGURA 18. BLOQUE PREFABRICADO DE TIERRA NATURAL COMPACTADA DE LA EMPRESA TECTÓNICA (2020).....	48

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

FIGURA 19. RANGO DE DIAGRAMA DE TEXTURA DE SUELOS (2004)	49
FIGURA 20. RANGO DE DIAGRAMA DE PLASTICIDAD DE SUELOS (2004).	50
FIGURA 21. SUELOS DMÁX £ 50 MM (2004).	51
FIGURA 22. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES SEGÚN SU NATURALEZA (2004).....	52
FIGURA 23. SUELOS DMÁX 50 MM (2004).	51
FIGURA 24. ESQUEMA DE REFORZAMIENTO DE PLACAS DE ACERO (2022).....	63
FIGURA 25. EDIFICACIÓN DE TAPIAL REFORZADO CON PLACAS DE ACERO (2022).....	63
FIGURA 27. FIBRA DE PALMERA DATILERA (2020).....	64
FIGURA 26. FIBRA DE PAJA (2024).....	64
FIGURA 29. FIBRA DE YUTE (2020).....	64
FIGURA 28. FIBRA DE BAMBÚ (2022).....	64
FIGURA 30. CABUYA (2020).....	65
FIGURA 31. GOMA XANTANA (2018)	65
FIGURA 33. MALLA FIBRA DE VIDRIO (2018)	66
FIGURA 32. FIBRA DE POLIPROPILENO (2020)	66
FIGURA 34. ENSAYO DE COMPRESIÓN EN MUESTRAS DE TAPIAL (2024).....	68
FIGURA 35. CARGAS APLICADAS EN UN ESFUERZO CORTANTE (2020).....	68
FIGURA 36. ESCUELA DE ARTES DE OAXACA, GRIETAS EN LOS MUROS DE TAPIAL (2024).	69
FIGURA 37. BARDA DE TAPIAL HUNDIDA EN VIVIENDA DE SAN ANDRÉS CALPAN, PUEBLA (2022).	70
FIGURA 38. AGRIETAMIENTO DE TAPIAL POR FALLA DE CONEXIÓN CON ALERO EN BELMONTE DE GRACIÁN, ESPAÑA (2021).....	70
FIGURA 39. MAPA ANUAL DE SISMICIDAD 2020 SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL SSN (2021)	72
FIGURA 40. MAPA ANUAL DE SISMICIDAD 2021 SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL SSN (2022)	73
FIGURA 41. MAPA ANUAL DE SISMICIDAD 2022 SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL SSN (2023)	73
FIGURA 42. MAPA ANUAL DE SISMICIDAD 2024 SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL SSN (2025)	74
FIGURA 43. MAPA ANUAL DE SISMICIDAD 2023 SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL SSN (2024)	74
FIGURA 44. PLACAS TECTÓNICAS QUE INTERACTÚAN EN TERRITORIO MEXICANO SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL SSN (2023)	75
FIGURA 45. REGIONALIZACIÓN DE SÍSMICA DEL ESTADO DE OAXACA (2019)	76
FIGURA 46. PROCESO METODOLÓGICO DEL PROYECTO (2025)	78
FIGURA 47. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTADO DE OAXACA (2020).....	79

Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención
de agrietamiento

FIGURA 48. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE TUXTEPEC, OAXACA (2012)	81
FIGURA 49. ROCAS QUE PREDOMINAN EN EL ESTADO DE OAXACA (2024).....	82
FIGURA 50. SUELOS QUE PREDOMINAN EN EL ESTADO DE OAXACA (2021).....	83
FIGURA 51. UBICACIÓN DEL SUELO STO (2024).....	84
FIGURA 52. UBICACIÓN DEL SUELO SOJ (2024)	85
FIGURA 53. NÚMERO DE MALLAS (2018)	89
FIGURA 54. GRÁFICA DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA PARA HIDRÓMETROS CALIBRADOS (2005).....	90
FIGURA 55. GRÁFICO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO (2012).	92
FIGURA 56. DIMENSIONES Y SUPERFICIES (2023).....	108
FIGURA 57. MOLIDO DE SUELO PARA BTC (2025).....	110
FIGURA 58. MEZCLA DE MATERIALES PARA BTC SIN REFUERZO- REFERENCIA (2025) ..	110
FIGURA 59. PREPARACIÓN DEL MOLDE (2025)	111
FIGURA 60. PRIMERA CAPA DE MEZCLA DE LISTA PARA COMPACTAR (2025)	111
FIGURA 61. COMPACTACIÓN DE MEZCLA DE BTC (2025)	112
FIGURA 62. DESMONTE DE MOLDE (2025)	112
FIGURA 63. PREPARACIÓN DE LA FIBRA (2025)	113
FIGURA 64. MEZCLA DE REFUERZO CON SUELO, AGUA Y GRAVA (2025)	113
FIGURA 65. DESMONTE DE MOLDE (2025)	114
FIGURA 66. PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN BTC SIN REFUERZO (2025).	115
FIGURA 67. PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN BTC CON REFUERZO DE FIBRA (2025).....	115
FIGURA 68. SUELO DE TUXTEPEC OAXACA – STO (2024)	116
FIGURA 69. SUELO DE OAXACA JUÁREZ- SOJ (2024).....	116
FIGURA 70. CURVA GRANULOMÉTRICA DEL STO (2024)	118
FIGURA 71. CURVA GRANULOMÉTRICA DEL SOJ (2024)	118
FIGURA 72. ENSAYO DE HIDRÓMETRO (2024).....	119
FIGURA 73. EXTRACCIÓN DE STO DE LA COPA DE CASAGRANDE PARA LL (2024)	121
FIGURA 74. ROLADO DE LP DEL STO (2024)	121
FIGURA 75. PRUEBA DE LL EN COPA DE CASAGRANDE STO (2024)	121
FIGURA 76. EXTRACCIÓN DE SOJ DE LA COPA DE CASAGRANDE PARA LL (2024).....	122
FIGURA 77. ROLADO DE LP DEL SOJ (2024).....	122
FIGURA 78. PRUEBA DE LL EN COPA DE CASAGRANDE SOJ (2024).....	122
FIGURA 79. CARTA DE PLASTICIDAD DEL STO (2024)	123
FIGURA 80. CARTA DE PLASTICIDAD DEL SOJ (2024)	123

FIGURA 81. PESO DE MATRAZ CON SUELO AFORADO (2025)	124
FIGURA 82. TEMPERATURA EN AGUA DESTILADA (2025).....	124
FIGURA 84. AZUL DE METILENO EN BURETA (2025).....	125
FIGURA 83. PREPARACIÓN DEL AZUL DE METILENO (2025)	125
FIGURA 85. REGISTRO DE INTERACCIONES DE NEUTRALIZACIÓN (2025)	126
FIGURA 87. PESO DE SEGUNDA CAPA DE COMPACTACIÓN PROCTOR SOJ (2025).....	127
FIGURA 86. PESO DE SEGUNDA CAPA DE COMPACTACIÓN PROCTOR SOJ (2025).....	127
FIGURA 88. CURVA PROCTOR DE STO (2025)	129
FIGURA 89. CURVA PROCTOR DE SOJ (2025).....	129
FIGURA 90. PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (2025).....	130
FIGURA 91. PROBETAS DE REFERENCIA (2025).	130
FIGURA 92. CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL – RP1.4 (2025)	131
FIGURA 93. CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL – RP1.5 (2025)	131
FIGURA 94. CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL – RP1.6 (2025)	132
FIGURA 95. CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO GRUESO (2025)	133
FIGURA 96. PRUEBA DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO (2025).....	134
FIGURA 97. GRANULOMETRÍA DE AGREGADO GRUESO (2025)	134
FIGURA 98. PRUEBA DE PESO VOLUMÉTRICO SECO COMPACTO (2025).....	134
FIGURA 99. FIBRA DE YUTE SECA DE 1 CM DE LONGITUD (2025).....	135
FIGURA 100. FIBRA DE PALMA DE PLÁTANO DE 1.2 CM DE LONGITUD (2025)	136
FIGURA 101. FIBRA DE CAÑA DE 1.2 CM DE LONGITUD (2025)	136
FIGURA 102. FIBRA DE POLIPROPILENO M-12 SIKA (2025).....	137
FIGURA 103. FIBRA MALLA (2025).....	137
FIGURA 104. TONGADA DE TAPIAL REFORZADA CON FIBRA MALLA DE VIDRIO-F12 (2024).	138
FIGURA 105. TONGADA DE TAPIAL REFORZADA CON FIBRA PLÁSTICA- REF. (2024).....	138
FIGURA 106. TONGADA DE TAPIAL REFORZADA CON FIBRA MALLA DE VIDRIO – M10 (2024).	138
FIGURA 107. TONGADA DE TAPIAL REFORZADA CON FIBRA PLÁSTICA – F48 (2024)	138
FIGURA 108. CURVA DE COMPACTACIÓN DE PROCTOR PARA UN CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO Y MÁXIMA DENSIDAD DE SUELO DE SEVILLA, ESPAÑA (2024)	139
FIGURA 112. PROBETAS DE POLIPROPILENO - PFSP PARA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE (2025)	141
FIGURA 111. PROBETAS DE POLIPROPILENO – PFSP PARA PRUEBA DE TENSIÓN (2025).	141

FIGURA 114. PROBETAS DE REFERENCIA – RF PARA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE (2025)	141
FIGURA 113. PROBETAS DE REFERENCIA – RF PARA PRUEBA DE TENSIÓN (2025).....	141
FIGURA 109. PROBETAS DE FIBRA MALLA - PFM PARA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE (2025).	141
FIGURA 110. PROBETAS DE FIBRA MALLA - PFM PARA PRUEBA DE TENSIÓN (2025).	141
FIGURA 120. PROBETAS DE FIBRA DE PALMA – PFP PARA PRUEBA DE COMPRESIÓN (2025)	142
FIGURA 119. PROBETAS DE FIBRA DE PALMA – PFP PARA PRUEBA DE TENSIÓN (2025). 142	
FIGURA 115. PROBETAS DE FIBRA DE CAÑA – PFC PARA PRUEBA DE COMPRESIÓN (2025).	142
FIGURA 116. PROBETAS DE FIBRA DE CAÑA – PFC PARA PRUEBA DE TENSIÓN (2025)... 142	
FIGURA 117. PROBETAS DE FIBRA DE YUTE– PFY PARA PRUEBA DE COMPRESIÓN (2025).	142
FIGURA 118. PROBETAS DE FIBRA DE YUTE– PFY PARA PRUEBA DE TENSIÓN (2025). ... 142	
FIGURA 122. PROBETAS DE FIBRA DE YUTE + PALMA PFYP PARA PRUEBA DE COMPRESIÓN (2024).	143
FIGURA 121. PROBETAS DE FIBRA DE YUTE + PALMA PFYP PARA PRUEBA DE TENSIÓN (2024).	143
FIGURA 123. PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS DE TAPIAL (2025)	144
FIGURA 124. GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS (2025).	144
FIGURA 125. DEFORMACIÓN DE PROBETAS EN ESFUERZO MÁXIMO- PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE (2025)	145
FIGURA 126. CORTE DE PROBETAS EN ESFUERZO MÁXIMO- PRUEBA DE TENSIÓN: RF- PFSP-PFY-PFP (2025).	145
FIGURA 127. CORTE DE PROBETAS EN ESFUERZO MÁXIMO- PRUEBA DE TENSIÓN: PFC- PFM-PFYP (2025).	146
FIGURA 128. GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE PROBETAS (2025).	147
FIGURA 129. REFORZAMIENTO DE MEZCLA CON FIBRA DE YUTE Y PALMA (2025)	148
FIGURA 130. MEDIDAS DE LOS BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA A CONSTRUIR (2025).	150
FIGURA 131. VISTA DE BTCR REALIZADOS (2025).	150
FIGURA 132. VISTA DE BTCF REALIZADOS (2025).....	151
FIGURA 133. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BTCR-1 (2025).	152
FIGURA 134. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BTCR-2 (2025).	153

Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención
de agrietamiento

FIGURA 135. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BTCR-3 (2025)	154
FIGURA 136. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BDCF-1 (2025)	155
FIGURA 137. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BDCF-2 (2025)	157
FIGURA 138. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BDCF-3 (2025)	157
FIGURA 139. CURVA DE CALIBRACIÓN DEL MATRAZ (2025).	167
FIGURA 140. ENSAYO DE ULTRASONIDO EN PROBETAS DE TAPIAL (2024).....	169
FIGURA 141. COMPACTACIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL POR MEDIOS MECÁNICOS (2024).	169
FIGURA 144. ENSAYO DE DENSIDAD Y POROSIDAD (2024).	170
FIGURA 142. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON POLIPROPILENO - PFSP4 (2024).....	170
FIGURA 143. ENSAYO DE MÓDULO SECANTE DE ELASTICIDAD EN COMPRESIÓN. (2024).	170
FIGURA 145. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON POLIPROPILENO – PFSP5 (2024).....	171
FIGURA 146. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON POLIPROPILENO – PFSP6 (2024).....	171
FIGURA 147. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA MALLA – PFM5 (2024).....	174
FIGURA 148. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA MALLA – PFM4 (2024).....	174
FIGURA 149. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA MALLA – PFM6 (2024).....	175
FIGURA 150. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE PALMA – PFP5 (2024)	177
FIGURA 151. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE PALMA – PFP4 (2024)	177
FIGURA 152. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE PALMA – PFP6 (2024)	178
FIGURA 153. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE YUTE – PFY5 (2024)	180
FIGURA 154. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE YUTE – PFY4 (2024)	180
FIGURA 155. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE YUTE – PFY6 (2024)	181
FIGURA 156. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE CAÑA – PFC5 (2024)	183

FIGURA 157. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE CAÑA – PFC4 (2024).....	183
FIGURA 158. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE CAÑA – PFC6 (2024).....	184
FIGURA 159. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE YUTE + PALMA PFYP4 (2024)	186
FIGURA 160. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE YUTE + PALMA PFYP5 (2024).	186
FIGURA 161. CURVA DE DEFORMACIÓN DE PROBETA REFORZADA CON FIBRA DE YUTE + PALMA PFYP6 (2024).	187

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES DE ANTECEDENTES.....	26
TABLA 2. ARTÍCULOS DE LA UAQ	30
TABLA 3. ARTÍCULOS DE SCOPUS	31
TABLA 4. ARTÍCULOS DE GOOGLE PATENTES.....	33
TABLA 5. TOLERANCIAS DE LAS DIMENSIONES	52
TABLA 6. NÚMERO DE MALLAS	87
TABLA 7. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (DE ASTM D 2487).....	96
TABLA 8. TOLERANCIA DE LAS DIMENSIONES EN FORMA VERTICAL	108
TABLA 9. TOLERANCIA DE LAS DIMENSIONES EN FORMA HORIZONTAL	108
TABLA 10. MEDIDAS DE PROBETAS.....	109
TABLA 11. MEDIDAS DE LOS BLOQUES DE TAPIAL.	109
TABLA 12. CLASES DE RESISTENCIA NORMALIZADA A COMPRESIÓN	114
TABLA 13. RESUMEN DE LA GRANULOMETRÍA DEL STO	117
TABLA 14. RESUMEN DE LA GRANULOMETRÍA DEL SOJ	117
TABLA 15. DECILES 10, 30, Y 60 DE STO.....	119
TABLA 16. COEFICIENTE UNIFORMIDAD Y CURVATURA DE STO.....	119
TABLA 17. DECILES 10, 30, Y 60 DE SOJ	119
TABLA 18. COEFICIENTE UNIFORMIDAD Y CURVATURA DE SOJ	119
TABLA 19. LECTURAS DE PRUEBA DE HIDRÓMETRO EN STO.....	120
TABLA 20. FORMULACIÓN DE DATOS DE LA PRUEBA	120
TABLA 21. LÍMITES DE CONSISTENCIA DE STO	121
TABLA 22. LÍMITES DE CONSISTENCIA DE SOJ.....	122
TABLA 23. RESULTADOS DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO NATURAL STO	124
TABLA 24. SUPERFICIE ESPECÍFICA DE SUELO STO	126
TABLA 25. DATOS DE ENSAYO DE PROCTOR ESTÁNDAR DE SOJ.....	128
TABLA 26. DATOS DE ENSAYO DE PROCTOR ESTÁNDAR DE SOJ.....	128
TABLA 27. ESFUERZOS PRINCIPALES DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL	130
TABLA 28. GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO	132
TABLA 29. DECILES 10, 30, Y 60 DE STO.....	133
TABLA 30. COEFICIENTE UNIFORMIDAD Y CURVATURA DE STO.....	133

TABLA 31. RESUMEN DE LOS DATOS DEL AGREGADO GRUESO	134
TABLA 32. RESULTADOS DE DENSIDAD Y POROSIDAD. N: NÚMERO DE MUESTRAS; P: PROMEDIO; DE: DESVIACIÓN ESTÁNDAR; CV: COEFICIENTE DE VARIACIÓN	139
TABLA 33. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MEDIA (UCS) MÓDULO ELÁSTICO (E), DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DE) COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV) PROMEDIO (P)	140
TABLA 34. DOSIFICACIONES DE PROBETAS DE SUELO STO.....	140
TABLA 35. RESUMEN - RESISTENCIA DE LAS PROBETAS ENSAYADAS A COMPRESIÓN SIMPLE	143
TABLA 36. RESULTADOS DE PRUEBA DE TENSIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL	146
TABLA 37. DOSIFICACIONES DE MEZCLA DE BTC	149
TABLA 38. RESULTADOS DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BTCR-1	152
TABLA 39. RESULTADOS DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BTCR-2	153
TABLA 40. RESULTADOS DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BTCR-3	154
TABLA 41. RESULTADOS DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BTCP-1	155
TABLA 42. RESULTADOS DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BTCP-2.....	156
TABLA 43. RESULTADOS DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN BTCP-3.....	158
TABLA 44. DATOS DE MATRACES, PESO Y TEMPERATURA.....	166
TABLA 45. OBTENCIÓN DEL PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS	166
TABLA 46. SUPERFICIE ESPECÍFICA DE ALGUNAS ARCILLAS	167
TABLA 47. ESFUERZOS DE LA PROBETA RP1.4	168
TABLA 48. ESFUERZOS DE LA PROBETA RP1.5	168
TABLA 49. ESFUERZOS DE LA PROBETA RP1.6	169
TABLA 50. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE POLIPROPILENO PFSP4	172
TABLA 51. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE POLIPROPILENO PFSP5	172
TABLA 52. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE POLIPROPILENO PFSP6	173
TABLA 53. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA MALLA PFM4 ...	175
TABLA 54. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA MALLA PFM5 ...	176
TABLA 55. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA MALLA PFM6 ...	176
TABLA 56. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA MALLA PFP4....	178
TABLA 57. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA PALMA PFP5 ...	179
TABLA 58. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA PALMA PFP6 ...	179
TABLA 59. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA YUTE PFY4.....	181
TABLA 60. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA YUTE PFY5.....	182
TABLA 61. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA YUTE PFY6.....	182
TABLA 62. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA CAÑA PFC4	184
TABLA 63. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA CAÑA PFC5	185
TABLA 64. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA CAÑA PFC6	185
TABLA 65. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA YUTE + PALMA PFYP4	187
TABLA 66. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA YUTE + PALMA PFYP5	188
TABLA 67. ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETA DE FIBRA YUTE + PALMA PFYP6	188

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo encontrar las dosificaciones y los refuerzos de fibras para aumentar la resistencia a compresión en bloques de tapial, para lo cual se usaron energías de compactación con fibras naturales y/o sintéticas mejorando así la resistencia y disminución de la posibilidad del fallo. Se recopilaron 2 suelos de Oaxaca; uno de Tuxtepec Oaxaca (STO) y otro suelo de la capital Oaxaca de Juárez (SOJ), procediendo a estudiarlos con ensayos de laboratorio y caracterizarlos.

Este trabajo presenta una propuesta en el diseño de bloques de tapial, definiéndolos como Bloques de tierra comprimida (BTC). Se utiliza tierra apisonada (ER) con las dosificaciones adecuadas para la construcción de módulos de tapial usando energías de compactación.

Primero se realizaron pruebas de laboratorio a los dos suelos recolectados del estado de Oaxaca, se realizaron pruebas a 3 fibras naturales (yute, palma y caña) y 2 fibras sintéticas (polipropileno y malla), en pruebas de compresión las fibras sintéticas de polipropileno aumentaron un 100%, mientras que en las fibras naturales las que más aumentaron fueron fibra de yute con un 57%. En las pruebas de tensión, los dos tipos de fibras aumentaron su resistencia arriba del 100%.

Para definir el refuerzo de fibras en los BTC, se tomó en cuenta los dos tipos de cargas más presentes en un sismo, y que fibras son más alcanzables para los habitantes de la región de Oaxaca. Por lo que el trabajo determinó reforzar los bloques con fibra de yute + palma. Finalmente se demostró que los bloques de tapial reforzados con fibras naturales aumentaron la resistencia a compresión un 35% más que los bloques de suelo sin reforzar.

Palabras clave: Tapial, Bloque de tierra apisonada, Tierra apisonada, Estabilización, Refuerzo, Fibras naturales, Energías de compactación, Block de tapial.

Abreviaturas

ER	Tierra apisonada
URE	Tierra apisonada no estabilizada
SRE	Tierra apisonada estabilizada
CSRE	Apisonada estabilizada con cemento
BTC	Block de tierra comprimida
CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media
ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, limo arcilloso

ABSTRACT

The present research work had the objective of finding the dosages and fiber reinforcements to increase the compressive strength in blocks of rammed earth, for which compaction energies with natural fibers and/or polymers were used, thus improving the strength and decreasing the possibility of failure. Two soils were collected from Oaxaca; one from Tuxtepec Oaxaca (STO) and another soil from the capital Oaxaca de Juarez (SOJ), proceeding to study them with laboratory tests and characterize them.

This work presents a proposal in the design of wall blocks, defining them as compressed earth blocks (BTC). Rammed earth (RE) with appropriate dosages is used for the construction of rammed earth modules using compaction energies.

First, laboratory tests were conducted on the two soils collected from the state of Oaxaca, 3 natural fibers (jute, palm and cane) and 2 synthetic fibers (polypropylene and mesh) were tested, in compression tests the synthetic fibers of polypropylene increased 100%, while in the natural fibers the ones that increased the most were jute fiber with 57%. In tension tests, both types of fibers increased their resistance by more than 100%.

In order to define the fiber reinforcement in the BTC, the two types of loads most present in an earthquake were taken into account, and which fibers are more attainable for the inhabitants of the Oaxaca region. Therefore, the work determined to reinforce the blocks with jute + palm fiber. Finally, it was demonstrated that the blocks reinforced with natural fibers increased the compressive strength 35% more than the unreinforced soil blocks.

Key words: Tapias, Rammed earth block, Rammed earth, Stabilization, Reinforcement, Natural fibers, Compaction energies, Tapias block.

Abbreviations

ER	Rammed earth
URE	Unstabilized rammed earth
SRE	Stabilized rammed earth
CSRE	Cement stabilized rammed earth
BTC	Compressed earth block
CL	Low to medium plasticity inorganic clays
ML	Inorganic silts and very fine sands, rock dust, clayey silts

I. INTRODUCCIÓN

La mitad de la población mundial vive en casas de suelo. El suelo ha sido el material más socorrido en la construcción de viviendas desde tiempos inmemoriales. Esto representa una enorme parte del ambiente construido, y es el resultado de tradiciones ancestrales. Sin embargo, con el surgimiento de nuevas tecnologías y en especial el uso intenso del cemento Pórtland, en la reconstrucción de ciudades europeas, luego de la Segunda Guerra Mundial, el paradigma de la modernidad se instala y descarta el uso de la tierra como material de construcción dando paso a la sustitución de este noble material dejándolo como un material obsoleto y que hasta hoy en día se han ido descartando poco a poco.

Como bien mencionamos, si nos remontamos a la antigüedad nos podremos dar cuenta las maravillas que la tierra nos pueden ofrecer, incluso muchas viviendas y templos, así como ciudades enteras siguen de pie después de siglos de haberse construido. (ejemplos) La idea de proponer nuevamente el uso de este material de construcción radica en las ventajas ecológicas, económicas y sociales, principalmente ya que como bien se ha mencionado en varias publicaciones e investigaciones nos lleva a la definición de que por ser un material que se puede encontrar en el mismo sitio de donde se va a construir, dependiendo el tipo de suelo, va a generar un impacto positivo si de costos hablamos, ya que se evitaría el traslado de materiales de un punto a otro, así como la remoción de escombro, si así fuera el caso, e incluso la mano de obra, que es un tema que más adelante se va a tratar.

La tierra apisonada asiduamente tiene diferentes tipos de arcillas, y requiere de distintos aditivos estabilizantes que, por otro lado, permitan explotar los beneficios ambientales y económicos de este método de construcción.

En este estudio se realizarán pruebas de arcillas de las regiones de Oaxaca para diseñar diferentes BTC usando refuerzos poliméricos de fibras naturales con energías de compactación, y combinando diferentes aditivos para la utilización de construcciones muros con tierra apisonada.

El presente trabajo está estructurado en los siguientes capítulos:

- El capítulo 1 presenta la introducción, el planteamiento del problema y la justificación del proyecto de tesis.
- El capítulo 2 plantea los antecedentes de investigación.
- El capítulo 3 presenta toda la fundamentación teórica.
- El capítulo 4 define la hipótesis en la que está basada la tesis.

- El capítulo 5 describe los objetivos de la investigación, a partir del planteamiento de la hipótesis.
- El capítulo 6 especifica la metodología planteada para lograr el cumplimiento de los objetivos de la investigación.
- El capítulo 7 corresponde a los resultados del proyecto de tesis y la discusión.
- El capítulo 8 incluye conclusiones definidas del trabajo presente.
- El capítulo 9 engloba la bibliografía o referencias empleadas en todo el desarrollo de la investigación.
- El capítulo 10 incluye los anexos necesarios que complementan el trabajo realizado.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la vida útil de una vivienda de tapial, puede llegar a los 100 años, pero existen fallas que trascienden con el lugar en donde se construyen y como se construyen en el estado de Oaxaca. Al construir con mampostería las viviendas, los habitantes son afectados económicamente cuando se presenta una falla estructural a causa de terremotos, ya que los cambios pueden ser más costosos. Es uno de los estados con mayor sismicidad en la República Mexicana, registra aproximadamente el 25 % de los sismos del país. La sismicidad refleja en que gran parte las construcciones están sometidas a enormes esfuerzos (Anysz Hubert, et al.,2019).

Al construir espacios con tapiales en regiones con alto nivel sísmico, es necesario considerar una serie de estrategias para lograr hacer de los muros de tapial más funcionales. Se ha usado tapiales de forma moderna dando una buena imagen, olvidando la funcionalidad, haciendo construcciones que a corto plazo se agrietan.

Es difícil aplicar los métodos constructivos tradicionales de tapial en zonas altamente sísmicas, la naturaleza del material vuelve muy vulnerable a sismos y terremotos las construcciones de este tipo (D. Torrealva, et al., 2016).

La caracterización de la mecánica de fractura al tapial no ha sido aún desarrollada, siendo muy pocos los investigadores que han tratado de acercar el método a este material (D. Torrealva, et al., 2016).

(Urbano Tejada, et al., 2016) redacta que los muros de suelo compactado, en forma similar al muro de adobe, disponen de una adecuada resistencia a la compresión, lo que les da soporte a cargas de gravedad sin dificultad. Las complicaciones se presentan cuando los muros deben sostener cargas horizontales en sí mismo. Cuando estas cargas interactúan en el plano del muro, su resistencia depende de su capacidad de absorber esfuerzos de corte a fricción. Cuando las solicitudes

son perpendiculares al muro, la resistencia depende de una capacidad de tracción por flexión que, que en este caso podría ser muy baja.

Por lo cual, existe un consenso en consideración que, para disminuir la vulnerabilidad de las construcciones de tierra, deben llevar refuerzos que cumplan con sus límites mecánicos.

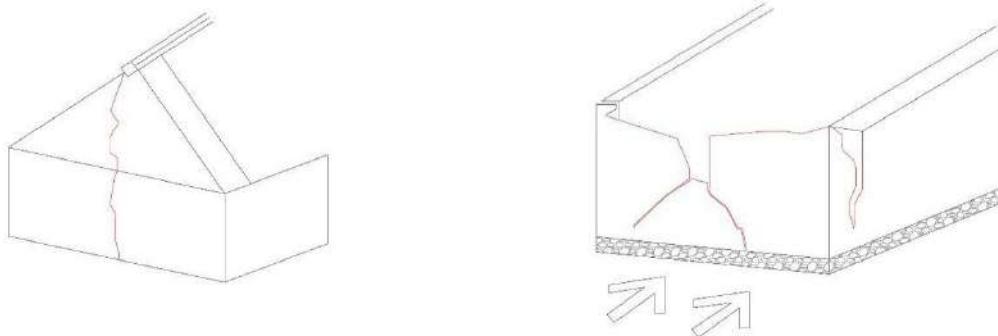


Figura 1. Forma de grietas en muros por causas sísmicas perpendiculares al plano (2016).

Las fallas observadas en la figura 1 en muros de tierra debido a presencia de sismos, presenta cierta similitud con las que se muestran en los muros de adobe, sobre todo en las que se manifiestan en las esquinas y las de volcamiento. Sin embargo, las grietas por esfuerzos cortantes, que parecen presentarse formando un ángulo de 45° con la horizontal, según la relación dimensional entre la altura y el largo de cada adoben, cercana al 1:2, suelen irse por las uniones de construcción, invadiendo la capacidad de corte-fricción del muro tapial, el cual queda problemáticamente expuesto al volcamiento.

En las figuras 2 y 3 se representa los tipos de fallas que suelen tener las edificaciones de ER. Cuando los muros se fisuran en sus extremos laterales, se elimina el trabajo de la construcción como un conjunto y cada muro tiene que absorber el sismo de manera unánime. Existen muchas fallas por agrietamiento, pero en el caso de Oaxaca, la problemática a una vivienda de un solo piso puede ser desde la mezcla del tapial, los tipos de encofrados y el sistema que se usa de forma tradicional, por lo que intervenir con un modelo distinto adecuado a las necesidades sería más funcional para ese tipo de regiones en México.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

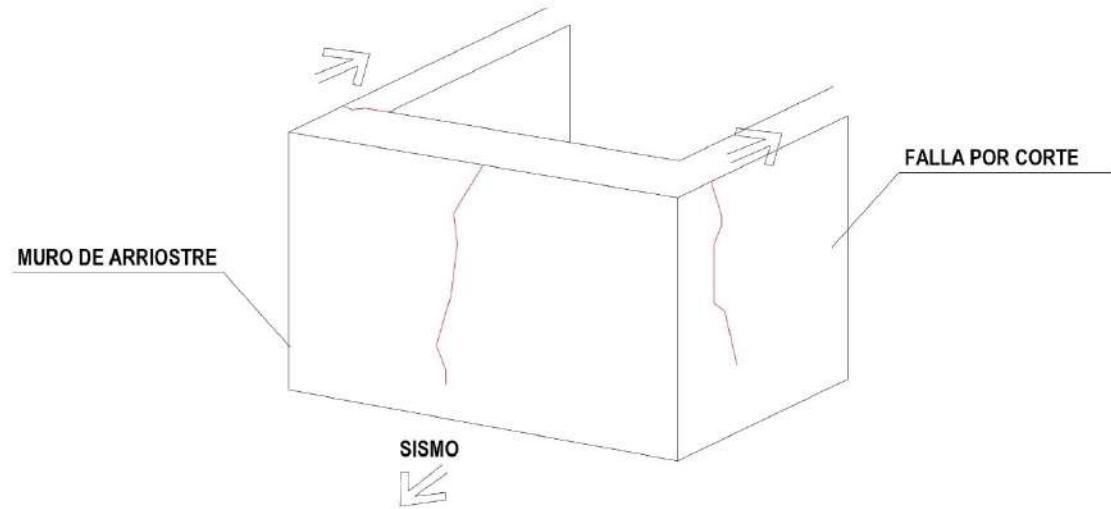


Figura 2. Grietas presentes en muros de adobe (2016).

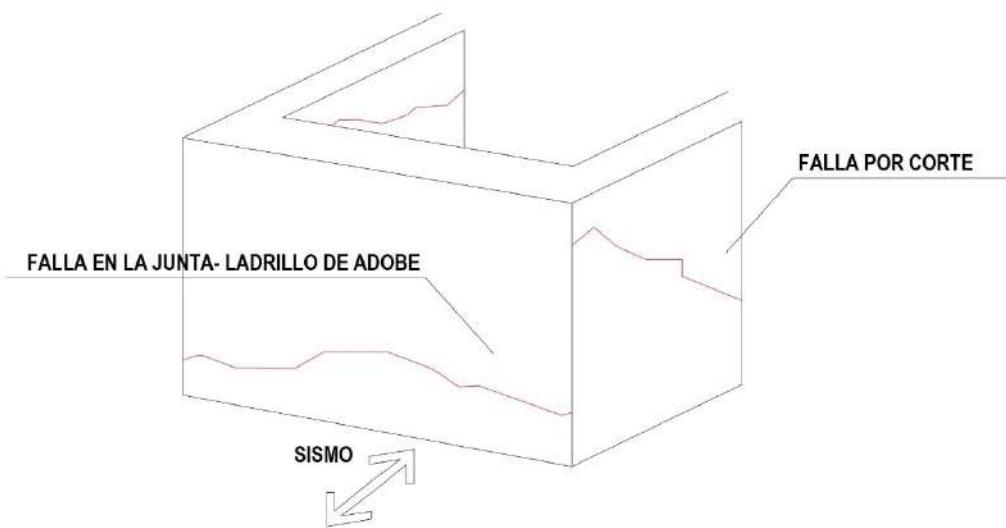


Figura 3. Deformación muro de tapial a causa de sismica transversal (2016).

1.2 JUSTIFICACIÓN

En las zonas de alta sismicidad las fallas por grieta en construcciones con tapial se pueden reparar más fácilmente que una vivienda de mampostería, para poder aumentar la disponibilidad de este material, se debe modernizar. Es necesario la disminución de fallas agrietadas a futuro en las edificaciones con tapial. El desempeño sísmico ha sido una preocupación particular para estas construcciones no reforzadas debido a su comportamiento estructural deficiente durante terremotos pasados (C. Juan, et al., 2023).



Figura 4. Mapa de México, sismicidad semanal (SSN, 2024).

Estudiando el Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México editado por el CENAPRED, los sucesos geológicos en los que intervienen la dinámica y los materiales del interior de la Tierra o de la superficie de ésta. El Municipio de Oaxaca de Juárez, está ubicado dentro de la región de los Valles Centrales y muy cerca de la Sierra Norte, en su morfología varía de aproximadamente plana a muy abrupta. En las dos regiones existe evidencias de actividad tectónica activa, lo que presenta en rasgos morfológicos muy jóvenes que presentan pendientes muy destacadas, altas tasas de erosión e inconsistencia de suelos y sedimentos.

En la zona se manifiesta un sistema de 12 fallas laterales y normales. Las fallas laterales pueden ser de dos tipos, con desplazamientos siniestrales o de izquierda o con desplazamientos dextrales o de derecha. Dentro del primer tipo se encuentran la San Felipe y las Microondas 1, Microondas 3 y Microondas 4, y del tipo dextral están San Felipe del Agua y Monte Albán.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

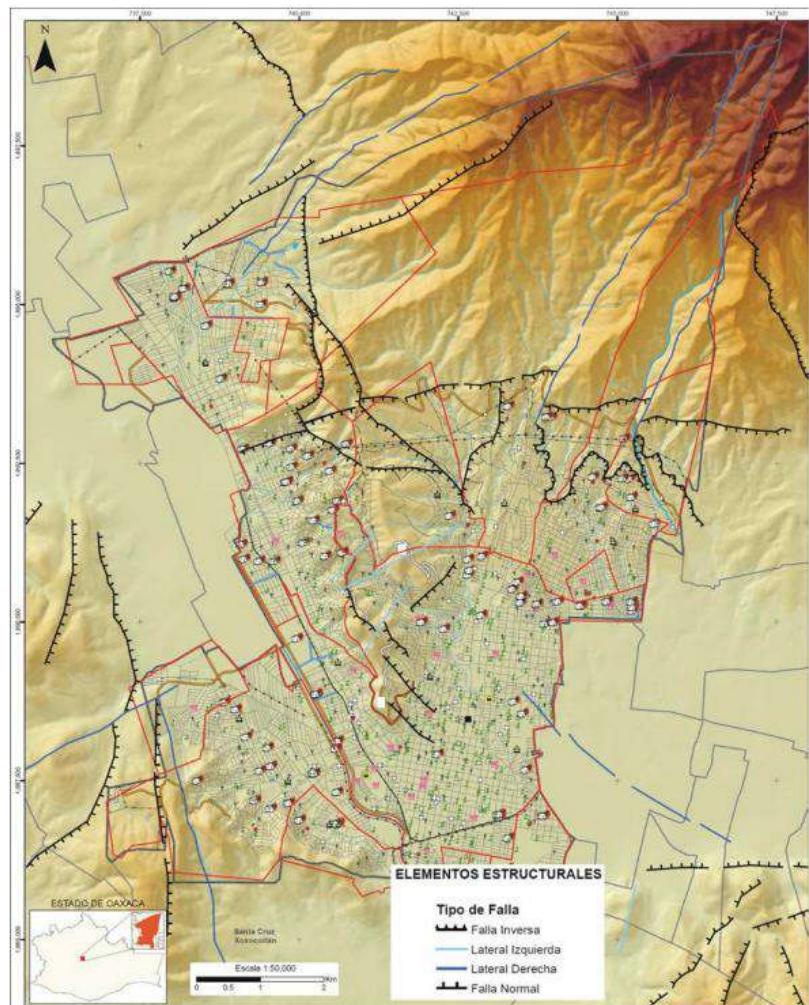


Figura 5. Tipos de fallas de Oaxaca Juárez (Atlas de riesgos, 2014).

El tapial puede ser un material o construcción sostenible, en los últimos años el ecodiseño y el establecimiento de estrategias sustentables se volvieron parte del proceso de desarrollo de los nuevos planes como una variable indispensable para la construcción. Una característica principal en las edificaciones hechas de tapias; si es considerado realizar su demolición, la totalidad de los materiales usados puede ser reutilizados al tratarse de suelo limpio, por lo cual este procedimiento hoy en día es considerado como un representante de la arquitectura sustentable gracias a su bajo impacto ambiental (R. Mauricio, 2015).

El presupuesto de una edificación con este proceso constructivo está enlazado a la zona o región donde se ejecuta, donde es un sistema con ciertas ventajas cuando los materiales son recolectados de los alrededores de la ubicación. La tierra que se usa es de la misma región. En esas circunstancias es más económico que la construcción de adobe ya que no se necesita un doble procedimiento (D. Torrealva, et al., 2016).

Una vez que se haya comprobado la resistencia de los bloques mejora la resistencia de construcciones de bloques hechos de tapial, estos se podrán utilizar en las construcciones de viviendas en Oaxaca de Juárez, obteniendo mejores resultados que con los procesos constructivos existentes de la región.

Es importante disminuir las repercusiones que ocasiona un procedimiento constructivo no adaptable a su entorno, evitando así el gasto económico en restauraciones y remodelaciones.

II. ANTECEDENTES

Actualmente las estructuras de tierra apisonada estabilizadas que se construyen hoy en día en América del Norte se basan en los métodos tradicionales de tierra apisonada, pero poseen diferencias significativas y fundamentales. Estas diferencias incluyen: (1) Un componente de arcilla reducido en la mezcla del suelo; (2) Estabilización de la mezcla de tierra apisonada con cemento portland, escoria de alto horno y/u otras puzolanas; (3) La incorporación de aislamiento intersticial para mejorar el desempeño térmico; (4) La adición de refuerzo de acero; (5) La aplicación de los principios del código de mampostería y concreto por parte de los ingenieros estructurales en el diseño de las estructuras; y (6) La mecanización de la mezcla, entrega y apisonamiento de la mezcla de suelo (Arno, 2013).

El tapial ha experimentado un creciente interés en distintos tipos de edificaciones. En América del Norte, esto está siendo impulsado por lo siguiente:

- 1) Una tendencia creciente hacia la selección en materiales de construcción que sean sustentables;
- 2) La creciente adopción de programas de certificación verde que reconocen los beneficios de la tierra apisonada estabilizada;

3) La conciencia de que la tierra apisonada estabilizada tiene un ciclo de vida sustancialmente más a largo que los materiales de construcción más convencionales (Rocha, 2012).

Cada proyecto utiliza una mezcla de tierra local del sitio de construcción. El material terrestre no se extrae de la capa superficial del suelo, sino del material que se encuentra debajo de la capa orgánicamente activa (Arno, 2013).

La construcción con tapial fue muy utilizada en Portugal durante el periodo de dominación islámica (entre los siglos VII y XIII), tanto para levantar construcciones militares como civiles. Las construcciones militares están constituidas principalmente por fortalezas, que se construyeron por primera vez entre los siglos VII y IX. Actualmente, los castillos de Silves y de Paderne, con más de 800 años de antigüedad, son ejemplos vivos de este tipo de fortalezas. El tapial militar es en general más resistente y duradero que el tapial civil, ya que en general se utilizaba suelo estabilizado mediante la adición de cal y puzolanas naturales en el primer caso (M, 2012).

La tierra cruda es uno de los materiales de construcción antiguos más utilizados y tiene una herencia cultural que se remonta a más de 10.000 años. La práctica de este tipo de construcción de viviendas con tierra está más extendida en el subcontinente asiático, es decir, India, Bangladesh, Pakistán, China, Afganistán, incluidas muchas otras partes del mundo, es decir, el sur de Europa, América, Oriente Medio, Australia y algunas partes de África. Se estima que alrededor de un tercio de los habitantes del mundo residen actualmente en edificios de la tierra (Sena & Rajib, 2022).

Recientemente, se han desarrollado materiales de tierra apisonada (RE) utilizando estabilizadores alternativos al cemento para reducir el impacto ambiental de la industria de la construcción. Estos estabilizadores alternativos se desarrollaron a base de materiales activados con álcalis, incorporando materiales precursores de aluminosilicatos y, en algunos casos, un activador químico. Los materiales de ER alterativos se han mostrado prometedores como sustitutos de las ER estabilizadas con cemento (la variedad de ER moderna más común) y de los materiales comunes de construcción residencial (ladrillo encapado y ladrillo hueco). Sin embargo, en cuanto a los hormigones geo polímeros y los aglutinantes activados por álcalis, para ampliar la gama de aplicaciones estructurales de estos materiales RE recientemente desarrollados, es necesario comprender mejor sus propiedades mecánicas y su comportamiento cuando se refuerzan (H. Alexandra., et al., 2021).

Hoy en día, el uso de fibras vegetales para reforzar el tapial no es fácil de encontrar en la literatura. De hecho, el material más utilizado para estabilizar el tapial es el cemento (Ciancio, 2012) o lima en algunos casos raros. Aunque el método de construcción no es el mismo, los resultados de estos estudios tienden a confirmar los resumidos anteriormente sobre los bloques de tierra comprimida estabilizados con cemento o cal. En algunos papeles, las fibras vegetales se utilizan en forma de "tejido" para reforzar materiales terrestres (Fagone, 2017). La "tela de yute" aplicada con un revoque de tierra estabilizada se utiliza en estos dos estudios para actuar como refuerzo de estructuras de tierra. Los resultados muestran que estos sistemas de fortalecimiento "fue capaz de aumentar la capacidad de carga y ductilidad de las estructuras, preservando su integridad para niveles de carga más altos y, en consecuencia, posponiendo la falla sin agregar masa significativa al sistema" (A. Koutous, 2021).

En las investigaciones se pueden encontrar resultados muy favorables, además algunos que cumplen con su alcance, mientras que en otros sus resultados no son tan notorios. Como se mencionó anteriormente, los muros de tierra apisonada estabilizada con cemento (CSRE) son el refuerzo más común, R. Lepakshi mezcló 16% de arcilla con una cantidad conocida de cemento (7% y 10% en masa) descubriendo así, que la resistencia de la unión de las barras de refuerzo en la matriz CSRE estaba muy influenciada por la densidad seca del CSRE y el tipo de refuerzo. La fuerza de unión de las barras deformadas es mayor que la de las barras simples, independientemente de la densidad de la muestra.

Por otro lado, la estabilización con cemento también se ha aplicado junto con fibras naturales, en el caso que muestra Satya (Satya Sai Profundo Raavi, 2023). El análisis XRD reveló la presencia de cuarzo, calcita, albita y pequeñas cantidades de otros minerales; por otro lado, la estabilización con cemento aumentó los picos de calcita. La estabilización con cemento reduce la porosidad de la estructura del material, mejorando así las propiedades de resistencia y durabilidad. El refuerzo de fibra de coco mezclado con el estabilizante del cemento aumenta la eficiencia de las muestras de tierra apisonada. Por otro lado, la adición de Plasticure se reduce en gran medida la pérdida de masa por inmersión y cepillado para muestras de RE estabilizadas con cemento. Sin embargo, Plasticure no afectó significativamente la pérdida de masa para RE activados con álcali, cal o auto activados (Alexandra H. Meeka, 2021).

En la figura 6 se muestra una red bibliométrica con los métodos y materiales utilizados en el estudio

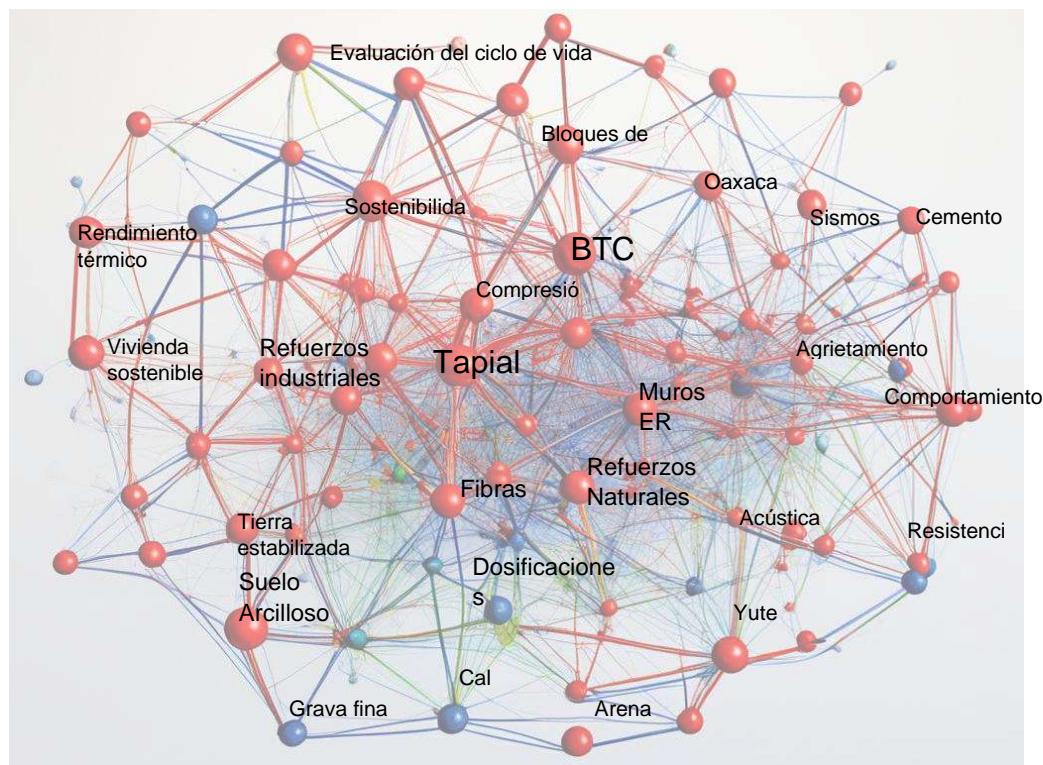


Figura 6. Red bibliométrica (A. Reyes, 2024).

Cuando se usa cal como estabilizador se favorece el método, el límite de contracción contiene un aumento interesante en la primera hora de la interacción y sigue aumentando con el tiempo, pero esta interacción es problemática; este valor es importante ya que presenta la humedad a la que el suelo ya no presenta variaciones volumétricas, por lo que su interacción representa un comportamiento más óptimo (Escamilla, 2013). Pero, por otra cuestión, no en todos los ámbitos es favorable. La dosificación cal- zeolita del espécimen CZ (% cal y 6% zeolita), (Hernández F. , 2023).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

En las figuras 7 y 8 se muestra el contenido de humedad de los suelos y la resistencia a la flexión de muestras seleccionadas en este estudio, como comparativa de información y resultados, (los números indican los referentes enumerados en las tablas de la 1 a la 4).

En la tabla 1 se detallan las propiedades de los materiales usados en los métodos constructivos que se recabaron de referentes en la investigación. En las tablas 2,3 y 4 se muestran los comentarios e importancia de antecedentes investigados en la UAQ y Google Patens.

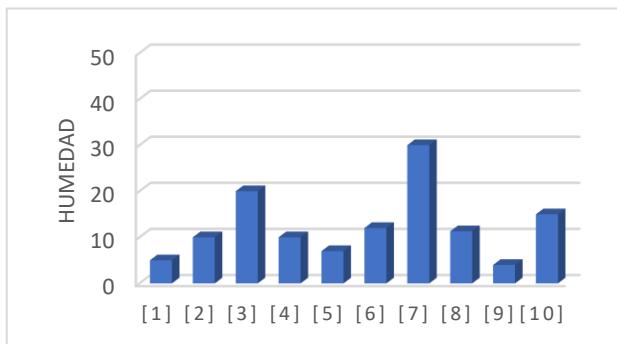


Figura 8. Contenido de humedad de los suelos (A. Reyes, 2024).

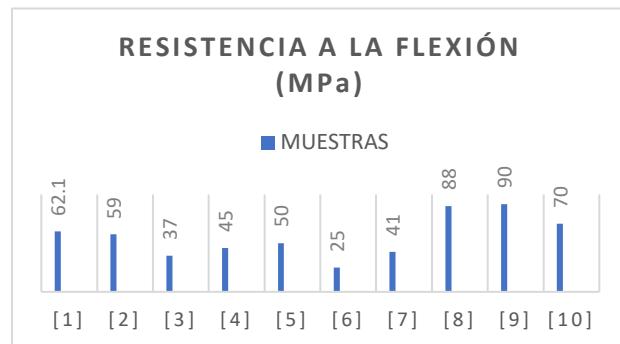


Figura 7. Resistencia a la flexión de las muestras seleccionadas (A. Reyes, 2024)

En las figuras 9 y 10 se muestra una comparativa de los estudios que usan refuerzos de fibra natural, cemento, acero y polímeros, así como el porcentaje de los que usan en su método Arcilla y Arcilla + Limo.

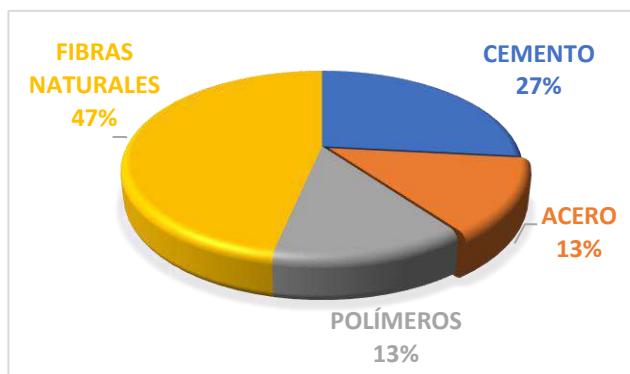


Figura 9. Comparativa de refuerzos (A. Reyes, 2024)

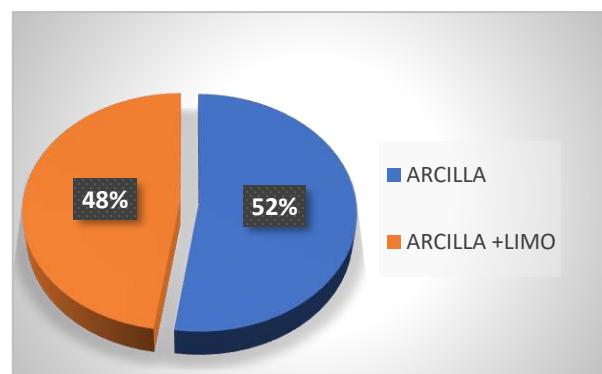


Figura 10. Comparativa de suelo (A. Reyes, 2024)

En la tabla 1 se detallan las propiedades de los materiales usados en los métodos constructivos que se recabaron de referentes en la investigación. En las tablas 2,3 y 4 se muestran los comentarios e importancia de antecedentes investigados en la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y Google Patens.

Tabla 1. Propiedades de antecedentes

Autor	Estudio	Método y dosificaciones	Resultados
1) Prime, N. (2022)	Impacto del contenido de humedad en el comportamiento elastovistoplástico de un muro de tierra apisonada: nuevos hallazgos	Arcilla 10 % Delimo 12 % Arena 33% Grava 45%	El contenido de agua disminuyó de un contenido de agua de fabricación de aproximadamente el 10 % al 4.5 % en ocho semanas.
2) Fagone, M. L. (2017)	Evaluación de resistencia de tejido de yute para el refuerzo de estructuras de tierra apisonada	Celulosa 61% Hemicelulosa 24% Lignia 15%	Los resultados obtenidos son 20 hilos de yute de refuerzo.
3) Bertrand Francois, e. a. (2017)	Comportamiento estructural de construcciones de tierra apisonada no estabilizadas sometidas a condiciones higroscópicas	Arcilla 16% Limo 61% Arena 26%	Disminuye en todas partes y vuelve a un valor significativamente menor que el indicado a una respuesta elástica sin ninguna zona de falla en la estructura.
4) Guettala, A. A. (2012)	Estudio de durabilidad del Hormigón de tierra estabilizada bajo exposición a condiciones climáticas y de laboratorio	Arena 64 % Limo 18 % Arcilla 18 %	Por el tipo de suelo (arcilloso y arenoso) utilizado para este trabajo; Se recomienda fabricar ladrillos estabilizados con cemento (5 %) utilizando una tensión de compactación del orden de 10 MPa.
5) Daniela, C. (2012)	Investigación experimental sobre la resistencia a la compresión de tierra apisonada estabilizadas con cemento y moldeadas	Grava 32 % Arena 66 % Arcilla + Limo 2 %	Disminuye en todas partes y vuelve a un valor significativamente menor que el que indica una respuesta elástica sin ninguna zona de falla en la estructura.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

6) Jayasinghe C., K. N. (2012)	Características de resistencia a la compresión de muros de tierra apisonada estabilizados con cemento	Grava 26-50 % Arena 46-70 % Limo + Arcilla 4 %	Es posible utilizar tierra apisonada estabilizada con cemento como material depred con confianza para casas de una sola planta que utilicen suelo de laterita generalmente disponible en condiciones climáticas tropicales.
7) Ruiz, J. C. (2023).	Rendimiento sísmico de un modelo de tierra apisonada de dos pisos a escala 1:4 reforzado con placas de acero probado en una mesa vibratoria biaxial	Grava 32.2 % Arena 59.4 % Arcilla + Limo 8.4 %	El sistema de refuerzo de placas de acero reduce el agrietamiento y la posibilidad de dislocación de los bloques de tierra que conforman los muros del RE.
8) Sima Samadianfa rd & V. (2023)	Efecto de estabilización sobre el comportamiento higrotérmico de materiales de tierra apisonada	Cemento 5-15 % Arcilla 3 % Arena 74 % Grava 24 %	El mejor rendimiento con un error estándar no significativo de menos de 6×10 menos 3 y un coeficiente de determinación superior a 0.94.
9) Ghorbania. (2023)	Imágenes del contenido de agua durante el ascenso capilar dentro de una estructura de tierra apisonada	Arcilla 10 % Limo 11 % Arena 33 % Gravas 46 %	La tomografía de polarización inducida por lapso de tiempo sobre una sección transversal de la pared se utiliza con éxito para obtener imágenes de la evolución del contenido de agua en la pared.
10) Lorenzo Miccoli, U. M. (2017)	Muros de tierra apisonada reforzados con tiras de tejido de poliéster: análisis experimental bajo carga cíclica en el plano	En el proceso de fabricación, se utiliza tierra con un contenido de humedad en el rango de 9 a 10 % en masa y tiras de tejidos de poliéster	Los hallazgos confirmaron que el refuerzo contribuye a limitar la propagación de las grietas diagonales y proporciona un aumento de la resistencia en términos de carga horizontal y capacidad de desplazamiento.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

11) Satya Sai Profundo Raavi, & D.	Comportamiento compresivo cortante de carteras de tierra apisonada estabilizadas con cemento y reforzadas con fibra de coco, tablillas de bambú y barras de acero	Arena 68.05 % Limo 21.83% Refuerzo: cemento, bambú, acero, y fibra de coco 10.12%	Los resultados experimentales revelan que la adición de fibra de coco mejoró la resistencia a la compresión de las muestras en aproximadamente un 17.93%.
12) Arno, T. B. (2013)	Un informe sobre la construcción e investigación contemporánea con tierra apisonada en América del Norte	Grava 45 % Arena 40 % Limo 5 % Arcilla 10 %	La variación resultante del 2 % en la resistencia es insignificante y respalda el uso de cilindros fundidos como método para determinar el fuego del material colocado.
13) A. Koutous, E. H. (2021)	Reforzamiento de tierra apisonada con fibras vegetales: un estudio de caso	Cemento Portland Cal Fibra de paja de cebada Fibra de palmera datilera	Los resultados obtenidos muestran que fibras vegetales (paja de cebada o fibras de palmera datilera) pueden aportar mejoras en las resistencias del tapial como las que pueden aportar el cemento o la cal, especialmente en la resistencia a la atracción.
14) Ernest Bernat Masó, C. E. (2016)	Tierra apisonada reforzada con textiles; caracterización de la resistencia a la flexión y la densidad	Arcilla 45 % Arena 15 % Refuerzo: Fibra de vidrio, fibra de carbón acero y fibra de basalto 40%	La solución óptima para reforzar elementos de tierra apisonada es una rejilla de fibra flexible que tenga un gran espaciamiento entre cables de fibra.
15) Zhou, T. (2019)	Estudio experimental sobre las pruebas de mesa vibratoria de una estructura moderna de tierra apisonada reforzada interiormente	Arcilla 12 % Grava de 30% -70 % Vigas de acero	Los resultados muestran una mejor coordinación entre estas medidas estructurales y los muros RE durante todo el proceso de carga.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

16) Ramírez, R. (2022)	Contracción temprana y adherencia del refuerzo LC-TRM en tierra apisonada.	Arcilla 14 % Limo 16 % Arena 32% Grava menor 37 %.	El mortero a base de cemento (CHM) presentó una contracción temprana muy reducida.
17) Alexandra H. Meeka, M. E. (2021)	Materiales alternativos de tierra apisonada estabilizada que incorporan residuos reciclados y su producida de propiedades mecánicas, flexión, resistencia y unión	Barras de acero Polímeroreforzado con fibra de vidrio Piedra caliza triturada Cal Cemento	Los resultados mostraron que los procedimientos deprueba existentes especificados.
18) Sena, B., & Rajib, S. (2022)	Investigación experimental y numérica de las características de resistencia mecánica de muros de tierra apisonada rehabilitados con fibras naturales	Fibra de coco Yute Bambú Fibras tratadas con betún	El incremento porcentual (máximo) en la resistencia al corte se encuentra en el orden de 36.92 %, 44.61%, 104.61 % y 124.61 %.
19) Bourky, A. (2023).	Una revisión sobre el uso de fibras de palma datilera para reforzar materiales de construcción a base de tierra	Arcilla 45 % Arena 15 % Refuerzo: fibra de vidrio, fibra decarbón, acero y fibra de basalto 30%	La resistencia a la tracción y la ductilidad mejoran al aumentar el contenido de fibra de palma datilera.
20) Ajabi, A. (2021)	Una nueva tierra apisonada estabilizada que utiliza cenizas volantes de fábricas de celulosa como material cementante alternativo con bajas emisiones de carbono	Finos 1% Arena 27 % Arena media 26.7 Arena gruesa 14.1 % Grava 6.2 % PFA 5 % Cemento 5 % Bentonita 15%	Las propiedades fisicoquímicas y toxicológicas del PFA favorecen su aplicación sostenible como conglomerante cementoso en la construcción.

Tabla 2. Artículos de la UAQ

Año	Título	Comentario	Importancia
2.1) Olvera, N., Arellano, D., & al., D. R. (2020)	Bloques de Tierra Comprimida sin adición de cemento utilizando el suelo de un predio ubicado en el Márquez de Querétaro	El tipo de curado junto con la abstinenza de cemento en el método constructivo no es funcional, en las conclusiones se describe que no se puede construir sin cemento.	Es importante analizar que podría ser funcional desde el principio, se considera que la tesis quería innovar algo que no parece factible, ayuda a ver opciones que se pueden descartar para una nueva investigación.
2.2) Escamilla, T. D. (2013)	Análisis del tiempo óptimo de reacción en la estabilización de suelo arcilloso tratado con cal	Es completo el estado del arte, la información cumple con el objetivo de una investigación del suelo arcilloso.	Analizar cómo se comporta el suelo arcilloso tratado con cal es de aporte a mi estado del arte, el origen de los suelos arcillosos, su composición, la clasificación y sus variaciones.
2.3) Hurtado, D. R. (2014).	Mejoramiento de suelos expansivos mediante inclusiones de fibras	Podría modificarse con que tiempos de arcillas hacer la inclusión de fibras, se pueden experimentar con muchos tipos de suelos expansivos, no solo los que se mencionan en el estudio.	Los suelos arcillosos son expansivos, hacer un mejoramiento como refuerzo en su modalidad es destacable para investigaciones que analizan el material, se comprobó que las fibras mejoraron el comportamiento mecánico del compuesto obteniendo mejoras de hasta 85 %.
2.4) Hernández, A. (2023).	Comportamiento mecánico de un suelo arcilloso estabilizado con puzolanas y cal como material para capa sub base	Como mejora a una posible Una investigación se podría analizar ese tipo de agregado de zeolita también estabilizada de arcilla de forma vertical, ya que los resultados en este estudio cumplen con que es factible para su uso encaminos con un TPDA de 1500 vehículos como máximo.	Indagar en como múltiples investigaciones han ocupado la arcilla de distintas maneras ayuda a encontrarlos reforzamientos adecuados para estabilizar el material.

Tabla 3. Artículos de Scopus

Año	Título	Comentario	Importancia
3.1) Ávila Fernando, P. E. (2022)	Caracterización de las propiedades mecánicas y físicas de la tierra apisonada estabilizada: una revisión	Se puede reforzar más el resumen, generaliza mucho lo que es el material de la tierra apisonada, no se logra destacar que es lo que se diferencia de otras técnicas existentes de este mismo proceso constructivo.	Destacan bien las dosificaciones de un muro de tapial, materiales más assertivos actuales, más novedosos.
3.2) Narloch, A. H. (2019)	Diseño de la composición de tierra apisonada estabilizada con cemento usando redes neuronales artificiales	Es común la estabilización con cemento (CSRE). Sería assertivo analizar en qué tipos de suelos se pueden construir muros de tierra usando redes neuronales, y en qué tipos de suelos no es apto.	Es importante saber los métodos externos que se pueden ocupar como reforzamientos de muros de tierra apisonada, la existencia de un algoritmo de redes neuronales como alternativa de reforzamiento es algo nuevo.
3.3) Daniela, C. (2012)	Investigación experimental sobre la resistencia a la compresión de muestras de tierra apisonada estabilizada con cemento y moldeadas	Cuando las muestras que se analizan son en cilindros, son una pequeña porción de lo que es un muro.	Será muy útil analizar el porcentaje que usan de cemento como estabilizador, que tanto beneficia a la tierra compactada, es una alternativa que se ocuparía en el presente método, pero con otras dosificaciones.
3.4) Daniela, J. P. (2013)	Avances en la evaluación de la idoneidad del suelo para tapial	Dentro de las pruebas se podría mejorar la prueba de agrietamiento, con simulaciones de muros en mesas vibratorias.	Presenta la granulometría de los suelos que usaron, se puede comparar la idoneidad de los materiales que se usan para este método constructivo.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

3.5) Ruíz, J. C. (2023)	Rendimiento sísmico de un modelo de tierra apisonada de dos pisos a escala 1:4 reforzado con placas de acero probado en una mesa vibratoria biaxial	Mostrarlos cálculos de las fallas estructurales, se explica correctamente como se generan, falta la recopilación de fórmulas en los procedimientos.	Se centra en la falla estructural de muros de ER en el estado de Oaxaca, usar acero como refuerzo podría ser un buen referente para la investigación.
3.6) Grant, S. K. (2023)	Mejora de las propiedades mecánicas de la construcción con tierra apisonada estabilizada con polímeros	Es difícil entender los polímeros con los que trabajan si no muestran imágenes de como son los líquidos.	Una estabilización de tierra comprimida con polímeros líquidos, puede sustituir el porcentaje de cemento o de la cal.
3.7) Sorín, C. (2023)	Características termofísicas de la arcilla para la construcción eficiente de muros de tierra apisonada	Se trabaja las mismas dosificaciones de limo, agua, arena y grava para las 12 arcillas, estaría interesante analizar distintos porcentajes para cada arcilla, quizás sean mejores resultados, por ser distintos suelos.	Analizar un método que es muy utilizado, para poder intervenir y hacerle mejoras, adaptarlo a los materiales que quiere ocupar de Oaxaca.
3.8) Prime, N. (2022)	Impacto del contenido de humedad en el comportamiento elastovistoplástico de un muro de tierra apisonada: nuevos hallazgos	Es interesante ver que en este artículo analizan los comportamientos mecánicos por varias semanas, arrojando resultados semanalmente, se podría complementar con las fallas estructurales en un muro de encofrado, ya que son más propensos a tener grietas que los muros por bloques.	Las pruebas con muros completos apisonados con encoframientos son más permisibles mostrar fallas estructurales, se está decidiendo como serán las magnitudes de las pruebas, por lo que indagar en este análisis ayuda a ver qué tan factible son este tipo de pruebas.

Tabla 4. Artículos de Google Patentes

4.1) Ángel, L. M. (2013).	Edificio modular mixto de entramado de madera y tapial	Asumen que los costos en una edificación de dos pisos de ER reducen en su costo un 40 % respecto a los de una construcción convencional.	El estudio es un manual para un constructor que quiere trabajar una casa con muros de RE, para la presente investigación sirve de referencia dentro del ámbito constructivo, no de la experimentación o clasificación.
4.2) Carmen Galán Marín, C. R. (2012)	Procedimiento para la estabilización de suelos arcillosos con polímeros orgánicos naturales y armados con fibras animales	No se especifica qué tipo de lana animal es la que ocupan como fibra, lo generalizan mucho. La redacción del proceso del material es ambigua.	La tierra apisonada moderna (tapial) despierta mucho interés en todo el mundo como un material de construcción y altamente sostenible, es conveniente tener referentes de España.
4.3) David, C. (2016)	Cajón de madera para ejecución de muros llenos de tierra cruda apisonada	Como mejora estaría interesante agregar para qué tipo dedosificaciones es adecuado el cajón que lo hace diferente de los otros tipos de encofrados.	Cuando se analicen muestras de arcillas, se ocupa realizar muestras que sean más realistas, en este caso de bloques. Este cajón se convierte en una alternativa para comprobar varias densidades y cumplimientos de ER.
4.4) Bernat., E. G. (2017)	Tapia de tierra reforzada y método de fabricación de la misma	Se considera que siempre se debe incluir en qué tipo de zonas se puede aplicar el sistema constructivo que se describe, el tapial no se puede construir en zonas de alto riesgo sísmico, todo lo contrario, con reforzamientos.	Los tipos de refuerzos presentes en la investigación, distintas formas de poder mejorar el tapial, el cómo lo hacen en otros países ayuda a analizar qué fibras naturales se pueden utilizar en México.
4.5) Gianfranco, C. (2013)	Bloque plegable de formación con tapias para la construcción de muros	No se especifica para qué dosificaciones del tapial funcionaría este bloque, no se especifica, será factible o no.	Es bueno descartar los cajones o bloques que no aportan al estudio presente, recolectar información de lo que se limita a las posibilidades.

III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 ORIGEN DE LOS TAPIALES

Origen de la palabra tapial

Según Corominas, la palabra tapia es prerromana, exclusiva de las lenguas ibéricas y el occitano. Sostiene que es voz de origen onomatopéyico: "tap" hace que el ruido que se hacía al compactar la tierra en la antigüedad, tapial es el encofrado de madera y tapia es el muro de tierra compactada.

Se llama tapial en España y Cuenca Mediterránea, o tapia en Hispanoamérica, al muro que se hace con tierra apisonada, mediante una antigua técnica que consiste apisonar tierra cruda de forma vertical compactada a golpes mediante un "pisón", el cual puede ser de madera o metal.

El encofrado casi siempre es de madera, el cual también puede ser de metal. En el proceso se colocan las maderas a los laterales, en las cuales se coloca tierra cruda de 10 o 15 cm las capas, y se apisona con el pisón. Después se mueve el encofrado a otro lado para seguir con el mismo procedimiento. El barro apisonado se seca al sol y una vez que el tapial queda levantado las puertas y ventanas se abren a cincel, (Corominas, 1940)

El origen del lugar exacto en que se comienza a utilizar el tapial o tierra pisada son desconocidos, la época es más segura que ocurrió en el Neolítico como se evidencia en los lugares de arqueología de Yangshao y de la Longshan del valle del río Amarillo hace unos 5000 años. Hace 2000 años el método constructivo del tapial se usó común en China, algo que se llegó a notar o como evidencia la construcción de murallas pues gran parte de la muralla está hecha de este material.

España

La metodología constructiva ibérica del tapial aumentó la atención de los antiguos. Plinio dice que, en Hispania, como en el continente africano, se realizaban muros de tierra que se moldeaban entre madera. Se llaman parientes de formatos (muros de molde) y se afirma que en caso exagerado, que se mantuvieron durante siglos, sin ser afectados por la lluvia, el viento y el fuego y que eran más fuertes que procesos de cemento.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Algo destacable de la historia de la cultura hispana se encuentra la Alhambra de Granada, esta es construida con tierra de la zona, concretamente material sedimentario de coluvión. Estas murallas están construidas con tapial. La muralla de Sevilla es un monumento que destaca en el método, los restos actuales están hechos por una muralla de tierra con un ancho de 1,90 metros, el de la barbacana de 1,45 metros y las dos se encuentran a distancia de separación de unos 3 metros.



Figura 11. Muralla de Sevilla (2015).

Un monumento que también destaca en tapial se encuentra en la zona aragonesa de Daroca, aquí las viviendas tienen destalles de estos materiales en sus fachadas y adobe o ladrillo; además, en la cima de la muralla se puede visitar el castillo y otras torres, así como la muralla que hace circunferencia a todo el municipio, construidos con esta técnica antigua, solo que su conservación no ha sido restaurada.



Figura 12. Muralla de Daroca, Zaragoza (2007).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

En España se usó en especial en las actuales comunidades de Comunidad de Madrid, Castilla-La Mancha, de Castilla y León, Aragón, Cataluña, Comunidad Valenciana y algunas regiones de Extremadura y Andalucía. Las personas del municipio del norte de África, cuando hicieron uso parte de la península ibérica realizaron construcciones con esta técnica, monumentos que siguen destacando en la arquitectura.

América

La técnica es un poco distinta en todos los países, en América también es antigua, cuando los europeos llegaron se hizo presente y especialmente difundido en zonas secas tal cual se observa en el yacimiento de Palo Blanco en la provincia de Argentina de Catamarca el yacimiento tiene aproximadamente 2000 años de antigüedad. El popularismo de las construcciones con tapiales se da después de la conquista de los españoles.

Cultura jesuítica en Sudamérica

Es común ver la arquitectura de las disminuciones jesuíticas por la imagen que presentan las ruinas de San Ignacio Miní, San Miguel, Jesús o Trinidad, en las actuales provincias de Misiones, Argentina o los departamentos del sureste del Paraguay. Entonces, cuando se piensa en una disminución, se puede imaginar un pueblo construido como cosas o piedras. Los ejemplos son la excepción a la regla, hechos en piedra arenisca, ya que la mayoría eran construcciones en tierra. La piedra constituye el punto culminante de una evolución edilicia que no todas las reducciones alcanzaron.

En el año 1714 se hace una recomendación que las edificaciones debían levantar sus cimientos de piedra a un alto de una vara (86,6 cm) por encima del nivel de suelo natural, para seguir con el procedimiento.

En el siglo XVII, y en muchos pueblos aún durante el siglo XVIII, las edificaciones se hacían de adobe, y de tapia francés.

El adobe era un material crudo;

La tapia era en ese entonces un muro compuesto por tierra seleccionada y compactada mediante un sistema de encofrado al cual denominaban tapial;

La tapia francesa consistía en un muro compuesto por una mezcla de ramas y arcilla.

Los municipios poblados del siglo XVII se construían con estos métodos, por lo que en la actualidad estos no presentan mucha altura.

3.2 TIPOS DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DEL TAPIAL

3.2.1 MÉTODO CONSTRUCTIVO TRADICIONAL

Se mantiene como una obra de construcción de tierra con cierta cantidad de cantes rodados, con humedad y secado natural, comprimida en el interior de un encofrado (alrededor de 3 m de largo por 0,90 m de alto, dimensiones que varían según los países), se apoya de un apisonador; cuando la mezcla de tierra se empieza a amasar. El muro se levanta en capas que se denominan como tongadas, sucesivas de 90 cm de altura (BARDOU, 1979) o como cantidades de obra de fábricas ejecutadas con suelo arcilloso, barro o paja, que consolidan por medios manuales o mecánicos (Díaz Romeral et al., 1980).

El sistema consiste, según el Manual de Villanueva (1827), “en colocar dos duelas de madera de forma vertical y paralelo, separadas por el ancho que se quiere obtener del muro y sujetos a uno y otro por travesaños, objetos verticales de madera horizontales que se denominan agujas o cárceles, que sirven de molde, y entre ellos se van rellenando con piedra-grava a veces con piedra de río de mayor o menor tamaño y mortero de cal, echado por tongadas o capas bien apisonadas”. Cuando se fragua el mortero, la fábrica del muro se endurece y los tableros pueden trasladarse a ambos lados para continuar la tapia en longitud o sobre la ya levantada. La argamasa varía mucho, pues se puede emplear en ella desde muy pequeña gravilla de río, como acostumbraban los romanos, hasta piedras de bastante magnitud, como se encuentra en muros de construcciones hispanomusulmanas (Torres Balbás, 1985).

3.2.1.1 CIMENTACIÓN

El proceso de cimentación puede ser en general, de tres tipos bastante notables, cuyo uso dependerá de las condiciones del terreno y de la presencia de agua.

Cimiento de Pirca: Piedras grandes, de preferencia de forma eucladiana asentadas con barro, demostrando detalles en figura 13 (Haiku Deck, 2007).

Cimiento de Concreto ciclópeo: Pueden ser piedras muy grandes con concreto simple. Cimiento de Albañilería de Piedra: con mortero de cemento o cal y arena gruesa. Las medidas mínimas de ancho y profundidad de los cimientos deben ser de 60 cm.

Sobrecimientos

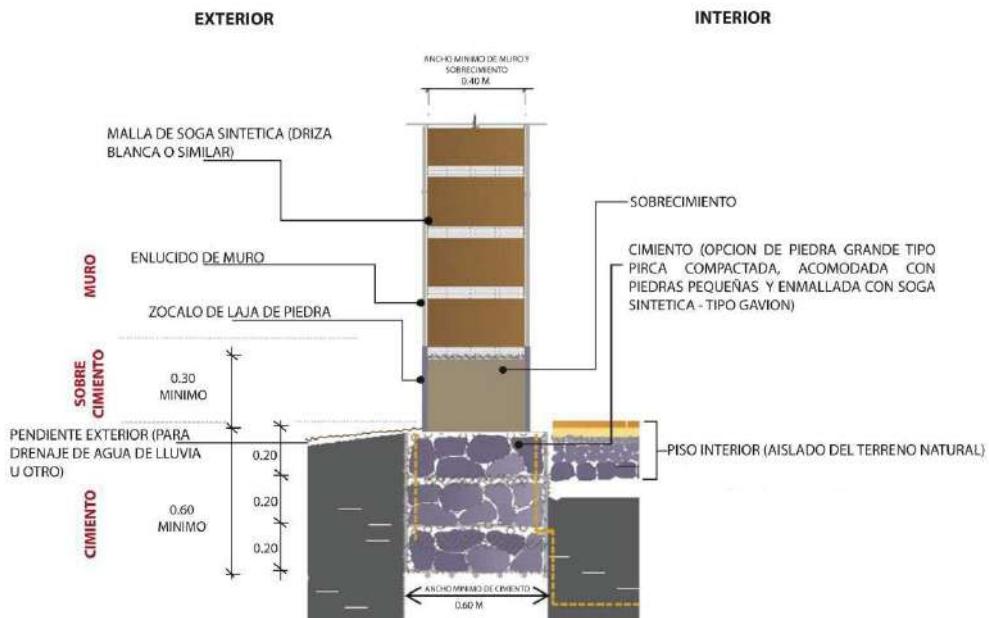


Figura 13. Detalle de la cimentación con sus partes. Norma E-080, MVCS (2013).

Los sobrecimientos son de dos tipos:

Sobre cimiento de Concreto Ciclópeo: Piedras grandes con concreto simple. Sobre cimiento de Albañilería de Piedra: con mortero de cemento o cal y arena gruesa.

El ancho mínimo de los sobrecimientos es de 40 cm. y la altura mínima sobre terreno debe ser de 30 cm. para proteger a los tapias de la erosión. Además, la norma E-080 recomienda el uso de lajas de piedra en las partes laterales del sobrecimiento.

3.2.1.2 SELECCIÓN DEL SUELO

El seleccionamiento de la tierra o suelo adecuado para la construcción de detalles como muros de Tapias, normalmente es realizada por métodos propios de la Mecánica de Suelos, teniendo en cuenta la granulometría del suelo, que percude mucho en su comportamiento como material de construcción. Dentro de la información que tratan la temática del seleccionamiento de suelos, su clasificación y ensayos, tanto de campo como de laboratorio, es recomendable el libro denominado "Selección De Suelos Y Métodos De Control En La Construcción Con Tierra - Prácticas De Campo", que recopila información en desarrollo tanto en países latinoamericanos como europeos y que aportan información muy útil y práctica para la construcción con tierra. Dependiendo de los autores existen

recomendaciones distintas para la composición granulométrica de los muros de tapial.

De acuerdo a lo tratado en el Comité de la NTE E.08013 es claro que el suelo viable debe contener prioritariamente entre sus componentes, cantidades suficientes de arcilla y de arena. El porcentaje de arcilla, suministra conexión, uniendo las partículas de arena, conformando una mezcla estructuralmente resistente. Sin embargo, el exceso de arcilla puede producir grietas al secarse el tapial, por lo que, en general se considera que no debe exceder el 20%.

Los ensayos de laboratorio para recabar suelos, como ya se mencionó están muy bien documentados en varias investigaciones. Aunque, las edificaciones de tapial suelen ser realizadas empleando los suelos localmente disponibles y para verificar la idoneidad de su uso, son de máxima utilidad las pruebas de campo, que normalmente serán de menor costo y pueden ser aplicadas fácilmente por los constructores. Es importante también hacer notar como lo propone la NTE E.080, que en los suelos arcillosos se debe usar paja de aproximadamente 50 mm de largo en proporción de 1 volumen de paja por 5 de tierra, lo que ayuda al control de fisuras y resistencia. La mayoría de estas pruebas de campo también son usadas para el adobe, las cuales son numerosas y su descripción extensión para definir su humedad (Urbano Tejada, 2016).

La prueba de campo para elegir un suelo viable, es una de las técnicas más usadas por los tapialeros, que trata en tomar un puñado de suelo húmedo y apretarlo fuertemente para que la tierra se quede compacta (figura 14, 15).

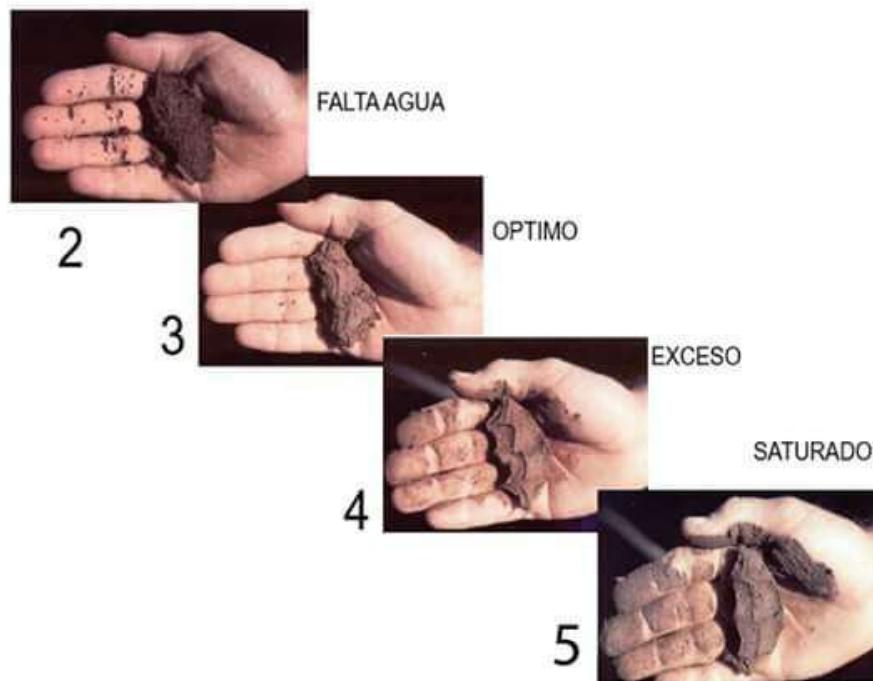


Figura 14. Detección de humedad del suelo (2018).

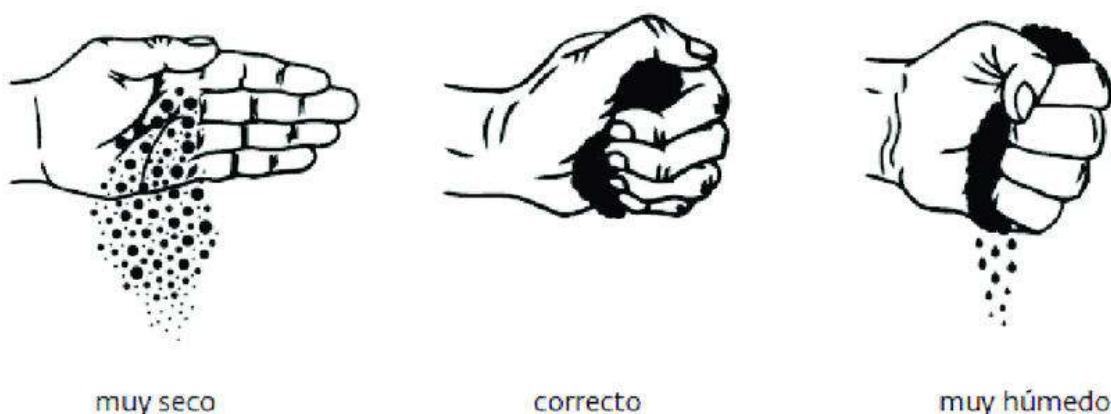


Figura 15. Prueba del puño (2020).

A efectos de reducción de coste por insumos y por transportación, así como de mejora de la organización de la obra, es ideal la proximidad de la tierra al lugar donde se va a construir, ya sea del mismo terreno, de un banco cercano o inclusive haciendo tratos con compañías dedicadas a hacer albercas, quienes no cobran en algunos casos por proporcionar el material. Antes de definir si se utilizará la tierra que es accesible, se deben de realizar algunas pruebas que indiquen si es óptima para el fin deseado. Si existen referencias de construcciones anteriores similares en la zona es recomendable investigar con los constructores y propietarios qué tierra utilizaron, así como los resultados obtenidos.

Los suelos se componen de partículas sólidas y huecos. Los huecos pueden retener agua en mayor o menor medida de acuerdo con el tipo, forma, tamaño y disposición de las partículas que condicionan la permeabilidad a través del tamaño de los poros. Del contenido de agua retenida depende a su vez la deformabilidad y la resistencia del suelo. A grandes rasgos, la composición de la mayoría de las construcciones de tapia desde la antigüedad ha sido un 70% de arena y grava-30% de arcilla y limo, (David E. , 2007).

La granulometría usada varía según la región, por ejemplo, en Argentina para el sistema de tapia es 5% arcilla, 5% de limos, 90% de arena. Estos porcentajes pueden tomarse como base, para buscar la tierra más conveniente según los objetivos de la obra:

Las muestras se deben de tomar de una capa de suelo firme aprox. a 1.5 o más de profundidad, para ello hay que eliminar la capa superficial con impurezas y organismos vivos inadecuados para la construcción. Puesto que el suelo puede variar inclusive a distancias cortas, es recomendable etiquetar la muestra con la

profundidad y localización de que fue tomada. Las piedras mayores a un puño deben de eliminarse.

Para analizar la tierra de una manera sencilla, existen diferentes pruebas de campo que a continuación se describen. La implementación de estos ensayos sencillos preferentemente deberá seguir el orden presentado aquí para detectar a partir del ensayo más sencillo si la tierra es óptima para muros de tierra compactada, (Chiappero Rubén Osvaldo, 2003).

3.2.1.3 ESTABILIZACIÓN

La función de la estabilización es incrementar la resistencia de un material al deterioro producido por la lluvia, el agua estancada, la compresión, flexión, tracción y abrasión producida por el viento y la durabilidad en general.

Estabilización. Uno de los estabilizantes más utilizados es el cemento.

La tierra sin estabilizar puede sufrir algunos problemas como:

- Una excesiva absorción de agua causando grietas y deterioro por el frecuente humedecimiento y secado (dilataciones y contracciones)
- Debilitamiento y desintegración por lluvia e inundaciones
- Poca resistencia a la erosión y a los impactos
- Posibilidad de penetración de roedores e insectos

Hay tres métodos de estabilización: físicos, químicos y fisicoquímicos. Los físicos son aquellos en que se utilizan productos naturales como pelos, resinas vegetales, goma o cenizas, los químicos son en los que se utilizan productos artificiales como el cemento, la cal, el asfalto, los polímeros, fibra de vidrio, resinas con base en formaldehidos, resinas de acrílico o con base polivinílica, componentes alumínicos o productos sintéticos como los ácidos, sodas, silicatos y parafinas. Los fisico-químicos cuyo principal objetivo es hacer los muros resistentes al agua pueden ser agentes hidrófugos como derivados del amoniaco o resinas, o agentes vinculantes como cemento hidráulico, silicatos de sodio o resinas sintéticas. Los estabilizantes más utilizados son el cemento y la cal.

En el caso del cemento, aumenta considerablemente la resistencia a la rotura por compresión simple, en tanto que las emulsiones asfálticas son empleadas para conferir y aumentar la impermeabilidad de las partículas. En cuanto a la cal con porciones entre el 5% y el 10% del peso de la tierra, mejora la resistencia al goteo e incrementa la resistencia a la compresión cuando se emplea en porcentajes más

altos. El cemento permite lograr mejores resultados, pero también tiene sus limitaciones. Su utilización suprime totalmente la contracción de la arcilla de un suelo y le brinda una estructura resistente.

Reemplazando un 10% del peso total de la tierra con cemento, las pruebas dan mayor resistencia a la compresión seca que el suelo solo, pero se corre el riesgo que el material fisure tanto por endurecimiento rápido de la mezcla debido al fragüe del cemento como por la falta de un proceso de curado bien realizado. En estos casos se recomienda cubrir con un plástico el muro una vez descimbrado, para que la pérdida de humedad sea más lenta y la posibilidad de una helada disminuya (Molina, 2009).

Se puede solucionar al estabilizar muros de tierra estabilizada o tapial contra los impactos horizontales del sismo es utilizar elementos verticales de madera o bambú dentro del muro, anclados con el sobrecimiento y fijados al encadenado. Los objetos de refuerzo horizontal son poco efectivos e incluso pueden ser peligrosos, debido a que no se puede apisonar bien la tierra debajo de los mismos y ya que el elemento de refuerzo no tiene un anclaje con el suelo se debilita la sección en estos puntos y pueden aparecer quiebres horizontales durante el sismo.

3.2.1.4 ENCOFRADO

Una de las características que destacan de los tapias es el empleo de moldes o encofrados, dentro de los cuales se vierte el suelo ya preparado para ser compactado. Dentro del proceso de construcción deberá conservarse la verticalidad de los muros, a pesar de la existencia vibraciones, y mantener constantes las dimensiones de ancho del muro, a pesar de los esfuerzos laterales que ejerce el material apisonado, por lo que es necesario que los moldes sean preparados para que resistan dichos empujes y vibraciones.

En otro ámbito, concluida la compactación de una distancia de muro, será necesario retirar y trasladar el encofrado a su nueva ubicación evitando que sea necesario invertir mucho tiempo en su aplomado.

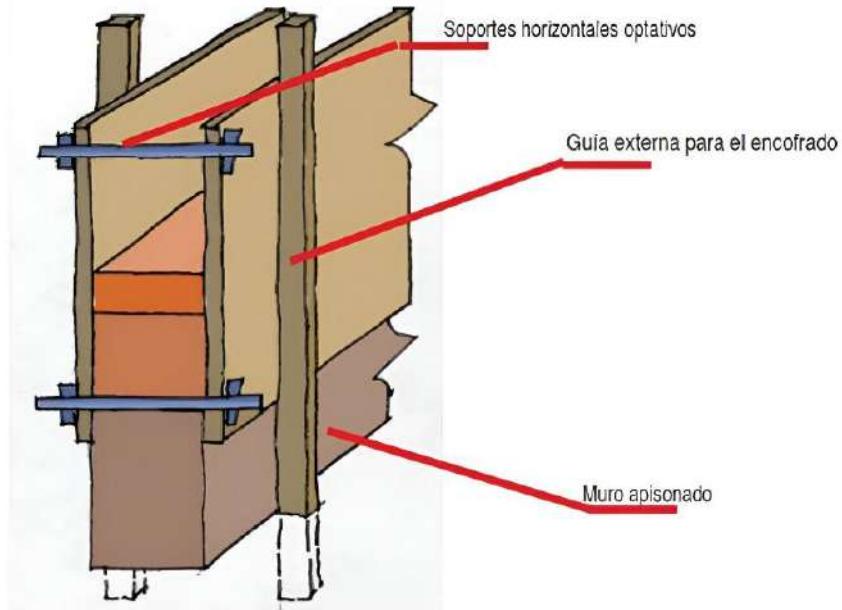
Hay otros 2 procesos constructivos muy difundidos, uno de ellos es basado en "guías" que permiten elevar el encofrado con facilidad y el otro es el caso de los encofrados "deslizantes" que se basa en construir sectores del muro que sirven de guía en la edificación de los demás muros (Célia Neves M. o., 2003).

En otros países como Perú, existe la norma E-080, en donde las medidas de los tapias deberán tener un largo máximo de 1,50 m., ancho mayor a 40 cm y altura máxima de 60 cm. El ancho mínimo de los encofrados debe ser de 20 mm.

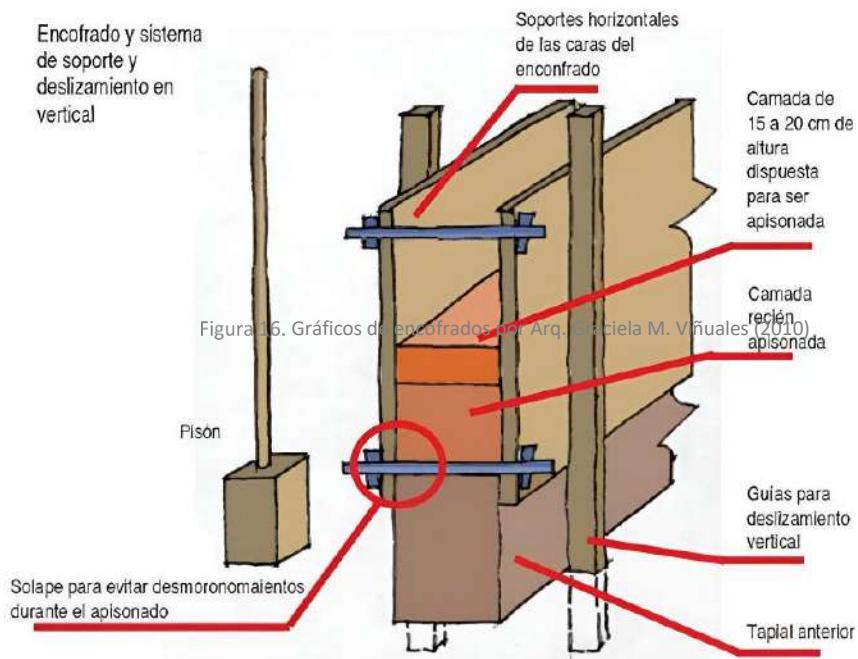
Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Respecto a los anchos de los encofrados, es destacado citar los criterios expuestos en el texto de Albert Cuchil: "El elemento más pesado que interviene en el proceso de ejecución de las tapias son los tapiales (encofrados).

Encofrado y sistema de soporte con guías externas



Partes componentes de un encofrado para tapis



Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Es importante definir los pesos de los tapias quiere decir realizar límites en sus medidas: altura, longitud y espesor. Un tapial ligero, y por tanto de pequeñas dimensiones, facilitará a los tapiadores los movimientos que deben efectuar con él, pero, a su vez, implicará poca superficie pared ejecutada en cada tongada y, por ende, poco rendimiento de las operaciones de desplazamiento y fijación de los tapias. Es importantes detallar las dimensiones y que tengan congruencia con el proceso, pero sin pasarse de un peso mucho mayor de 25 Kg, considerando éste como el peso que permite manipular el tapial a un solo operario, sujetándolo con un solo brazo y ejerciendo movimientos sencillos aplicados en el centro de gravedad del encofrado" (Urbano Tejada, 2016).

3.2.1.5 HUMEDECIMIENTO

Es necesario que la tierra esté húmeda antes de compactarla, se debe de tener cuidado de no mojar en un solo punto, tratando de humedecer homogéneamente. Demasiada agua provocará poca resistencia, menos durabilidad y será fácilmente atacable por la abrasión. El agua empleada no debe superar el 12% * del peso de la tierra empleada (Barbeta Solá, 2002).

3.2.1.6 COMPACTACIÓN

Para compactar los muros de tapial, se emplean 2 tipos de mazos, mecánico o manual, el manual tiene dimensiones de 2 m de largo, 1 m de altura y 50 cm de espesor, mientras que el mecánico puede haber distintos tipos de máquinas y tamaños.

Para la base de golpeo se solía usar una madera más dura, como la de roble o carrasca, actualmente se propone también una placa metálica para mayor impacto el golpe. El pisón no debe ser demasiado pesado pues se dificultará la compactación. La técnica consiste en dejar caer el pisón sobre la tierra tomándolo a la altura del pecho, no es necesario golpear sin soltar la herramienta.



Figura 17. Apisonado por medios manuales (2016).

Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

El trabajo del apisonado es muy duro y a la vez muy delicado, ya que puede provocar diferencias en la ejecución debido al cansancio del trabajador. En este caso se recomienda supervisar constantemente los encargados de este trabajo y sustituirlos en el caso de que el rendimiento disminuya considerablemente.

3.2.1.7 DESCIMBRADO Y RESANE

Una vez compactada toda una hilera, se puede descimbrar. Se debe de realizar con cuidado en el sentido vertical del muro, de arriba hacia abajo o abajo hacia arriba e inmediatamente llenar los huecos de los sujetadores, con la misma mezcla, pero cuidando que sean solamente agregados finos y con un poco más de humedad, haciendo presión para que se adhieran a el resto del muro

3.2.1.8 SELLO

La tierra sin asentar aun cuando esté estabilizada es vulnerable al viento y a la lluvia, por esto, se recomienda aplicar un sellador que permita que el muro respire. La mezcla hecha de agua y nopal fermentado produce un sello de consistencia viscosa, que, aplicado al muro, le dejará su apariencia natural, sin ningún brillo que le pudiera parecer artificial y lo protege sin utilizar soluciones químicas o que dañen el medio ambiente. Se sugiere que se aplique con pistola para fumigar.

Según Quintin Branch, experto en construcción con tierra en Arizona, también se puede hacer un sello preparado con tres partes de agua y una de cola blanca para lugares como cocinas donde el poco polvo que puedan soltar los muros, es indeseado.

3.2.2 MÉTODO DE TAPIA CALICOSTRADA

Este muro se construye vertiendo previamente una capa de mortero de cal, formando una cuña contra las paredes del tapial (encofrado). Posteriormente, se realiza el vertido y apisonado de la tierra. Este paso se repite en cada tongada, obteniendo una sección de muro muy característica. Aunque se vierten las tongadas de mortero de cal, quedan unidas por la cara exterior formando una capa continua de cal que protege el interior del muro de tierra.

En ocasiones, solo se realizaba la costra por el lado exterior y se enlucía con yeso el interior. Para el mantenimiento de la costra se encalaba o se le aplicaban revocos de distinta índole.

3.2.3 MÉTODO DE TAPIA VALENCIANA

Se trata de un muro de tapia con ladrillos o medios ladrillos, normalmente colocados a tizón contra la cara interior del encofrado, acompañados frecuentemente con una costra de mortero de cal. Durante el apisonado, esta cal fluye por delante de los ladrillos que quedan semiocultos en el paramento final. El espesor de las tongadas determina la distancia vertical entre los ladrillos, que aparecen en el muro con juntas muy gruesas, característica principal de esta variante constructiva.

La forma de trabajar la tapia valenciana era idéntico al del calicastrado o costra, con la única diferencia de que, después de haber apisonado las tierras de cada tongada, se colocaban ladrillos o medios a soga y tizón con su cara pegada a las puertas, con la suficiente separación entre ellos para que, al verter la pasta de cal y la siguiente tongada de tierra, quedasen totalmente embebidos en la misma. Así, la tapia adquiere un aspecto exterior parecido a un muro de ladrillo con las lajas y juntas muy anchas y salientes del plano vertical que forman los ladrillos. La cal, que en el calicastrado aparece como un estucado continuo, aquí refuerza solo el llagueado entre ladrillos, mientras estos, debido al movimiento producido por la maza al compactar la tierra, se deslizan un poco hacia el interior del muro, quedando rehundidos respecto al plano exterior del mismo definido por las puertas (Tortajada, 2000).

3.2.4 MÉTODO DE TAPIA CON JUNTAS REFORZADAS

Se trata de un muro de tapia con yeso extendido en las juntas verticales y horizontales de cada cajón con el objetivo de proteger estos puntos débiles de posibles entradas de agua frente a la intemperie.

3.2.5 MÉTODO DE TAPIA REFORZADA CON PIEDRAS EN SU INTERIOR

Se trata de un muro de tapia al que se le incorporan en su interior piedras. Al apisonar la tierra, esta fluye por delante de las caras de las piedras, quedando estas ocultas parcialmente y mostrándose unas juntas gruesas. Lo más característico de este sistema es la disposición de los materiales. El mortero de cal se vierte junto al encofrado en la parte exterior del cajón. Cuando se echa y apisona la tierra, se produce un flujo de lechada de cal hacia el exterior, creando una costra protectora de la tierra a la intemperie y dejando la cara exterior con un acabado más fino y liso.

3.2.6 BLOQUE DE TIERRA COMPACTADA (BTC)

El Bloque de Tierra Compactada (BTC) representa un innovador sistema constructivo que prioriza la utilización de la tierra como biomaterial principal, mezclada con arena y arcilla, y opcionalmente estabilizada con cal. Este método industrializado implica la compactación a presión de la mezcla mediante una máquina hidráulica, resultando en bloques de tierra. La resistencia estructural se logra tras un periodo de secado, quitando el exceso de humedad y dejando un bloque compacto con una notable inercia térmica.

Lo destacable del BTC es su eficiencia energética, ya que la producción de estos bloques requiere aproximadamente un 1% de la energía necesaria para fabricar ladrillos convencionales. Este ahorro energético significativo representa una contribución valiosa al sector de la construcción, alineándose con prácticas más sostenibles por el sistema BTC, que tiene beneficios directos en el ambiente interior de la vivienda.

La capacidad de mantener una humedad relativa cercana al 50% contribuye a crear ambientes saludables, mientras que las propiedades aislantes de la tierra como biomaterial mejoran tanto el confort termoacústico como la eficiencia energética de la vivienda. Así, el BTC se posiciona como una alternativa constructiva que no solo promueve la sostenibilidad energética, sino que también favorece la habitabilidad y el bienestar en el hogar sostenible.

El desarrollo de este material es fruto de la labor de investigación de Fetzterra, empresa especializada en nuevos procesos y materiales para la bioconstrucción, con la tierra como material base para una arquitectura sostenible. La tierra utilizada como material de construcción tiene una composición formada por una mezcla de arcilla, limos, arena, y puede tener gravilla o grava. La arcilla actúa como aglomerante de las partículas más grandes de la tierra, como lo hace el cemento en el hormigón.

La construcción con BTC es, en efecto, una técnica de construcción económica que presenta mejores propiedades de resistencia y durabilidad que las construidas con adobe, y una gran potencialidad de industrialización de sus unidades (Herrera Villa, 2018). Además, estos bloques poseen varias ventajas que les permiten responder a los problemas energéticos y climáticos actuales, por ser elementos fabricados con materiales de baja energía incorporada (Bradley, Gohnert y Bulovic, 2018). Las ventajas que ofrece el bloque prefabricado de tierra frente al sistema tradicional de construcción de muros de tapial son: el control del material, el curado y calidad del producto, una geometría constante y unas dimensiones regulares (Tectónica, 2020).

Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Bloques: Tapiablock S (20 x 10 x 12 cm) y 4,5 kg; Tapiablock M (100 x 8 x 20 cm) y 35 kg; Tapiablock L (100 x 40 15 cm) y 125 kg.

El bloque tiene una resistencia a compresión de 4,0 N/mm² y un coeficiente de conductividad térmica de 0,778 W/m.K.

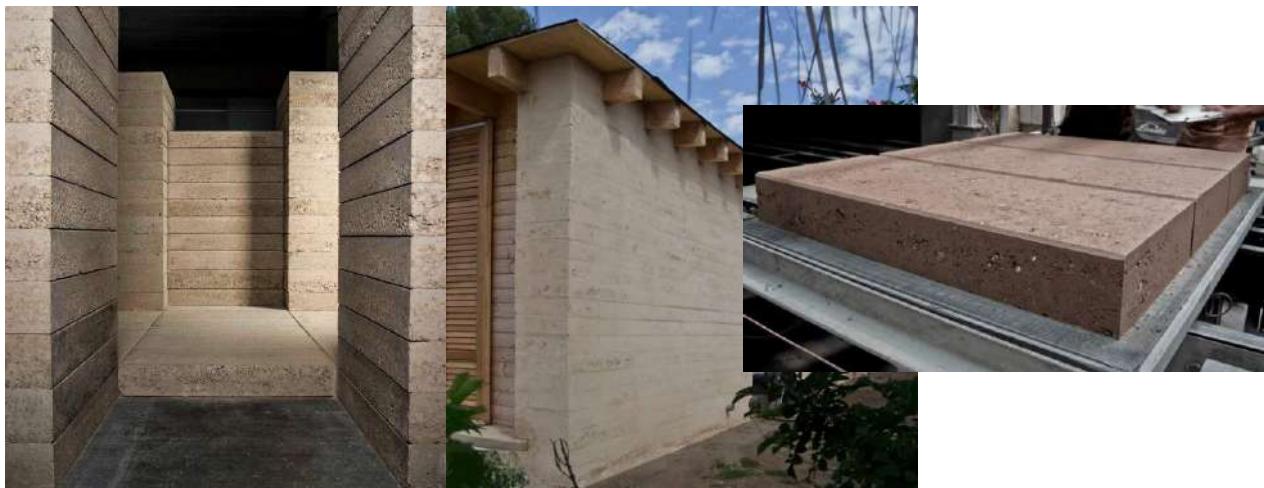


Figura 18. Bloque prefabricado de tierra natural compactada de la empresa Tectónica (2020).

3.3 DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS

3.3.1 COLOMBIA: NORMA COLOMBIANA NTC 5324 BLOQUES DE SUELO CEMENTO PARA MUROS Y DIVISIONES

Los bloques de suelo cemento (BSC) son productos de forma generalmente paralelepípedos estabilizados con cemento para conseguir o desarrollar las características particulares del producto. Los bloques se obtienen por compresión estática o dinámica del suelo en un estado húmedo, seguida de un desmolde inmediato. Estos bloques son generalmente instalados con juntas de mortero, que sirven para la construcción de muros y divisiones.

3.3.1.1 SUELO (AGREGADOS)

El suelo o agregado destinado a la construcción de BSC consiste en un material de base compuesto esencialmente y en proporciones dadas, por gravillas, arenas, limos y arcillas.

Estos componentes pueden estar definidos de acuerdo con una clasificación granulométrica o en lo que concierne a los elementos finos por su naturaleza mineralógica.

Las principales características del suelo están definidas por:

Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

- la granulometría
- la plasticidad
- la naturaleza

Hay muchos suelos que son aceptables para la fabricación del BSC, siempre y cuando no se traten de suelos orgánicos.

La granulometría del material utilizado estará de preferencia inscrita en el rango del diagrama de textura que sigue a continuación (figura 19). Los límites de este rango recomendado son aproximados. Los materiales donde la textura se inscribe en el rango recomendado dan, en la mayoría de los casos, resultados satisfactorios.

La plasticidad del material preferiblemente debe ser la inscrita en el rango del

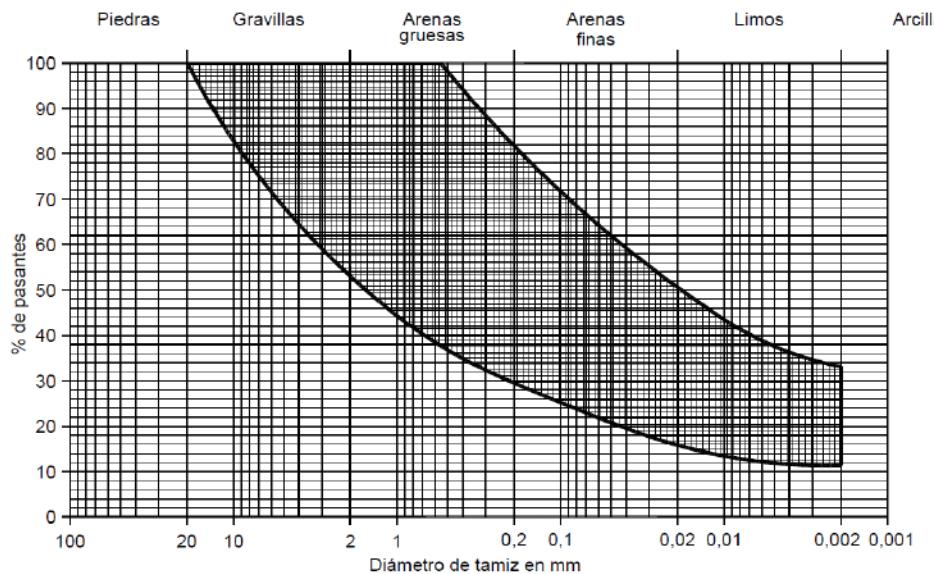


Figura 19. Rango de diagrama de textura de suelos (2004).

diagrama de plasticidad que sigue a continuación (figura 20). Los límites del rango son aproximados. Los materiales cuya plasticidad está inscrita en el rango recomendado dan, en la mayoría de los casos, resultados satisfactorios. Los materiales en donde la plasticidad no se inscribe en el rango pueden, a veces, dar resultados aceptables, pero se recomienda someterlos a una serie de ensayos que permitan verificar su conveniencia.

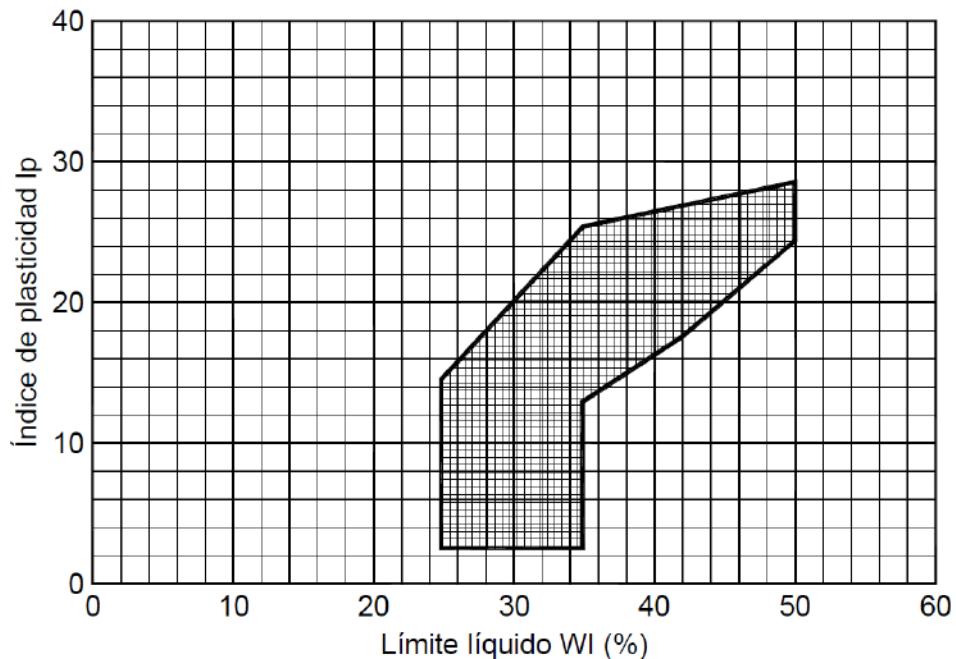


Figura 20. Rango de diagrama de plasticidad de suelos (2004).

3.3.1.2 AGUA

Debe disponer de una cantidad de agua destilada o desionizada de un mínimo de 5 L, para emplearla en los ensayos testigos y debe almacenarse en un recipiente limpio.

3.3.1.3 NATURALEZA DE LOS MATERIALES

La naturaleza de los suelos o materiales utilizados está determinada por la combinación de valores que arrojan los resultados de granulometría y plasticidad. La convención general de los suelos es conocida de la siguiente manera:

- A 1 Material aceptable, pero con muchos finos.
- A 2 Material aceptable, pero con pocos finos
- A 3 Material aceptable, pero con necesidad de atención particular, pues es relativamente activo.
- A 4 Material delicado para utilizar por ser muy activo
- B 1 Material arenoso con necesidad de una adición de finos para ser aceptado.
- B 2 Material aceptable con un ligero déficit de finos.
- B 3 Material arenoso con necesidad de una adición considerable de finos para ser aceptado.
- B 4 Material aceptable con un déficit de finos.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

- B 5 Material aceptable, pero con faltante de un poco de finos.
- B 6 Material aceptable, pero con faltante de un poco de finos.
- C 1 Material muy gravilloso, debe ser tamizado para cambiar su naturaleza.
- C 2 Material muy gravilloso, debe ser tamizado para cambiar su naturaleza.
- D 1 Material arenoso con necesidad de un aumento de finos para ser aceptado.
- D 2 Material arenoso con necesidad de un aumento considerable de finos para ser aceptado.
- D 3 Material arenoso con necesidad de un tamizado para cambiar su naturaleza y un aumento considerable de finos para ser aceptado.
- R Material que no conviene.
- F Material que exige ensayos de identificación centrados sobre todo en lo concerniente a su análisis químico y a sus ensayos mecánicos antes de poder determinar su conveniencia. Conviene tener en cuenta los ensayos sobre el BSC relativos a una producción específica.

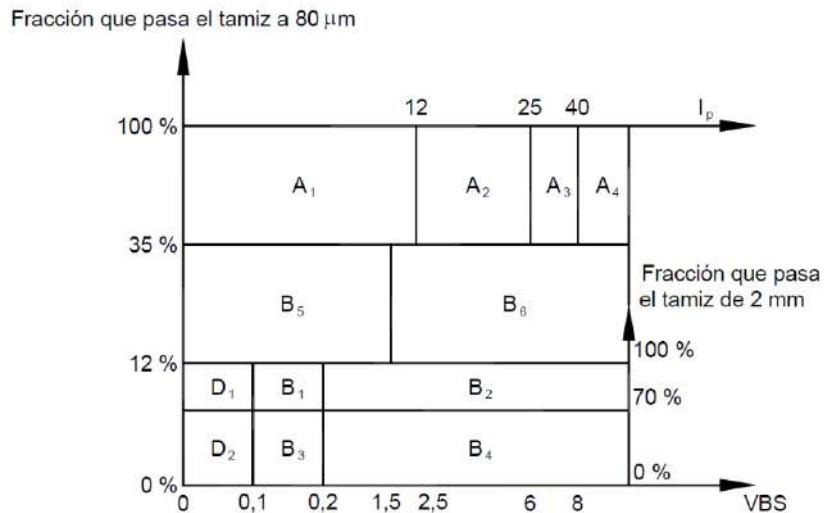


Figura 22. Suelos Dmáx ≤ 50 mm (2004).

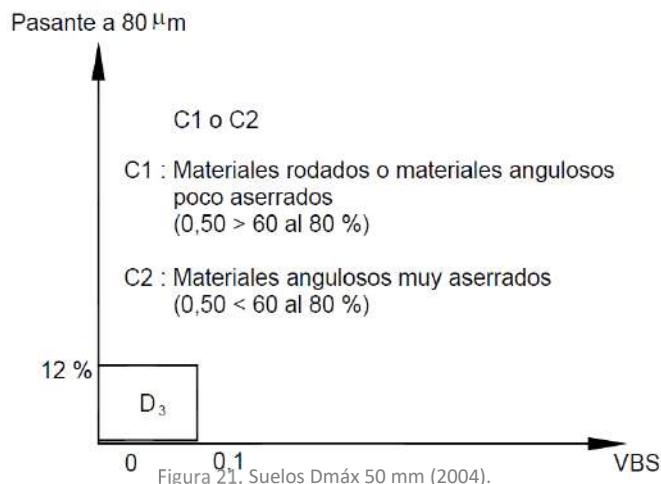


Figura 21. Suelos Dmáx 50 mm (2004).

3.3.1.4 DIMENSIONES

Dimensiones de coordinación y dimensiones de fabricación. Tolerancias

Las dimensiones de fabricación más corrientes son:

- 14 cm x 9,5 cm x 29,5 cm (E x h x L)
- 22 cm x 9,5 cm x 22 cm (E x h x L)

Las dimensiones efectivas del bloque deben estar contenidas dentro de las dimensiones de fabricación, teniendo en cuenta las tolerancias indicadas en la Tabla 5.

Materiales rocosos

Rocas sedimentarias	Rocas carbonatadas	Tizas Calcarias	R1 R2
	Rocas arcillosas	Mames, argilitas, pelitas...	R3
	Rocas sílicas	Greda, pudines, brechas...	R4
Rocas magmáticas y metamórficas	Rocas salinas	Sal gema, yeso	R5
		Granitos, basaltos, andesitas, esquistos metamórficos y pizarras	R6

Materiales particulares

Suelos orgánicos y subproductos industriales

| F

Figura 23. Clasificación de los materiales según su naturaleza (2004).

Tabla 5. Tolerancias de las dimensiones

Designación de dimensiones	Espacios dimensionales (mm)
Espesor (E)	± 3
Altura (h)	Entre + 5 y -2
Largo (L)	± 3

3.3.2 ESPAÑA: NORMA ESPAÑOLA UNE 41410 BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) PARA MUROS Y TABIQUES

3.3.2.1 TIERRA

La tierra destinada a la construcción de BTC está compuesta esencialmente por grava, arena, limo y arcilla, mezclada con agua y, opcionalmente, se le pueden incorporar estabilizantes y/o aditivos y/o adiciones.

Deberán rechazarse las tierras que contengan:

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

- Materia orgánica en cantidad mayor o igual del 2 %. La determinación del contenido en materia orgánica de los suelos que se empleen en la fabricación de BTC se hará de acuerdo con la Norma UNE 103204:2019.
- Sales solubles en contenido mayor del 2 %. El contenido en sales solubles de los suelos que se empleen en la fabricación de BTC se determinará de acuerdo con la Norma UNE 103205:2019.

Las principales características de la tierra se definen por:

- La granulometría.
- La plasticidad.
- El tipo de arcilla.

3.3.2.2 GRANULOMETRÍA

La determinación de la distribución de tamaños de partícula de la tierra utilizada para fabricar los BTC se realizará según la Norma UNE-EN ISO 17892-4:2019.

Se recomienda que la granulometría del material utilizado esté inscrita en el huso del diagrama de textura de la figura 13 igual que la Norma NTC 5324. Los límites del huso recomendado son aproximados. Los materiales cuya textura está inscrita en el huso recomendado dan resultados satisfactorios en la mayoría de los casos.

No se admitirán aquellas tierras con un contenido de arcillas menor al 10 %.

3.3.2.3 PLASTICIDAD

La determinación de la plasticidad de los suelos que se utilicen para la fabricación de BTC se determinará según lo establecido en la Norma UNE-EN ISO 17892-12:2019.

Se recomienda que la plasticidad del material esté comprendida preferentemente en la zona sombreada del diagrama de plasticidad de la figura 14 igual que la Norma NTC 5324. Los límites recomendados son aproximados. Los materiales cuya plasticidad queda inscrita en la zona sombreada recomendada, en la mayoría de los casos dan resultados satisfactorios.

3.3.2.4 AGUA

En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica. Cuando no se posean antecedentes de su utilización y siempre que existan dudas;

-Agua de amasado de morteros y de fabricación de los BTC

Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, deberían analizarse las aguas potables que se utilicen para amasar los morteros o para fabricar los BTC.

Los requisitos recomendables para las aguas analizadas, y salvo justificación especial de que no alteran perjudicialmente las propiedades exigibles al mortero o al BTC, son los siguientes:

pH ~ 5, determinado según la Norma UNE 83952:2008.

Sulfatos (SO₄); 1 g/l (1 000 p.p.m.), determinados según la Norma UNE 83953:2008.

Ión cloruro, (Cl⁻; 3 g/l (3 000 p.p.m), determinado según la Norma UNE 83958:2014 (sólo, en el caso del uso de fábrica de BTC armada con acero).

Hidratos de carbono = O, determinados según la Norma UNE 83959:2014.

Sustancias orgánicas solubles en éter ≤ 15 g/l (15 000 ppm), determinadas según la Norma UNE 83960:2014.

3.3.2.5 AGREGADOS

El fabricante debe declarar los agregados y el porcentaje incorporado en la mezcla sobre el volumen total en seco, de cada uno de ellos, pudiendo ser de naturaleza inorgánica u orgánica (natural o sintética), permitiéndose la incorporación de productos de reciclado.

3.3.2.6 ESTABILIZANTES, ADITIVOS Y ADICIONES

El fabricante debe declarar el/los aditivos, adiciones o estabilizante/s usado/s y el porcentaje incorporado en la mezcla sobre el volumen total en seco, de cada uno de ellos. En caso de utilizar cemento, cal o yeso, la suma de los porcentajes de todos ellos debe ser menor o igual al 10 % de la masa en seco del BTC. Además, el fabricante, en caso de emplear estos estabilizantes, deberá declarar el porcentaje, tipo y su designación.

3.3.2.7 ESTABILIZANTES

Esta norma contempla distintos tipos de estabilización.

A) Criterios de elección de estabilizantes

Para decidirse por un método correcto de estabilización, se recomienda reunir suficiente información sobre los estabilizantes disponibles mediante una serie de criterios:

- Disponibilidad regional: se preferirán los productos cercanos.
- Minimización del impacto ambiental y del potencial de reciclaje atendiendo al principio DNSH, realizándolo a partir del análisis del ciclo de vida: consumo mínimo de energía, agua y recursos renovables; emisión mínima de sustancias tóxicas al entorno desde su extracción, fabricación, transporte, aplicación y vida útil.
- Compatibilidad mecánica, química y física entre componentes, y durabilidad.
- Procesos tecnológicos apropiados a la puesta en obra y al mantenimiento.
- Evaluación económica.

B) Estabilidad de la tierra

Se entiende por una tierra estable aquella que no sufre procesos expansivos durante su uso, manteniendo su forma y prestaciones previstas originalmente.

La utilización de estabilizantes no siempre es necesaria ni imprescindible para la obtención de un material de calidad. Estos solo se emplearán cuando sean precisos para alcanzar cierto tipo de prestaciones específicas según el tipo de tierra utilizada, puesto que limitan las ventajas de reciclabilidad y permeabilidad al vapor de agua de los bloques de tierra.

Hay diferentes tipos de estabilización, agrupados según la acción que ejerzan sobre el material tierra.

Estas acciones son:

- Química: cuando lo que añade es un producto que modifica la estructura granular a la que dota de una cohesión que no tenía o disminuye la excesiva plasticidad.
- Física: el estabilizante modifica las propiedades físicas de la tierra.
- Mecánica: una acción mecánica modifica la compacidad del material. Ésta puede ser: estática, dinámica o mixta (proyección, amasado). La eficacia de este sistema depende de la granulometría, el grado de compactación y del grado de humedad de

la mezcla. Normalmente la estabilización mecánica se consigue por compactación del suelo.

Ejemplos de estabilizantes químicos:

- Aceites naturales: Coco, savia de caucho, savias naturales, látex, prensado de oliva, etc.
- Silicatos de sosa y orina.
- Resinas acrílicas.
- Etilsilicatos, el hidróxido de Bario. ácido húmico y ácido tónico.
- Yema de huevo.
- Productos puzolánicos.
- Cal viva o apagada de naturaleza aérea.
- Cales hidráulicas artificiales.
- Cales hidráulicas naturales.
- Cementos naturales o artificiales (preferiblemente de bajo contenido de klinker).
- Yesos.
- Resinas.

Es importante, en todos los casos, que los estabilizantes sean compatibles mecánicamente, física y químicamente con el tipo de tierra empleada y con los materiales con los que entre en contacto, y tener en consideración la modificación de todas las prestaciones que implica la adición de estabilizantes químicos, por ejemplo, la impermeabilización otorgada comúnmente por los aceites e incluso por algunas resinas, o la reducción de la permeabilidad al vapor de agua del cemento, entre otros.

Ejemplos de estabilizantes físicos:

- Estabilización granulométrica: se realiza con la mezcla de suelos naturales, utilizándose normalmente una combinación binaria de suelos.

Estabilización con fibras: crea un armazón interno, lo que aporta una mejora en el reparto de las tensiones en la matriz terrosa, pudiendo incrementar la resistencia a flexión ya cortante, y ayudando a evitar la retracción.

El cemento empleado como estabilizante para la fabricación de BTC debe responder a las condiciones especificadas en las normas siguientes, así como en la reglamentación vigente:

- RC-2016, Instrucción para la recepción de cementos. RD 56/2016, 10 de junio.
- UNE 80309:2006

La cal empleada como estabilizante para la fabricación de BTC responderá a las condiciones especificadas en las normas siguientes:

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

- UNE-EN 459-1:2016
- UNE-EN 459-2:2022
- UNE-EN 459-3:2016
- UNE 80502:2014

El yeso empleado como estabilizante para la fabricación de los BTC debe responder a las condiciones especificadas en las normas siguientes:

- UNE-EN 13279-1:2009
- UNE-EN 13279-2:2014

3.3.2.8 ADITIVOS

Se podrán incorporar aditivos, de naturaleza mineral u orgánica, siempre y cuando no comprometan la durabilidad de las mezclas, así como su reciclabilidad. Su incorporación, así como el porcentaje incorporado, ha de declararse por parte de los fabricantes, incluso con muy bajos contenidos.

3.3.2.9 ADICIONES

Se podrán incorporar adiciones, de naturaleza mineral u orgánica, siempre y cuando no comprometan la durabilidad de las mezclas, así como su reciclabilidad. Su incorporación, así como el porcentaje incorporado, ha de declararse por parte de los fabricantes, incluso con muy bajos contenidos. Además, las adiciones no deberán incorporar sales solubles en un contenido mayor del 2 %, de acuerdo con la Norma UNE 103205:2019.

3.3.3 PERÚ: NORMA E.080 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CON TIERRA REFORZADA

Artículo 12.- Condiciones de la tierra a utilizar Se debe validar las características de la tierra a utilizar para construir con tapial, en el siguiente orden:

12.1 Suficiente presencia de arcilla, mediante las pruebas indicadas en el Anexo N.^º 1: Prueba “Cinta de barro” y Anexo 2: Prueba “Presencia de Arcilla” o “Resistencia seca”.

12.2 Equilibrio de arcilla y arena gruesa, mediante la prueba indicada en el Anexo 4: Prueba de “Control de Fisuras” o “Dosificación con suelo-arena Gruesa”.

12.3 Máximo contenido de humedad, mediante la prueba indicada en el Anexo N.^º 3: Prueba “Contenido de humedad” para la construcción con tapial.

12.4 En los suelos arcillosos se debe usar paja de aproximadamente 50 mm de largo en proporción de 1 volumen de paja por 5 de tierra, lo que ayuda al control de fisuras y resistencia. Esta proporción debe ser verificada en el inicio de la obra para evitar el rebote del mazo durante la compactación.

12.5 Su resistencia debe cumplir lo indicado en el numeral 8.1 u 8.2 del artículo 8.

Artículo 13.- Unidades de tapial y encofrado Las unidades de tapial deben tener las siguientes dimensiones: ancho mínimo: 0.40 m., altura máxima: 0.60 m, longitud máxima: 1.50 m y el espesor mínimo de la madera de encofrado debe ser de 20 mm, con refuerzos exteriores horizontales y verticales, para evitar deformaciones excesivas.

Artículo 14.- Fabricación de la unidad de tapial Cada unidad de tapial se debe fabricar en capas de tierra de 0.15 m. de altura máxima, compactándolas hasta llegar a una altura de 0.10 m. aproximadamente (por cada capa), siguiendo el procedimiento siguiente:

- a) La compactación se realiza con un mazo de madera de alrededor de 10 kgf.
- b) Una vez finalizada la compactación de todas las capas que conforman la unidad de tapial, ésta se debe picar en la cara superior de la última capa (superficie endurecida) un máximo de 0.01 m (un centímetro) e inmediatamente se debe de humedecer la misma antes de empezar con el vertido de la primera capa de tierra de la siguiente unidad de tapial.
- c) Las juntas de avance de las unidades para conformar las hiladas deben realizarse inclinadas (pendiente cercana a 45º según lo indicado en el Anexo N.^º 5: Recomendaciones para las juntas de avance en la técnica del tapial reforzado).

Artículo 15.- Protección de las hiladas de tapial Para proteger las hiladas de tapial, se toman las consideraciones siguientes:

15.1 Es necesario un secado lento para evitar la fisuración.

15.2 Se recomienda retirar los encofrados de cada hilada luego de siete días de haber finalizado todo el apisonado (no menor a tres días).

15.3 Cubrir la hilada en trabajo y la hilada anterior con paños húmedos (yute o similares) al menos por siete días adicionales.

15.4 Las hiladas finalizadas, deben protegerse de la exposición directa a los rayos del sol y del viento (por ejemplo, mediante castillos temporales de esteras o mantas), para un secado lento, manteniendo la humedad y evitando el agrietamiento.

15.5 No se debe construir en época de lluvia.

3.3.4 ESTADOS UNIDOS: E2392/E2392M DISEÑO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE MUROS DE TIERRA

6.1 Materiales (materia prima del producto)—Los materiales de los sistemas de construcción de tierra incluyen tierra arcillosa y materiales de templado orgánicos u inorgánicos. El limo, la arena y la grava son los templadores inorgánicos más utilizados, y la paja, el pelo y la paja son los templadores orgánicos más utilizados. Los suelos pueden estabilizarse, utilizando materiales como cemento, emulsión asfáltica, yeso calcinado o jugo de cactus, o pueden no estabilizarse. Los sistemas pueden terminarse con yeso o dejarse sin terminar.

6.1.1 Suelo—Los suelos para sistemas de construcción de tierra son una mezcla de un aglutinante (arcilla) y suelos templados de limo, arena y grava.

Estas mezclas pueden ser suelos locales naturales o diseñados mediante la mezcla de diferentes suelos. Las fuentes de los suelos incluyen horizontes del sitio, subproductos de la extracción de arena y grava y depósitos aluviales. Algunas arcillas son altamente expansivas (montmorillonitas) o moderadamente expansivas (ilitas) cuando se humedecen, y por lo tanto son problemáticas para la construcción con tierra. Lo ideal es utilizar una arcilla de caolinita no expansiva. La mezcla de pequeñas cantidades de cal, betún o cemento anulará las propiedades expansivas de las arcillas hinchables, pero por el mismo mecanismo químico anulará la capacidad aglutinante y otras propiedades beneficiosas de la arcilla. Por lo tanto, los aglutinantes estabilizadores generalmente se deben utilizar solo cuando no haya otra estrategia viable para cumplir con los requisitos del proyecto. Se debe tener cuidado para evitar efectos adversos en la capacidad de producción de alimentos al considerar el uso de margas y otros suelos que sean adecuados para fines agrícolas.

6.1.2 Paja: la paja, al estar seca y no tener semillas, es más duradera en los sistemas de construcción con tierra que el heno, que contiene semillas. La paja es un producto de desecho agrícola que, por lo general, no se utiliza para un uso final productivo; Por lo tanto, se considera un producto agrícola alternativo y un recurso renovable cuando se utiliza en sistemas de construcción de tierra.

6.1.3 Yeso: el “yeso” es un material que se aplica a las superficies expuestas de los sistemas de construcción de tierra para mejorar la durabilidad y modificar la apariencia.

6.1.3.1 Yeso de tierra (o arcilla): el yeso de tierra es una mezcla de arcilla, limo, arena y agua. Normalmente se agregan materiales de templado fibrosos.

6.1.3.2 Yeso de cemento: el yeso de cemento es una mezcla de cemento, arena y agua; la mezcla también puede incluir puzolanas, cal, pigmentos, fibras de vidrio y aditivos patentados.

El yeso de cemento, que es considerablemente menos permeable al vapor que el yeso de tierra, puede atrapar humedad, lo que resulta en la saturación y el deterioro de los sistemas de muros de tierra no estabilizada. Por esta razón, se desaconseja enfáticamente el uso de yeso de cemento sobre tierra no estabilizada.

6.1.3.3 Yeso de cal: el yeso de cal es una mezcla de cal hidratada y arena que es mucho más compatible con la tierra no estabilizada que el yeso de cemento en términos de permeabilidad al vapor, coeficiente de cambio de temperatura y rigidez. El yeso de cal tiene una larga y exitosa historia de uso sobre sistemas de construcción de tierra indígenas en varias culturas. La aplicación exitosa de yeso de cal sobre tierra no estabilizada requiere algún modo de fijación mecánica, como rayar la superficie de la tierra, y una aplicación cuidadosa de la cal en capas progresivas.

6.2 Proceso de fabricación:

6.2.1 Fabricación: el proceso de fabricación para crear un producto de construcción incluye no solo el proceso de producción, sino también los procedimientos de fabricación y distribución.

La fabricación de materiales de construcción de tierra no estabilizada es sustancialmente más eficiente energéticamente por unidad de volumen que la fabricación de mampostería de arcilla cocida como ladrillo, terracota o tejas de arcilla estructural, o la fabricación de sistemas a base de cemento como mampostería de hormigón, hormigón prefabricado o hormigón moldeado en el lugar. Los materiales de tierra estabilizada que utilizan cemento Portland, cal, emulsión asfáltica o yeso calcinado son menos eficientes energéticamente para fabricar por unidad de volumen que materiales no estabilizados similares, pero generalmente son más eficientes energéticamente para fabricar que los materiales de hormigón a base de cemento.

6.2.2 Fabricación: En la fabricación de construcciones de tierra, un aglutinante de arcilla se templa con materiales inorgánicos u orgánicos, o ambos, para reducir la contracción y el agrietamiento, y para aumentar la resistencia y la trabajabilidad. Los suelos pueden no estabilizarse o pueden estar estabilizados. La estabilización se realiza para aumentar la durabilidad y la resistencia. La colocación de los sistemas de adobe y bloques prensados es similar a la colocación de los sistemas de unidades de mampostería de arcilla cocida y hormigón en el sentido de que las unidades fabricadas se apilan a mano unas sobre otras para producir estructuras. La fabricación de estos sistemas difiere en el mortero utilizado para unir las unidades fabricadas, o en la cocción de las unidades, o en ambos. Los sistemas de mampostería de arcilla cocida y hormigón utilizan morteros que contienen cemento

Portland, cementos de mampostería patentados, cementos de mortero y masilla de cal, que utilizan sustancialmente más energía en sus procesos de fabricación que los morteros de construcción de tierra no estabilizada y, en menor medida, los morteros de construcción de tierra estabilizada. La fabricación de tierra apisonada es similar para la fabricación de sistemas de hormigón colado in situ en los que se requiere encofrado. El encofrado suele ser una construcción temporal de madera, acero, fibra de vidrio o tierra construida para dar la forma y el tamaño deseados a la estructura terminada. El encofrado se retira antes del curado completo del material y se puede reutilizar o reciclar según el material utilizado. En lo que se diferencian los sistemas es en la cantidad de mano de obra necesaria para colocar los materiales en el encofrado. El hormigón colado in situ, que se vierte de forma continua en el lugar hasta que se alcanza la altura o el espesor deseados obtenido, requiere menos mano de obra en el lugar que la tierra apisonada, que se coloca en el encofrado en capas cortas llamadas capas y se compacta después de cada capa. La fabricación por el método de mazorca implica la colocación del material directamente en su posición final sin utilizar encofrados.

6.2.2.1 Uso de energía: debido a los pasos adicionales y el consumo de energía requerido para el transporte y la fabricación, los sistemas de arcilla cocida, mampostería de hormigón, acero y la mayoría de los sistemas de madera utilizan más energía incorporada en sus procesos de fabricación que los sistemas de construcción de tierra no estabilizada.

Los sistemas de construcción de tierra estabilizada utilizan un poco más de energía incorporada debido al uso de pequeñas cantidades de cemento u otros aditivos en su fabricación. La energía incorporada involucrada en el encofrado es igual para todos los métodos que requieren encofrado temporal.

6.2.3 Procedimientos de distribución: los procedimientos de distribución para los sistemas de construcción con tierra varían desde la extracción, fabricación y fabricación en el lugar de los edificios individuales por parte de sus propietarios hasta sistemas regionales de múltiples partes que involucran canteras externas, fabricantes de mampostería y contratistas de construcción.

6.3 Rendimiento operativo (producto instalado): la necesidad de estabilización variará de un proyecto a otro y se requiere un juicio profesional.

6.3.1 Discusión: existen edificios de departamentos históricos de varios pisos hechos con tierra no estabilizada que han brindado cientos de años de servicio útil (por ejemplo, Taos Pueblo, Estados Unidos y Shibam, Yemen), lo que demuestra que la construcción con tierra no estabilizada puede ser mucho más duradera de lo que se piensa generalmente. Para minimizar los costos financieros para los propietarios de los edificios, las complicaciones y los desechos durante la construcción, y los costos de contaminación para el ecosistema, la estabilización con cemento, cal o yeso solo debe utilizarse cuando otras medidas de resistencia y

durabilidad (como aleros de techo, refuerzos, revoques renovables o paredes más gruesas) no puedan lograr los mismos objetivos de resistencia y durabilidad.

6.3.2 Durabilidad: la humedad puede degradar los sistemas de construcción de tierra no estabilizados. Por lo tanto, deben protegerse con alguna combinación de cimientos elevados por encima del nivel de salpicaduras de lluvia o posibles inundaciones, revestimiento protector como revoque de tierra o cal renovable, o aleros de tamaño suficiente para desviar la lluvia impulsada por el viento. Varios factores pueden afectar la durabilidad y la tasa de erosión; por lo tanto, se deben evaluar cuidadosamente las condiciones climáticas y del sitio específico. El adobe demolido y no estabilizado puede desintegrarse y regresar al suelo sin impacto negativo en el ecosistema. Los materiales utilizados para estabilizar los sistemas de construcción de tierra, como la emulsión asfáltica y el cemento, pueden aumentar considerablemente la resistencia y la durabilidad, pero alteran los suelos y su idoneidad para usos agrícolas.

6.3.2.1 Se pueden utilizar pruebas de materiales de construcción estándar, como la resistencia a la compresión en seco, la resistencia a la compresión en húmedo, el módulo de ruptura, el porcentaje de absorción, el contenido de humedad, la erosión por rocío y goteo, la densidad del campo y la densidad en seco para evaluar la probable durabilidad de los sistemas de construcción de tierra. En muchas áreas con una tradición de construcción de tierra, ya existen algunos criterios, basados en estas pruebas, pero modificados para reflejar las características únicas de los materiales de tierra, para determinar la susceptibilidad a la humedad y la resistencia a la carga.

6.3.2.2 Eficiencia energética: los sistemas de construcción de tierra brindan capacidad de almacenamiento térmico (calor específico) pero poco aislamiento (valor R). En climas donde la temperatura interior deseada está entre las temperaturas exteriores diarias máximas y mínimas, las paredes exteriores de los sistemas de construcción de tierra pueden amortiguar la transferencia térmica y ayudar a estabilizar las temperaturas interiores. En climas donde tanto las temperaturas máximas como las mínimas diarias son superiores o inferiores a las temperaturas interiores deseadas durante varios días, semanas o meses consecutivos, las paredes exteriores de los sistemas de construcción de tierra pueden reducir el confort térmico al aumentar el calor conducido. En estos climas, los sistemas de construcción de tierra pueden mejorar la eficiencia energética solo si se instala un aislamiento para aislar la construcción de tierra de los cambios de temperatura exterior o si se limita la construcción de tierra a las paredes interiores.

3.4 TIPOS DE REFUERZOS EN EL TAPIAL

El tapial es reforzado para mejorar la resistencia, estabilidad y durabilidad, principalmente ante factores como la erosión, la humedad y los movimientos de sismicidad. Se pueden emplear técnicas como añadir fibras, aditivos, reforzar con acero, usar entramados de madera o aplicar revestimientos.

3.4.1 ACERO

El uso de acero como reforzamiento de muros de tapial, especialmente en edificios patrimoniales, puede mejorar su resistencia y capacidad de soportar cargas, especialmente en áreas sísmicas. El reforzamiento con placas de acero o mallas, ancladas a los muros, puede ayudar a controlar daños en los vanos y mejorar la resistencia a la flexión y el corte (Urbano Tejada, 2016).

- **Placas de acero:**

Se pueden instalar placas de acero (por ejemplo, tipo A36) en ambas caras del muro, creando un sistema de anillos horizontales y elementos verticales que resisten tensiones.



Figura 25. Edificación de tapial reforzado con placas de acero (2022).

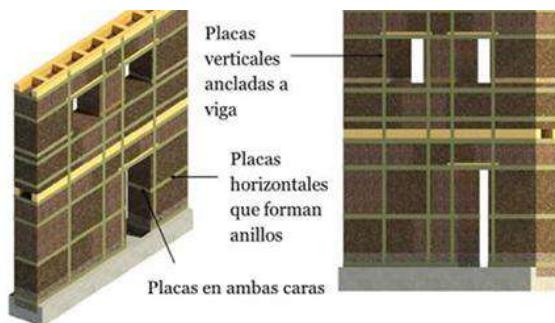


Figura 24. Esquema de reforzamiento de placas de acero (2022).

- **Mallas de acero:**

Se pueden utilizar mallas de acero electro-soldadas o geomallas, que han demostrado ser eficaces en el refuerzo de muros de adobe.

- **Entramados de platinas:**

Se pueden utilizar entramados de platinas de acero con un determinado espaciamiento, que se complementan con un diafragma rígido para mejorar la resistencia.

- **Cadenas y castillos:**

En algunos casos, se pueden incorporar cadenas y castillos con acero de refuerzo para confinar los muros de mampostería, lo que incluye también muros de tapial (Ruiz & Galindo, 2023).

3.4.2 FIBRAS NATURALES

Las fibras naturales, se pueden usar como refuerzo en la construcción de tapiales, mejorando la resistencia y durabilidad de los muros. La incorporación de estas fibras, a través de técnicas como la inclusión en la mezcla de tierra o la creación de refuerzos internos, puede aumentar la resistencia a la tracción y reducir la tasa de agrietamiento (Mora Espinosa & Ramón Valencia, 2019).

Fibras más utilizadas en la construcción:

- **Paja:**

Es una de las fibras más comunes y accesibles para reforzar el tapial. La paja ayuda a evitar la contracción y fisuración de la tierra al secarse, mejorando la resistencia del tapial.



Figura 27. Fibra de paja (2024).



Figura 26. Fibra de palmera datilera (2020).

- **Fibras de palmera datilera:**

Las fibras de la palmera datilera, especialmente la palmera datilera, se han utilizado para reforzar materiales de tierra cruda, como el tapial.

- **Bambú:**

El bambú, con su estructura fibrosa y resistente, puede ser utilizado como refuerzo en la construcción de tapial.



Figura 28. Fibra de Yute (2020).



Figura 29. Fibra de bambú (2022).

- **Cáñamo y Yute:**

Estas fibras liberianas (fibra que se encuentra en la corteza del tallo de ciertas plantas) también pueden ser utilizadas para mejorar la resistencia y durabilidad del tapial.

- **Otras fibras:**

Existen otras fibras naturales que pueden ser utilizadas, como el lino, el kenaf, el ramio, entre otras.

3.4.3 POLÍMEROS

Los polímeros pueden usarse para reforzamiento de tapial, especialmente los polímeros naturales o biopolímeros. Algunos ejemplos incluyen la goma xantana, el extracto de cabuya y el polímero de la penca de tuna, que pueden mejorar la resistencia a la humedad y la resistencia mecánica de los bloques de tapia (Canales Barrera, 2022).

- **Goma xantana:**

Este biopolímero, derivado de bacterias, ha mostrado una excelente resistencia estructural y a la humedad, además de una huella de carbono baja. Sin embargo, su costo de producción es relativamente alto.



Figura 31. Goma Xantana (2018).



Figura 30. Cabuya (2020).

- **Extracto de cabuya y polímero de la penca de tuna:**

Estos materiales, también naturales, son una opción económica y con buen comportamiento frente a la humedad, además de su capacidad para secuestrar carbono.

- **Otros polímeros naturales:**

La investigación en biopolímeros está explorando otros materiales naturales, como los polisacáridos, que pueden mejorar la resistencia de los bloques de tapia a los esfuerzos mecánicos y a la humedad (Canales Barrera, 2022).

3.4.4 FIBRAS SINTÉTICAS

Las fibras sintéticas se pueden utilizar en tapiales como refuerzo, mejorando la resistencia, durabilidad y estabilidad del muro. Estas fibras, a menudo hechas de polipropileno, ayudan a prevenir el agrietamiento y la erosión, especialmente en áreas con alta humedad o cambios de temperatura.

Tipos de fibras sintéticas:

- **Polipropileno:**

Es uno de los tipos más comunes y económicos, y es resistente a los álcalis del cemento y a la descomposición biológica.

- **Nylon:**

Ofrece mayor resistencia y durabilidad que el polipropileno, pero puede ser más caro.

- **Polietileno:**

Es una opción más flexible que el polipropileno y puede ser útil en áreas donde hay movimiento del suelo.

- **Malla:**

La malla de fibra de vidrio se utiliza en la construcción para reforzar estructuras, prevenir fisuras, mejorar la adhesión de revestimientos y aumentar la resistencia de impermeabilizaciones.



Figura 33. Fibra de polipropileno (2020).



Figura 32. Malla fibra de vidrio (2018).

3.5 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL TAPIAL

Características Mecánicas Detalladas:

- **Densidad:**

La densidad del tapial varía entre 1800 y 2100 kg/m³ (Suarez Bandonedo, 2006).

- **Resistencia a Compresión:**

La resistencia a compresión es de aproximadamente 15 kg/cm², aunque puede variar según el tipo y composición de la tierra.

- **Comportamiento No Lineal:**

El tapial presenta un comportamiento no lineal bajo carga, lo que dificulta la obtención precisa del módulo de elasticidad.

- **Ablandamiento:**

Se observa un ablandamiento en el material durante la aplicación de la carga.

- **Resistencia al Impacto:**

El tapial ha sido utilizado en murallas y otras estructuras debido a su alta resistencia al impacto.

- **Inercia Térmica:**

El tapial tiene una excelente inercia térmica, lo que le permite conservar el calor o el frío.

- **Aislamiento Acústico:**

El tapial también ofrece un buen aislamiento acústico.

- **Resistencia a la Rotura:**

La tensión de rotura del tapial depende de factores como el ambiente seco o húmedo, y también se ve afectada por la presencia de una pared de tierra sola (Suarez Bandonedo, 2006).

3.5.1 COMPRESIÓN AXIAL

La compresión axial en tapial se refiere a la resistencia que un muro de tapial tiene a ser aplastado por una fuerza aplicada perpendicularmente a su superficie. Este tipo de fuerza, dirigida en el eje longitudinal del muro, es la más común a la que se ven sometidos los muros portantes. La resistencia a compresión axial del tapial varía, pero suele estar en el rango de 1500 kPa (aproximadamente 15 kg/cm²) como se mencionó anteriormente.

Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Los muros de tapial son estructuras portantes que soportan cargas de peso. La compresión axial se produce cuando la estructura debe soportar una fuerza que intenta comprimir el muro en su eje longitudinal.



Figura 34. Ensayo de compresión en muestras de tapial (2024).

3.5.2 ESFUERZOS CORTANTES

Los esfuerzos cortantes en tapias son las tensiones internas que se desarrollan en el material cuando este se somete a fuerzas que tienden a deslizar una parte del muro sobre otra. Estos esfuerzos son críticos para la estabilidad y resistencia del tapial, especialmente bajo cargas sísmicas o de viento (López, Ruiz, & Jerez, 2020).

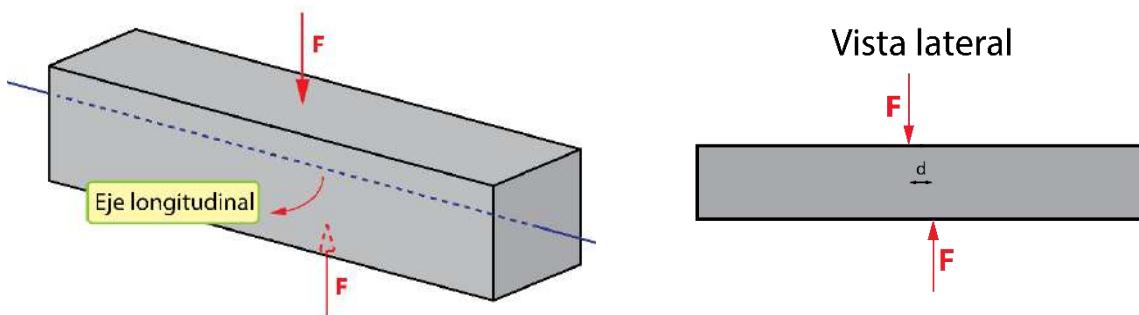


Figura 35. Cargas aplicadas en un esfuerzo cortante (2020).

3.6 CONDICIONES SÍSMICAS DE OAXACA

La región de Oaxaca, comprendida entre los 15.00° y 18.50° de Latitud Norte y los 94.50° y 98.75° de Longitud Oeste, es una de las regiones con más alta sismicidad en México. Esta actividad sísmica está asociada al proceso de subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica (Gobierno, 2017).

3.6.1 TIPO DE FALLAS ESTRUCTURALES EN EL TAPIAL

Las fallas estructurales en tapias, o muros de tierra pisada, pueden ser variadas y dependen de factores como la composición de la tierra, la compactación, la humedad, y las cargas externas (como sismos o erosión). Algunos tipos comunes de fallas incluyen grietas, fracturas, hundimientos, deslizamientos de base, y en algunos casos, incluso el colapso total de la estructura (Urbano Tejada, 2016).

Tipos de fallas estructurales en tapias:

- **Grietas y Fracturas:**

Las grietas son comunes en tapias, especialmente en las esquinas y encuentros de muros, donde se concentran las tensiones. Las fracturas pueden ser más severas y comprometer la integridad del muro.

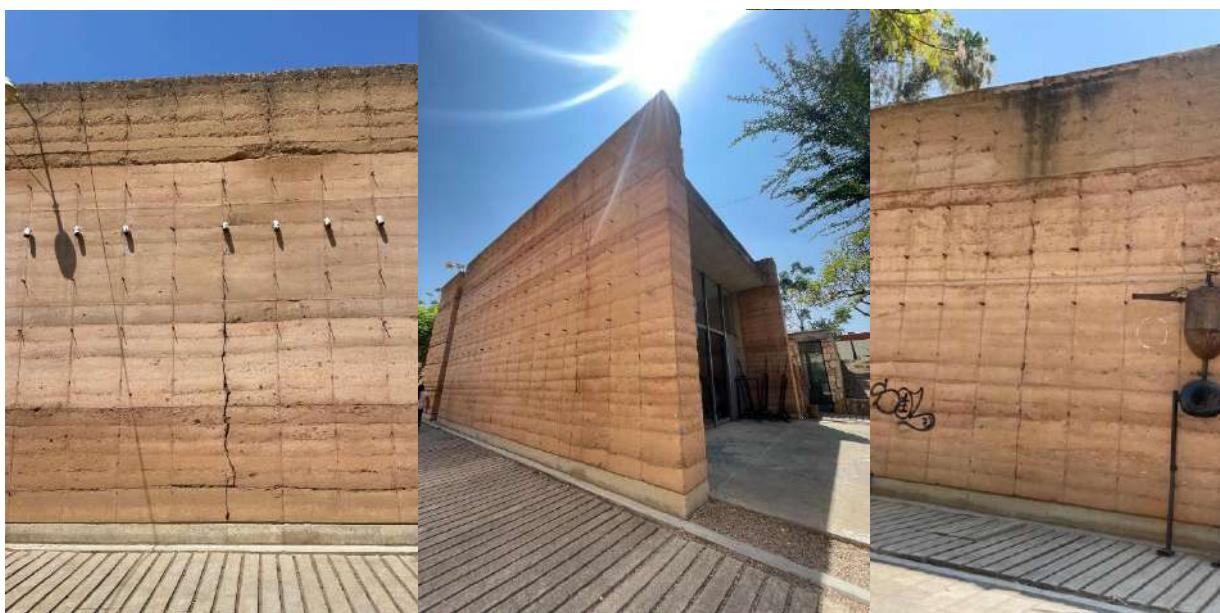


Figura 36. Escuela de Artes de Oaxaca, grietas en los muros de tapial (2024).

- **Hundimientos y Deslizamientos:**

La falta de una base sólida o la erosión de la misma puede causar que el muro se hunda o se desplace, lo que puede generar fallas estructurales adicionales.



Figura 37. Barda de tapial hundida en vivienda de San Andrés Calpan, Puebla (2022).

- **Fallas por Compresión y Pandeo:**

En casos de cargas excesivas o mala compactación, el tapial puede experimentar fallas por compresión o pandeo, especialmente en las partes superiores de los muros.

- **Problemas con la Humedad:**

La humedad persistente, especialmente la humedad de capilaridad, puede deteriorar la estructura del tapial, lo que puede provocar la lesión de aplastamiento y otros problemas.

- **Falla de Conexiones:**

En estructuras donde los tapias se unen a otros elementos (como vigas o columnas), la falta de conexiones adecuadas puede provocar fallas en las uniones.

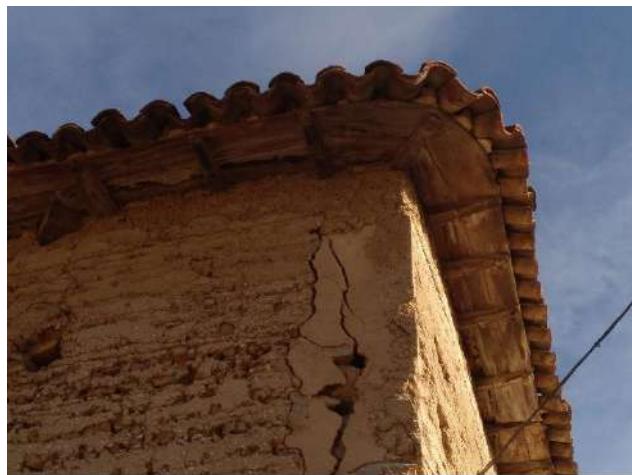


Figura 38. Agrietamiento de tapial por falla de conexión con alero en Belmonte de Gracián, España (2021).

- **Colapso:**

En casos graves, los tapias pueden colapsar debido a la combinación de diferentes factores, como sismos, fallas en la base, o una mala ejecución de la construcción.

Factores que influyen en las fallas:

- **Composición de la Tierra:**

La composición de la tierra utilizada en el tapial (porcentaje de arcilla, arena, grava, etc.) influye en su resistencia y durabilidad.

- **Compactación:**

Una compactación inadecuada puede generar problemas de resistencia y estabilidad del muro.

- **Humedad:**

La humedad puede deteriorar la estructura del tapial, especialmente si es persistente o se produce humedad de capilaridad.

- **Sismos:**

Los movimientos telúricos pueden generar tensiones y esfuerzos que pueden provocar fallas en los tapias (Arno, 2013).

En el apartado de problemática del presente estudio se menciona específicamente los tipos de fallas más presentados en las construcciones de tapial.

3.6.2 SISMICIDAD DE MÉXICO

México es uno de los países del mundo con mayor actividad telúrica, ya que, según estadísticas, se registran más de 90 sismos por año con magnitud superior a 4 grados en la escala de Richter, lo que equivale a un 60% de todos los movimientos telúricos que se registran en el mundo (González, 2025).

La República Mexicana se caracteriza geológicamente por su gran actividad sísmica y volcánica. En el contexto de la Tectónica de Placas, México está ubicado en el llamado Cinturón de Fuego, donde se registra gran parte de los movimientos telúricos a nivel mundial. El país se ubica en la Placa Norteamericana, limitado en su porción sur y oeste, con las placas de Cocos, Rivera y del Pacífico.

La región de Mesoamérica, que abarca México y Centroamérica, se caracteriza por su alta actividad tectónica, resultado de la subducción de la placa de Cocos a lo largo de la Trinchera Mesoamericana. En el sur y oeste de México, la tectónica es

más compleja debido a que es controlada por la subducción de la placa de Cocos bajo las placas de Norte América y del Caribe en el sureste. A su vez, las placas de Norte América y el Caribe tienen un límite transcurrente lateral izquierdo a lo largo de la fosa del Caimán y del sistema de fallas Motagua-Polochic (González , 2025).

El estudio de la actividad sísmica de México comenzó a principios del siglo, sin embargo, los antecedentes históricos de grandes sismos del país fueron registrados en un gran número de documentos. En 1910 se inauguró la red sismológica mexicana y desde esa fecha hasta nuestros días se ha mantenido una observación continua de los temblores cuyos registros se conservan en la Estación Sismológica de Tacubaya y otras instalaciones del Instituto de Geofísica de la UNAM, encargada de operar el Servicio Sismológico Nacional -SSN- y su red de 35 estaciones sismológicas. El SSN reporta en el país, en promedio, la ocurrencia de 4 sismos por día de magnitud $M > 3.0$ (SMG, 2017).

En las figuras 39, 40, 41, 42 y 43, se presentan los mapas de sismicidad anual de la República Mexicana.

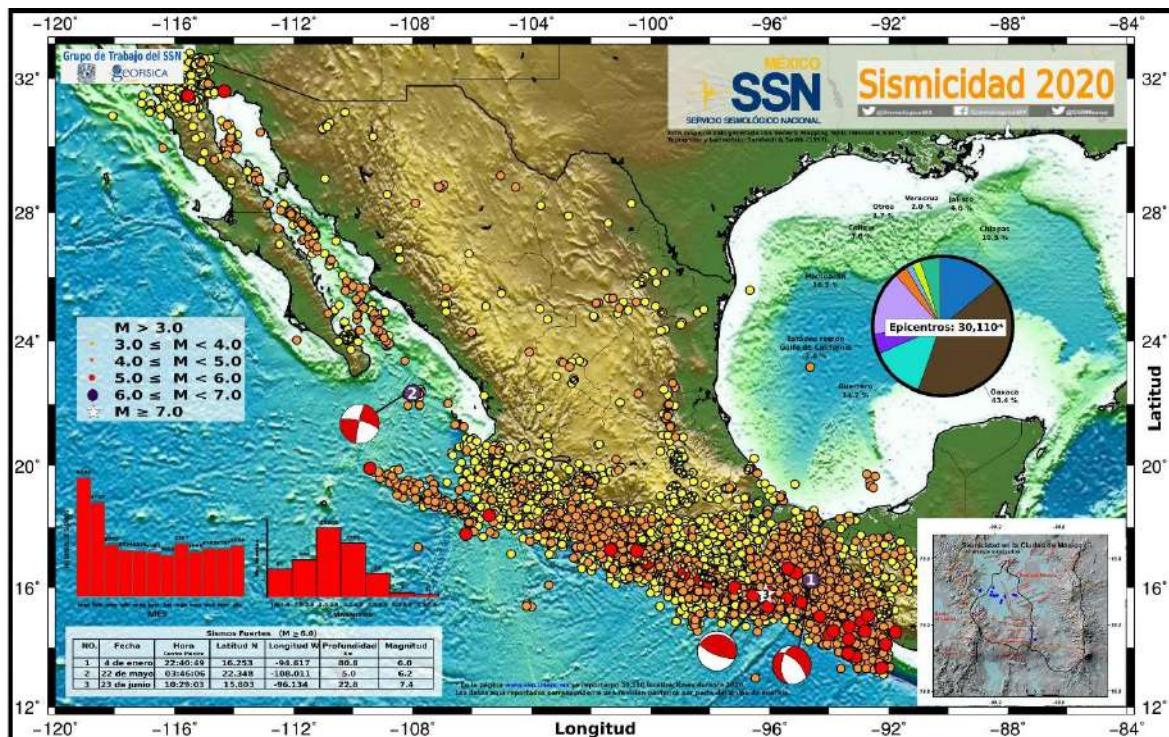


Figura 39. Mapa anual de sismicidad 2020 Servicio Sismológico Nacional SSN (2021).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

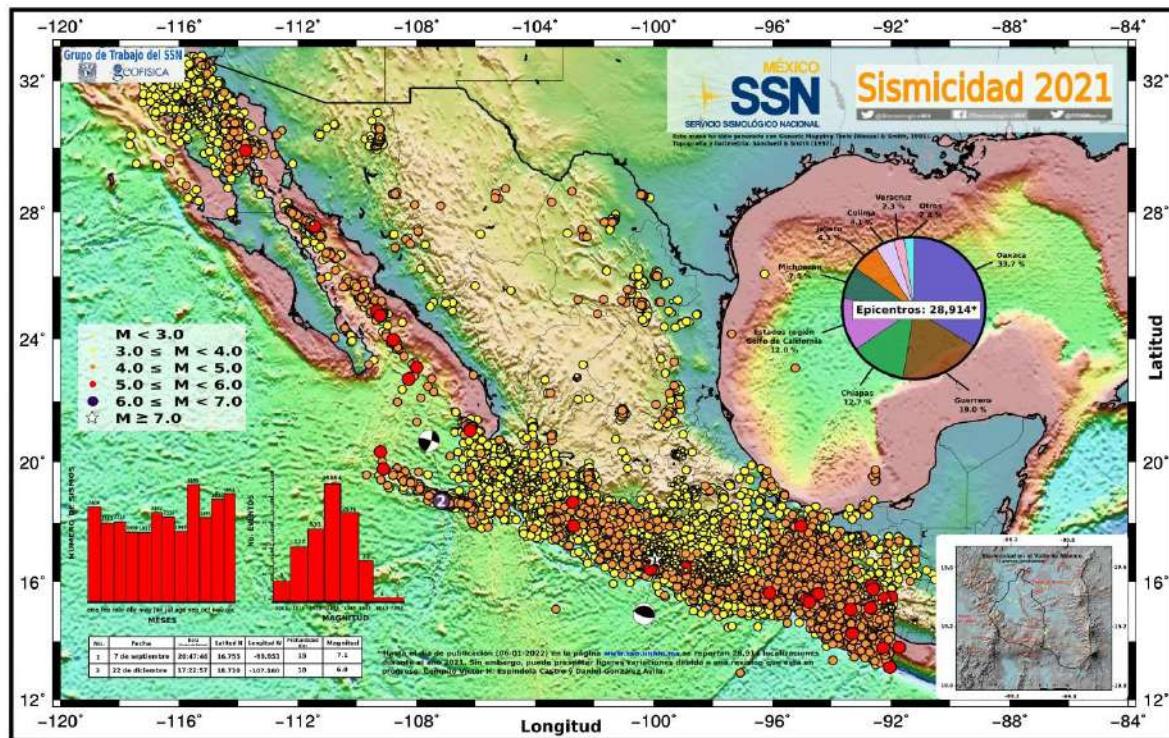


Figura 40. Mapa anual de sismicidad 2021 Servicio Sismológico Nacional SSN (2022).

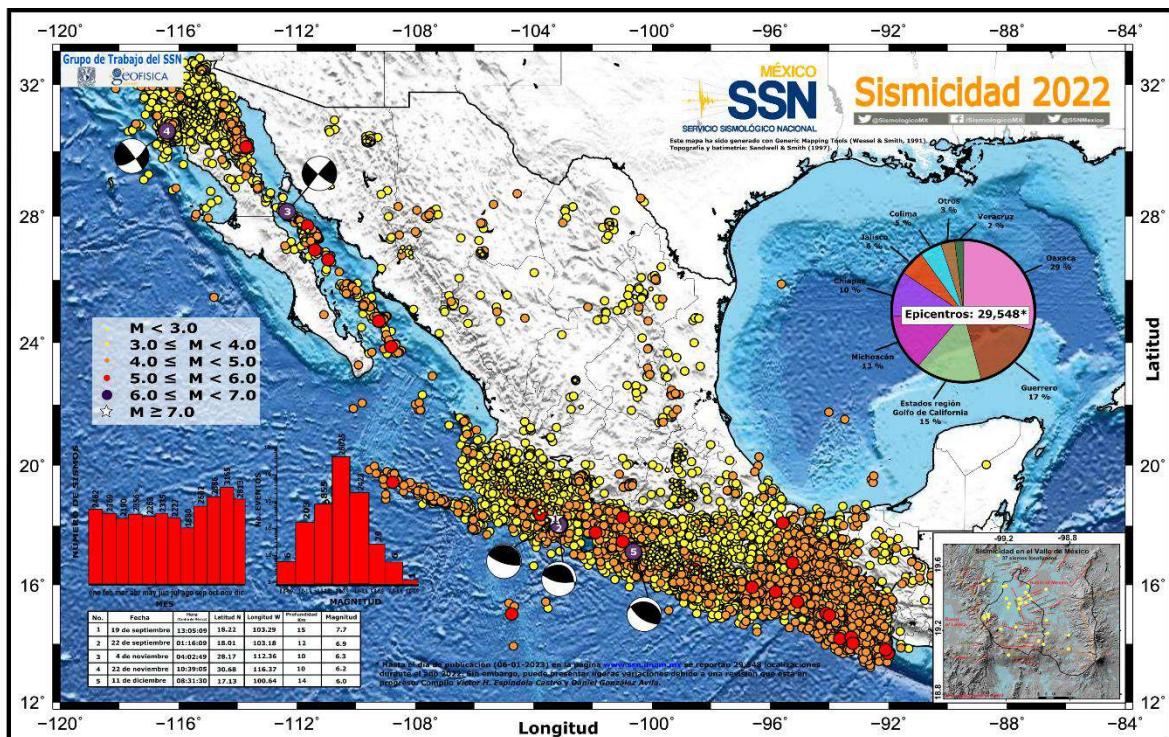


Figura 41. Mapa anual de sismicidad 2022 Servicio Sismológico Nacional SSN (2023).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

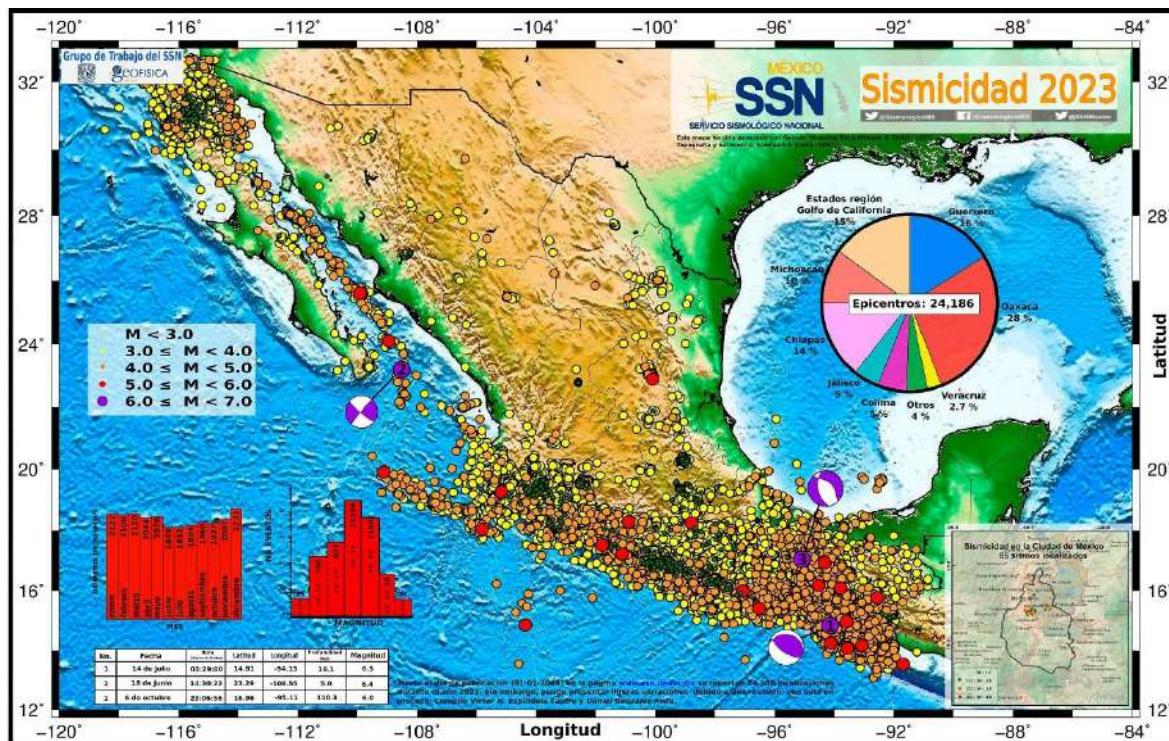


Figura 43. Mapa anual de sismicidad 2023 Servicio Sismológico Nacional SSN (2024).

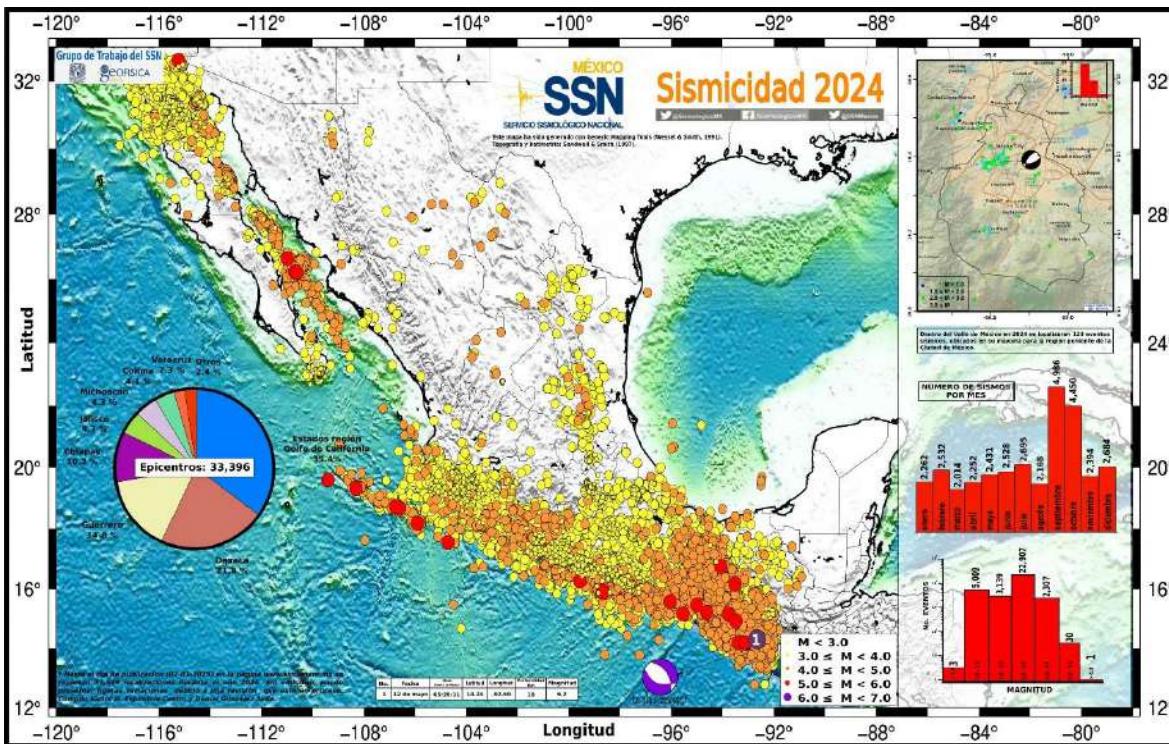


Figura 42. Mapa anual de sismicidad 2024 Servicio Sismológico Nacional SSN (2025).

México registra una gran cantidad de sismos a lo largo del año, incluyendo aquellos de magnitud moderada a grande, lo que se logra observar en los mapas anteriores que la mayoría de los sismos se concentran en la costa del Pacífico, el Istmo de Tehuantepec (Oaxaca) y el Golfo de California.

3.6.3 SISMICIDAD DEL ESTADO DE OAXACA

El estado de Oaxaca presenta una alta sismicidad debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde la Placa de Cocos subduce bajo la Placa de Norteamérica (Civil, 2019).

Como se había mencionado antes, Oaxaca es uno de los estados con mayor sismicidad en la República Mexicana, registra aproximadamente el 25% de los sismos del país (SSN, 2023). El origen de esta sismicidad se debe al contacto convergente entre dos importantes placas tectónicas en donde la placa de Cocos subduce bajo la placa de Norteamérica. La interacción entre estas dos placas tiene lugar en la costa del Pacífico desde Chiapas hasta Jalisco (figura 44).

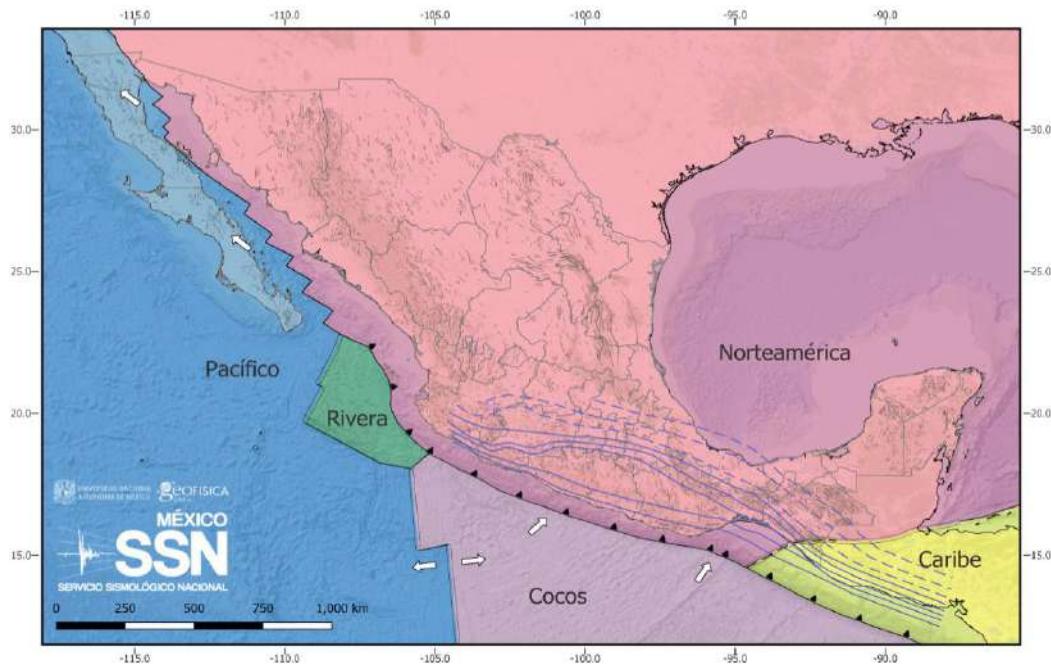


Figura 44. Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano Servicio Sismológico Nacional SSN (2023).

La república mexicana se dividiera en 4 zonas sísmicas dependiendo de la ocurrencia con la que suceden los sismos, esto se realizó con fines de diseño antisísmico, utilizando catálogos de sísmicos, grandes sismos históricos y registros de aceleración del suelo. El resultado 4 zonas con las siguientes características y en la figura 45 se presentan en el estado de Oaxaca:

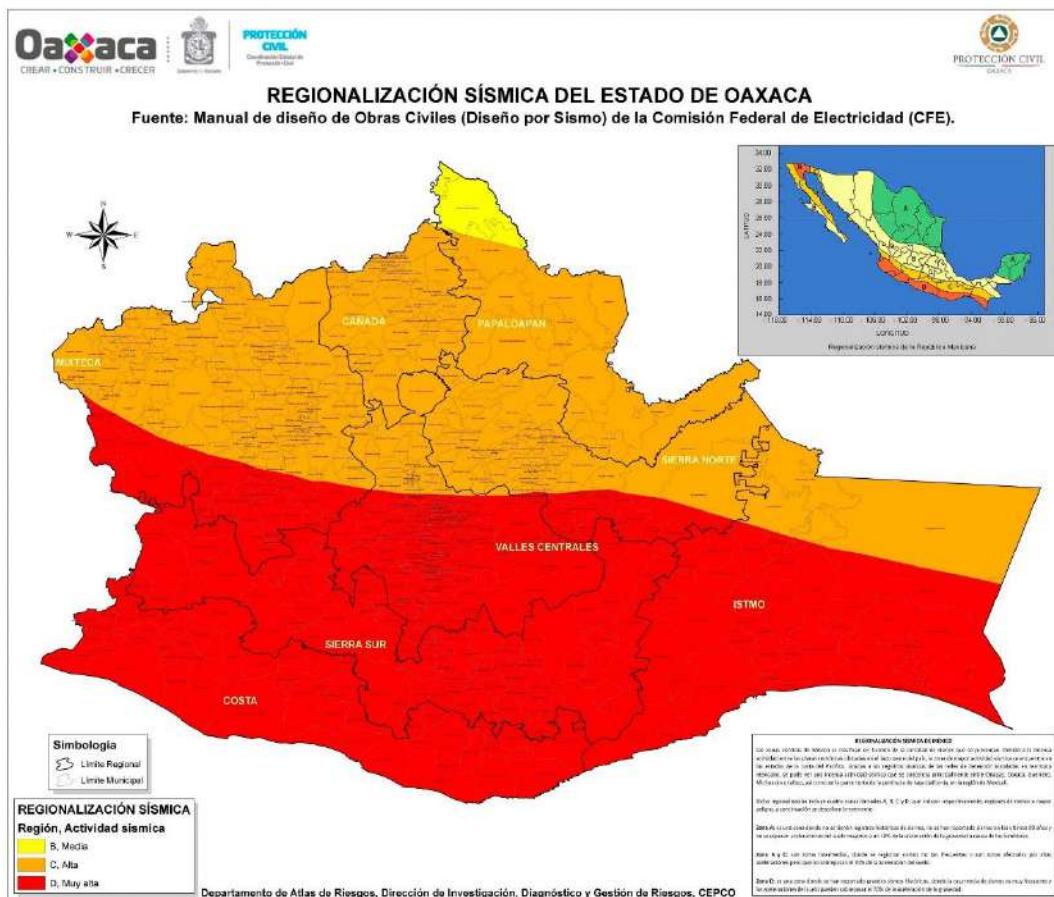


Figura 45. Regionalización de sísmica del estado de Oaxaca (2019).

La zona A. Zona de baja sismicidad. Es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.

La zona B. Zona de sismicidad media. Es una zona de moderada intensidad, pero las aceleraciones no alcanzan a rebasar el 70% de la aceleración del suelo.

La zona C. Zona de alta intensidad. En esta zona hay más actividad sísmica que en la zona B, aunque sus aceleraciones tampoco presentan aceleraciones mayores al 70%.

La zona D. Zona de muy alta intensidad. En esta zona es donde se han originado los grandes sismos históricos, donde la ocurrencia es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración del suelo. El estado de Oaxaca se encuentra ubicado en su mayoría sobre la zona D abarcando poco más del 50% de su territorio desde parte sur hacia la parte media del estado, y de la parte media hacia el norte se encuentra en la zona C, ya casi en el límite norte abarca una pequeña porción de la zona B (Civil, 2019).

IV. HIPÓTESIS

El diseño de bloques de tapial con energía de compactación y refuerzos adicionales (fibras sintéticas y/o fibras naturales) aumenta la resistencia a la compresión de muros ER.

V. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Definir las mezclas pertinentes de energía de compactación con fibras naturales y/o sintéticas para mejorar la resistencia a compresión y reducir la posibilidad de fallo de los BTC.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las diferentes propuestas de diseño de tapial denominados como BTC, realizar probetas de referencia sin reforzamiento, probetas con reforzamiento de fibras naturales y sintéticas.
- Definir cuáles son los porcentajes de materiales adecuados para la construcción de los BTC.
- Medir la resistencia a compresión de los Blocks de tapial reforzados con fibras naturales y/o fibras sintéticas.

VI. METODOLOGÍA

El proyecto se realizará en 4 etapas:

- Determinación de los parámetros del suelo arcilloso, agregado grueso, fibras naturales y sintéticas.
- Modelo BTC- Dosificaciones del bloque de tapial
- Análisis experimental
- Experimentación final

El proceso metodológico se presenta en la figura 46:

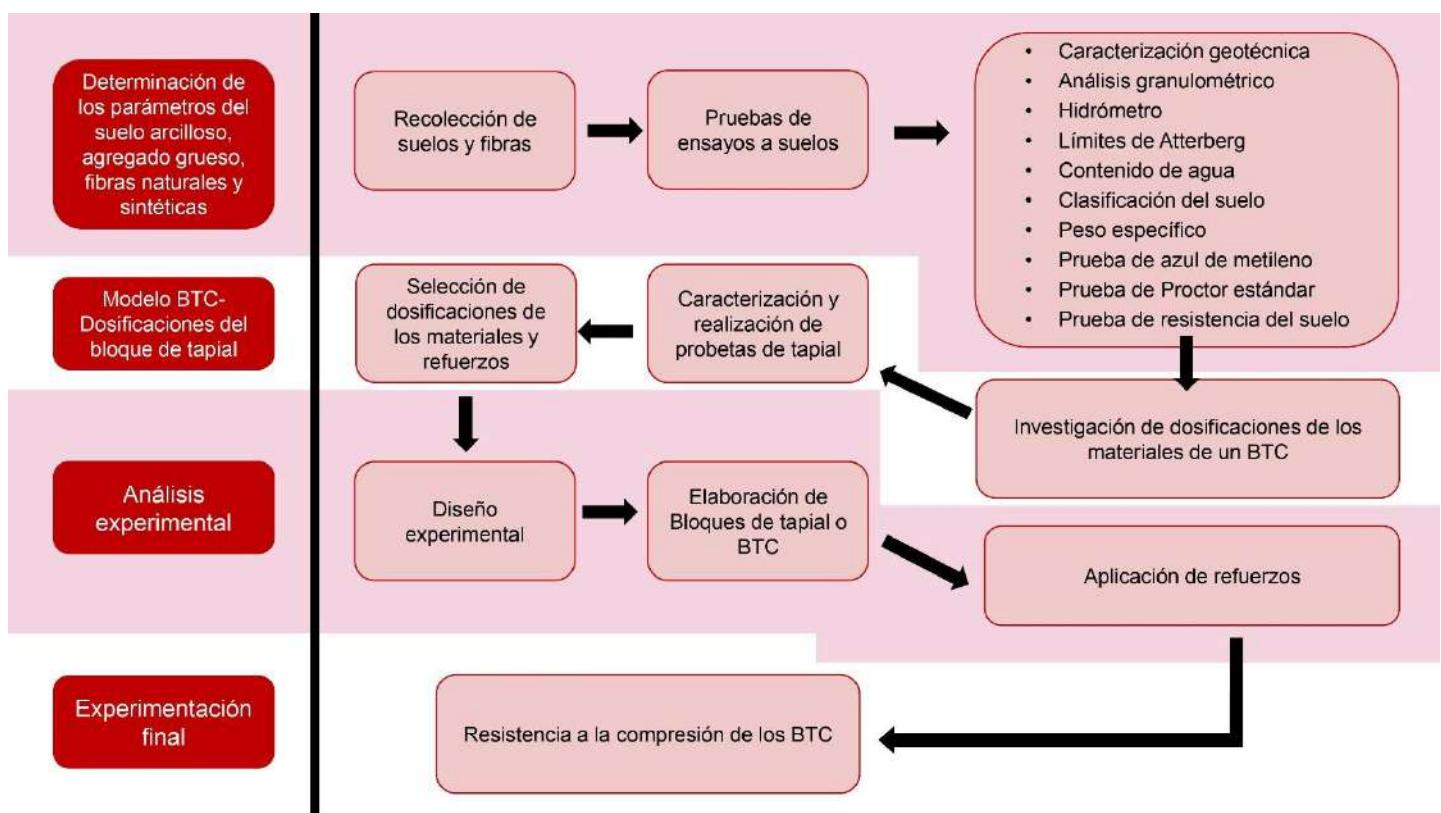


Figura 46. Proceso metodológico del proyecto (2025).

6.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO ARCILLOSO

6.1.1 MUESTREO DE SUELO

Para la recolección de las muestras de suelo, se realizó una investigación de las zonas del estado de Oaxaca en donde se ha construido con tapiales, abarcando dos regiones: Valles Centrales y La Cuenca del Papaloapan. Para el Suelo de Tuxtepec Oaxaca (STO) las coordenadas del terreno son 18°05'34.1" latitud norte y 96°12'45.0" longitud oeste, para el Suelo de Oaxaca Juárez (SOJ) las coordenadas son 17°04'16.2" latitud norte y 96°41'43.9" latitud oeste.

Estado de Oaxaca

Está ubicado en la porción sureste de México, específicamente en el suroeste del país. Limita al norte con los estados de Puebla y Veracruz, al sur con el Océano Pacífico, al este con Chiapas y al oeste con Guerrero. Se encuentra entre las coordenadas geográficas 18° 39' y 15° 39' de latitud norte, y 93° 52' y 98° 32' de longitud oeste. Su ubicación a nivel nacional se presenta en la figura 47.

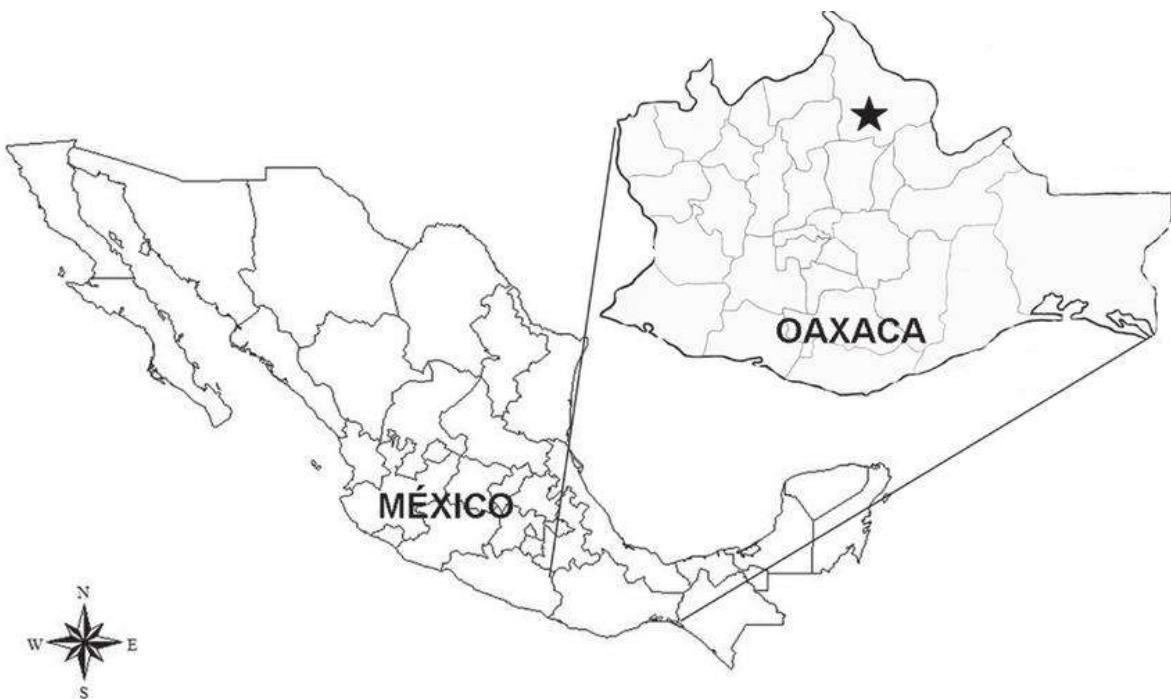


Figura 47. Localización geográfica del estado de Oaxaca (2020).

Tradicionalmente, el Estado estaba dividido en siete regiones, a saber: el Valle, la Sierra, la Costa, la Cañada, las Mixtecas Alta y Baja, el Papaloapan y el Istmo. Como regiones se consideraban también, desde tiempos inmemoriales, la Chinantla, la Zona Trique, la Mixe, la Chontalpa, el Rincón, la Providencia, el Bule y la Montaña.

La división política actual del Estado es la más complicada del país, ya que está formada en ocho regiones geográficas y culturales, con 570 municipios divididos en 30 distritos rentísticos que albergan a poco más de 11 mil comunidades.

Las regiones son: Cañada, Costa, Istmo, Mixteca, Papaloapan, Sierra Sur, Sierra Norte y Valles Centrales (Estado, 2021).

Oaxaca presenta gran variedad climática, así, en su territorio hay climas cálidos, semicálidos, semifríos, semisecos y templados.

Los climas cálidos en conjunto abarcan poco más de 50% de la superficie total de la entidad, se producen en las zonas de menor altitud (del nivel del mar a 1.000 m.), se caracterizan por sus temperaturas medias anuales que varían de 22 °C a 28 °C y su temperatura media del mes más frío es de 18 °C o más.

Los climas templados, subhúmedo con lluvias en verano en mayor proporción y con abundantes lluvias en verano en áreas más reducidas, cubren aproximadamente 19% de la superficie del estado; se manifiestan en los terrenos cuya altitud es de 1700 a 3.000 m se localiza hacia el centro y noroeste, pero también hacia el sur en la costa (INEGI, 2021).

Según los datos que arrojó el Censo de Población y Vivienda 2020 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con fecha censal del 2 al 27 de marzo del 2020, el estado de Oaxaca contaba hasta ese año con un total de 4 132 148 habitantes. De dicha cantidad, 1 975 167 eran hombres y 2 156 981 eran mujeres.

La mayor parte de la población de Oaxaca (aproximadamente el 65%) se asienta en las zonas rurales, a excepción de las regiones de Valles Centrales, Cuenca del Papaloapan y el Istmo que es donde se acentúan las grandes urbes del estado: Oaxaca de Juárez en los valles centrales, Juchitán y Salina Cruz en el Istmo de Tehuantepec, Puerto Escondido y Pinotepa en la costa, Tuxtepec y Loma Bonita en el Papaloapan.

Ciudad de Tuxtepec, Oaxaca

Tuxtepec, Oaxaca se ubica en la parte norte del estado, específicamente en la Cuenca del Papaloapan, que limita con el estado de Veracruz. Geográficamente, se encuentra en la vertiente del Golfo de México, con una altitud de aproximadamente 11 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas son 18°05'18"N 96°07'31"O.

El área comprendida por este municipio representa el 0.65% de la superficie del estado de Oaxaca. Su situación geográfica brinda una disposición estratégica ya

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

que al Norte colinda con: Santa Cruz, Veracruz. Al Sur con: Valle Nacional, Santiago Jocotepec, Santa María Jacatepec y San José Chiltepec; Oaxaca. Al Este con: Loma Bonita, Oaxaca. Al Oeste con: los Municipios de San Lucas Ojitlán y Nuevo Soyaltepec, Oaxaca. Tuxtepec pertenece a la región del Papaloapan (INEGI, 2021).

El Municipio cuenta con 71 Agencias Municipales y 80 Colonias, Tuxtepec es una Ciudad moderna en donde se puede vivir con todas las comodidades que da el progreso, cuenta con numerosas Instituciones Bancarias, grandes Centros de Diversión, Servicios Médicos Oficiales y Particulares, magníficos medios de transportes y de comunicación, situándolo como centro comercial más importante de la Cuenca del Papaloapan.

La ubicación a nivel estatal de Tuxtepec se presenta en la figura 48.

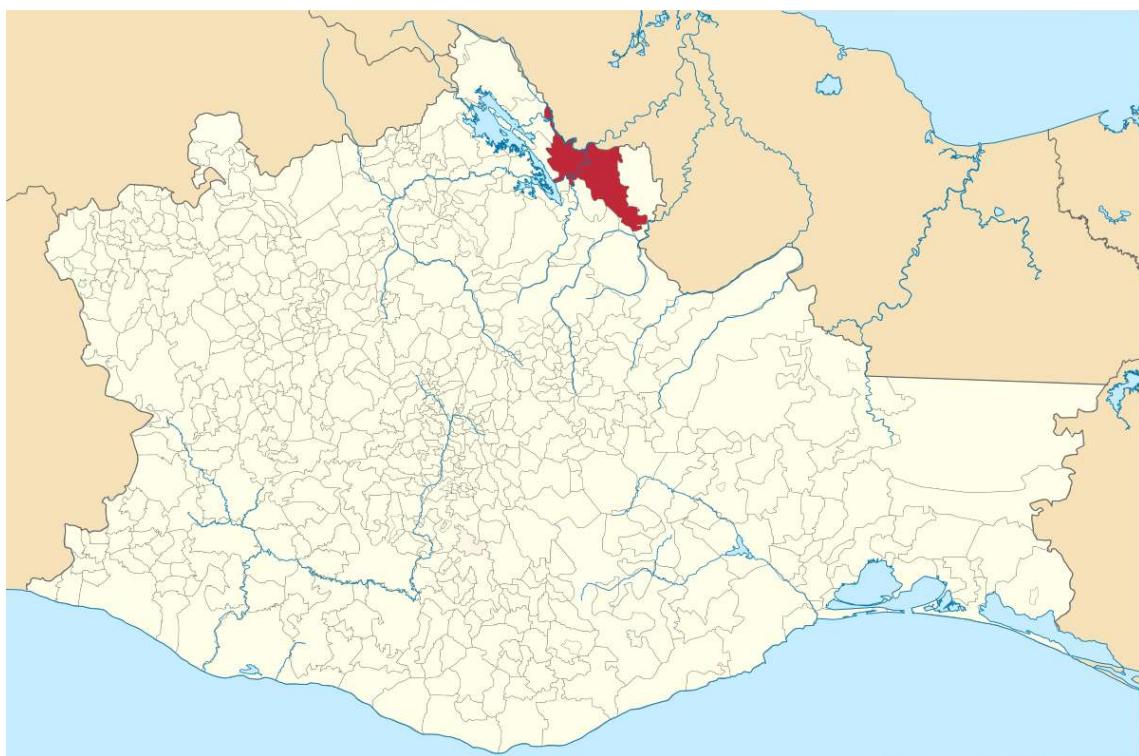


Figura 48. Localización geográfica de Tuxtepec, Oaxaca (2012).

Rocas y suelos

En Oaxaca, las rocas predominantes incluyen rocas metamórficas, ígneas (volcánicas y plutónicas) y sedimentarias. Se pueden encontrar tanto rocas más antiguas como del Complejo Oaxaqueño (gneises, cuarzo, serpentinas, esquistos, grafito) como intrusiones de rocas ígneas como granitos (Batolito de Chiapas, La Mixtequita, Juchatengo). Las rocas volcánicas (basalto, andesita, riolita) también son comunes y cubren grandes áreas. Además, se identifican rocas sedimentarias como caliza y mármol (INEGI, 2020). En la figura 49 se observan las rocas que más predominan en algunas zonas del estado.



Figura 49. Rocas que predominan en el estado de Oaxaca (2024).

Las unidades de suelo presentes en el estado, por orden de dominancia, son: Regosol, litosol, cambisol, acrisol, luvisol, feozem, rendzina, vertisol, solonchak, castañozem, nitosol, fluvisol y gleysol.

Los regosoles ocupan el primer lugar de dominancia con 33.09% de la superficie estatal. Se caracterizan por presentar un horizonte A ócrico, o bien, un horizonte gléyico a más de 50 cm de profundidad. Cuando la textura es arenosa, estos suelos carecen de láminas de acumulación de arcilla, así como de indicios del horizonte cámbico u óxico. No están formados de materiales producto de la intensa remoción del horizonte superior, en solución o suspenden (Civil, 2019).

Los litosoles son suelos menores de 10 cm de profundidad que están limitados por un estrato duro, continuo y coherente. La delgada capa superficial es, por definición, un horizonte A ócrico. Ocupan 20.04% de la superficie estatal, principalmente en topoformas de sierras de la porción noroeste y suroeste del estado (INEGI, 2020).

Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Los cambisoles son suelos que se caracterizan por presentar un horizonte B cámbico; el horizonte cámbico es un horizonte alterado que se encuentra por lo menos a 25 cm de la superficie, su color es semejante al del material parental que le da origen, pero con más estructura de suelo que de roca, pues tiene consistencia friable y sin acumulación significativa de arcilla. Este tipo de suelos ocupa 16.18% de la superficie estatal y son de origen residual formados a partir de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, como también de origen aluvial (Civil, 2019).

En la figura 50 se presenta los suelos dominantes en estado de Oaxaca.

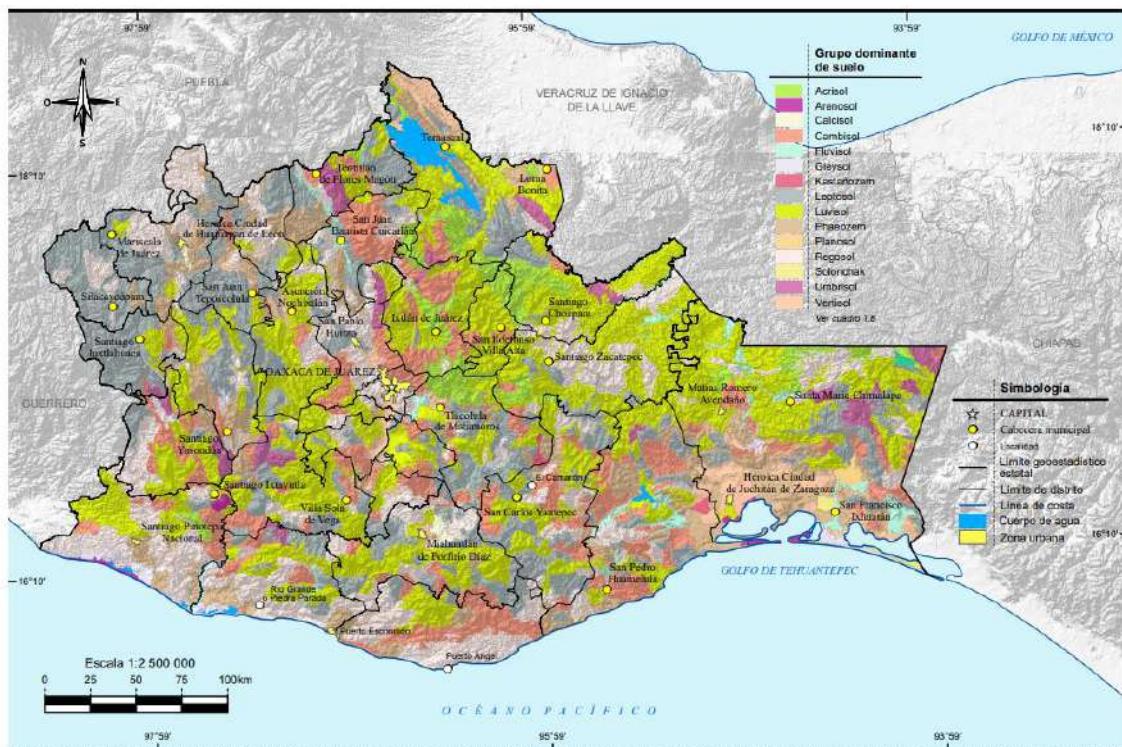


Figura 50. Suelos que predominan en el estado de Oaxaca (2021).

Obtención de los suelos

El suelo STO se obtuvo de un terreno en las orillas de la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca donde se extrajo por medios manuales a una profundidad de 2 m. La ubicación del suelo se muestra en la figura 51.

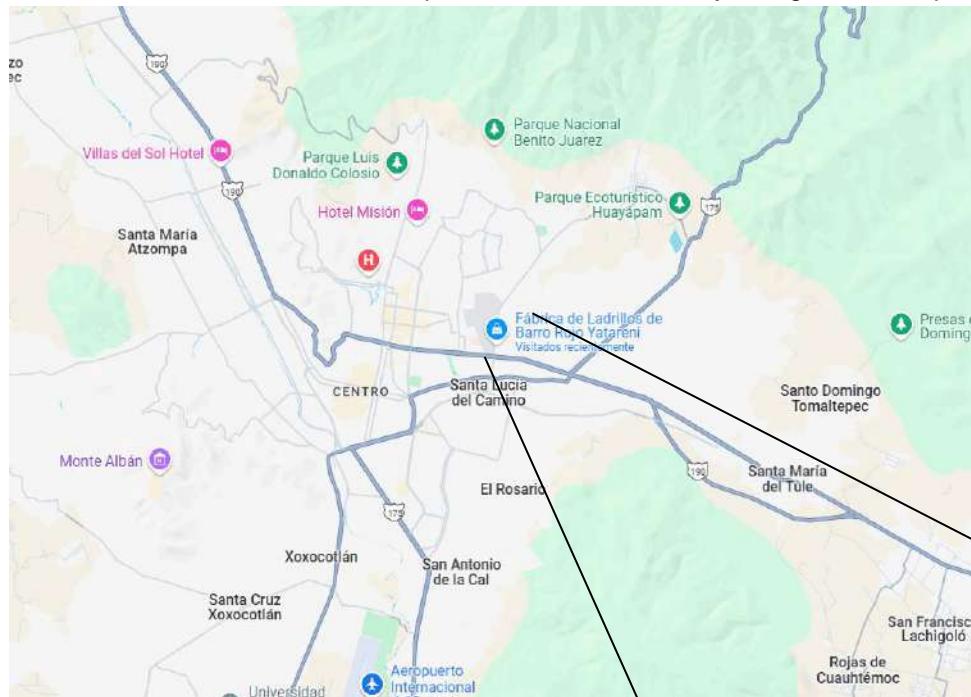
El suelo SOJ se obtuvo de terrenos de una fábrica de blocks de tapial y ladrillos de barro en la ciudad de Oaxaca, se extrajo de forma mecánica a una profundidad de 3 m. La ubicación del suelo se muestra en la figura 52.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento



Figura 51. Ubicación del suelo STO (2024).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención



Al Panteón Jdn. Kilómetro 0.20,
Centro, 68000 Oaxaca de Juárez,
Oax.



Figura 52. Ubicación del suelo SOJ (2024).

6.1.2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

La presente investigación se basa en que los suelos utilizados en la construcción de viviendas con tapial tienen cierta plasticidad, pero estos suelos no tienen una caracterización geotécnica precisa, por lo que es necesario realizar diferentes pruebas, las cuales serían: prueba de granulometría, límites de consistencia, contenido de agua y determinación del peso específico de la masa del suelo.

La caracterización geotécnica es fundamental para cualquier proyecto, en este caso se estará trabajando con dos suelos de distinta ubicación, para comprender las propiedades del suelo, lo que es crucial para diseñar los bloques de tierra comprimida.

6.1.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El análisis granulométrico consiste en la separación de las partículas de suelo por rangos de tamaños, haciendo uso de mallas o tamices con aberturas cuadradas. Mediante procesos de agitado se lleva a cabo la separación de las partículas en porciones, las cuales se pesan expresando dicho retenido como porcentajes en peso de la muestra total y aunque se considera físicamente imposible determinar el tamaño exacto de cada partícula, la prueba de granulometría si permite agruparlas por rangos de tamaño. Universalmente se ha establecido la malla No. 200 (0,075mm) como medida divisoria en la clasificación de suelos; finos y gruesos (University, 2023).

a) Suelo retenido en el tamiz No. 10 (2mm)

- Se prepara la serie de tamices a utilizar. Teniendo en cuenta la Tabla 1, se tomarán los tamices desde el No. 10 hasta el tamiz de 3".

- El material que ha sido definido y preparado para realizar el ensayo se depositó desde la parte alta de la torre de tamices y se ajusta la tapa superior.

- Bien sea de manera mecánica o de manera manual se lleva a cabo el proceso de tamizado. Si el proceso de tamizado es manual, se recomienda realizar movimientos que produzcan la suficiente vibración y el desplazamiento de las partículas de un lugar a otro a través de las mallas de los tamices.

- Con ayuda de recipientes para medición y de una balanza de precisión 0,01 g se procederá realizar las pesadas de los materiales retenidos en cada malla.

- Esta operación se realizará desmontando primero los tamices de mayor diámetro, depositando su contenido en recipientes puestos sobre la balanza y registrando el peso del material (University, 2023).

b) Suelo pasa tamiz No. 10 (2mm)

- En un recipiente cilíndrico de capacidad conocida, se agregan aproximadamente 250 ml de agua y se mezcla el suelo en el mismo. Adicionalmente se puede agregar 125 ml de hexametafosfato el cual actuará como agente dispersante.
- Una vez se produzca la mezcla y se esté seguro de que se presente humedecimiento superficial de las partículas, se dejara reposar la mezcla por un periodo de 12 horas como mínimo.
- Terminado el periodo de saturación, se debe depositar la mezcla sobre el tamiz No. 200, realizando el proceso de lavado que se explicó en el procedimiento a.
- Una vez se haya logrado el lavado de la muestra, esta se deposita en un nuevo recipiente. Se presentará adherencia de las partículas a la malla del tamiz, por lo cual se debe hacer uso de agua destilada para asegurarse del traspaso de la totalidad de la muestra.
- La muestra se lleva al horno para secado a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5$, hasta lograr una masa constante. Posteriormente se dejará secar a temperatura ambiente o de contar con un desecador, se introducirá el recipiente con la mezcla allí.
- Una vez se encuentra el material a temperatura ambiente, se preparará la serie de tamices desde el No. 20 hasta el No. 200 y se dispone por la parte superior (Tabla 6).
- Bien sea de manera mecánica o de manera manual se lleva a cabo el proceso de tamizado. Si el proceso de tamizado es manual, se recomienda realizar movimientos que produzcan la suficiente vibración y el desplazamiento de las partículas de un lugar a otro a través de las mallas de los tamices (University, 2023).

Tabla 6. Número de mallas

TAMIZ	DIÁMETRO (mm)	TAMIZ	DIÁMETRO (mm)
3"	76.20	10	2.000
2½"	63.50	20	0.840
2"	50.80	40	0.420
1½"	38.10	50	0.297
1"	25.40	60	0.250
3/4 "	19.05	70	0.210
1/2 "	12.70	80	0.180
3/8 "	9.53	100	0.149
No. 4	4.750	200	0.075

Cálculo:

- Porcentaje Retenido

$$\%Retenido = \frac{Mr}{MT} * 100$$

Donde:

Mr: Masa retenida en el tamiz

MT: Masa total

- Porcentaje Retenido Acumulado

%Retenido Acumulado = Suma de porcentajes mayores o iguales

- Porcentaje que Pasa

$$\%que\ pasa = 100 - \%retenido\ acumulado$$

- Coeficiente de Uniformidad

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde:

D60: Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 60 %.

D10: Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 10 %.

-Coeficiente de Curvatura

$$Cu = \frac{D^{30}}{D_{10}*D_{60}}$$

Donde:

D60: Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 60.

D10: Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 10.

D30: Tamaños de las partículas del suelo en milímetros, que en la gráfica de la composición granulométrica corresponden al 30.

- Curva granulométrica

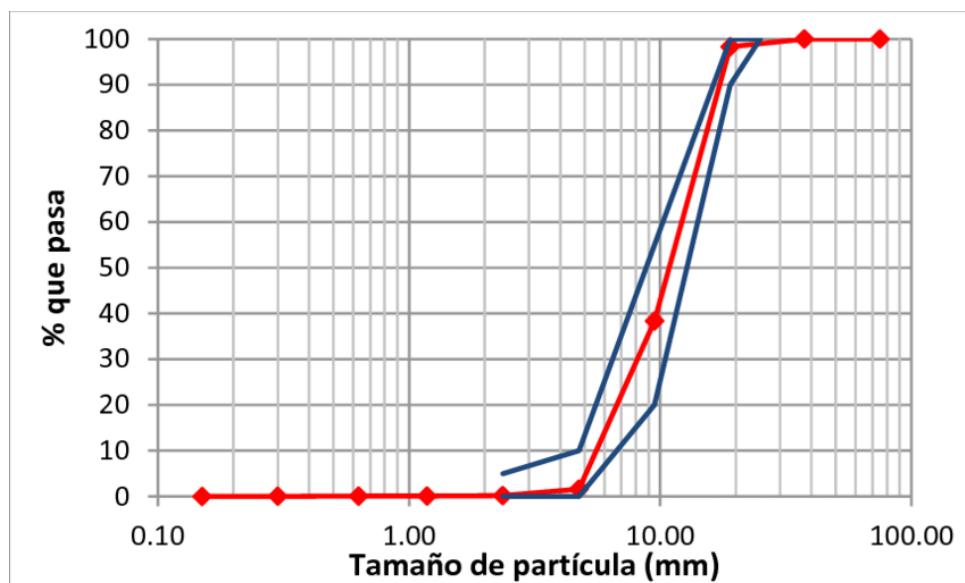


Figura 53. Número de mallas (2018).

La curva granulométrica es una representación gráfica que muestra la distribución de tamaño (figura 53). Esta curva permite visualizar la proporción de cada tamaño de partícula presente en el material (Barbeta Solá, 2002).

6.1.4 HIDRÓMETRO

El hidrómetro es un instrumento utilizado en el ensayo de granulometría de suelos, especialmente para determinar la distribución de tamaños de partículas de grano fino que pasan por un tamiz de 75 micrones. Este método mide la velocidad de sedimentación de partículas en una suspensión acuosa, lo que permite determinar la proporción de limos y arcillas en una muestra de suelo (University, 2023).

a) Por floculante.

Se agrega el equivalente al 5% de floculante con respecto al peso del suelo seco. El floculante que posteriormente fue agitado en el vaso de vidrio se vierte en el cilindro de sedimentación graduado.

Se toma una lectura del cilindro graduado cuando se introduce el hidrómetro en 0, antes de agregar el floculante al agua.

Después se toma otra lectura con el floculante y se calcula la diferencia de lecturas del cilindro de sedimentación graduado (Juárez Badillo, 2005).

b) Por menisco.

Se introduce el hidrómetro en el cilindro de sedimentación con agua para observar la altura a la que el menisco se levanta. La lectura se debe realizar en la parte superior del menisco.

c) Por inmersión.

Se toma la lectura del agua en el cilindro de sedimentación antes de introducir el hidrómetro.

Se introduce el hidrómetro y se vuelve a tomar la lectura. Se el volumen de agua desplazado por el hidrómetro (García, Castro, & Flores, 2023).

d) Por temperatura

La corrección por temperatura se hace por medio de la siguiente gráfica:

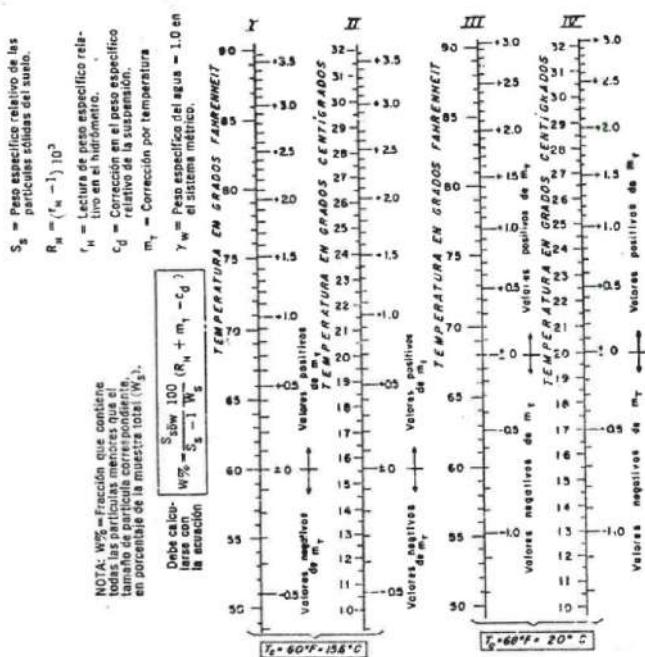


Figura 54. Gráfica de corrección por temperatura para hidrómetros calibrados (2005).

6.1.5 LÍMITES DE ATTERBERG

Los límites de Atterberg son una medida básica del contenido crítico de agua de suelos de grano fino, como limo y arcilla, a medida que pasan de sólido a líquido. Las pruebas realizadas en México se someten a la norma ASTM-D4318, las pruebas realizadas en la estancia en Sevilla, España están sujetas a la norma española UNE-EN ISO 17892-12.

Los límites de Atterberg son: límite de contracción, límite plástico y límite líquido. Además, existe el comúnmente denominado "Índice de Plasticidad":

- El límite de contracción (SL) es el contenido de agua en el que una mayor pérdida de humedad no dará como resultado una mayor reducción de volumen. No se utiliza habitualmente y, por lo tanto, no se analiza más a fondo.
- El límite plástico (PL) es el contenido mínimo de agua al cual se considera que un suelo se comporta de manera "plástica", es decir, es capaz de moldearse.
- El Límite Líquido (LL) es el contenido máximo de agua que puede tener un limo o arcilla antes de convertirse en líquido, es decir, convertirse en lodo.
- El Índice de Plasticidad (PI) es el rango de contenidos de humedad donde el limo o arcilla permanece plástico ($PI = LL - PL$) (Institution, 2015).

Límite Líquido

El ensayo se realizará por el método de preparación de vía húmeda, siguiendo los siguientes pasos:

- Por medio de me 'todos visuales y manuales se debe garantizar que el material no contenga granos que sean retenidos por el tamiz Nº40 (425 μm).
- Una vez realizada la mezcla del material, verificar de nuevo la no existencia de material con diámetro mayor a 425 μm .
- Una vez se haya preparado el material, se coloca una parte de este en la cazuela y se comprime y extiende sobre la misma, procurando no dejar burbujas de aire y que su máximo valor de profundidad sea aprox. 10 mm.
- Haciendo una pasada de arriba hacia abajo y manteniendo el ranurador normal a la superficie de la cazuela, se realiza la ranura lo más uniforme posible.
- Se acciona la cazuela a una razón de aprox. 2 golpes por segundo, contando el número de golpes necesario hasta que el talud de la ranura se cierre a lo largo de 13mm. La ranura debe cerrarse por flujo del suelo, mas no por el desplazamiento del suelo sobre la cazuela.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

- Se extrae una parte del suelo presente en la cazuela, asegurándose que sea de lado y lado de la ranura y se coloca en un recipiente de masa conocida y se tapa.
- El suelo sobrante se pasa a la zona de mezclado y con ayuda agua destilado se varía la humedad de este según se necesite aumentar o disminuir el número de golpes.
- Es necesario que los datos de golpes estén comprendidos en los siguientes intervalos 25-35, 20- 30, 15-25.
- Se registra el valor del peso de recipiente más la porción de suelo. Se somete a secado en el horno a una temperatura de $\pm 110^{\circ}\text{C}$ y una vez se obtengan valores de masa constante se registra el peso de suelo seco más recipiente (University, 2023).
- Curva de Fluidez. Contenido de Humedad vs Número de Golpes (figura 55)

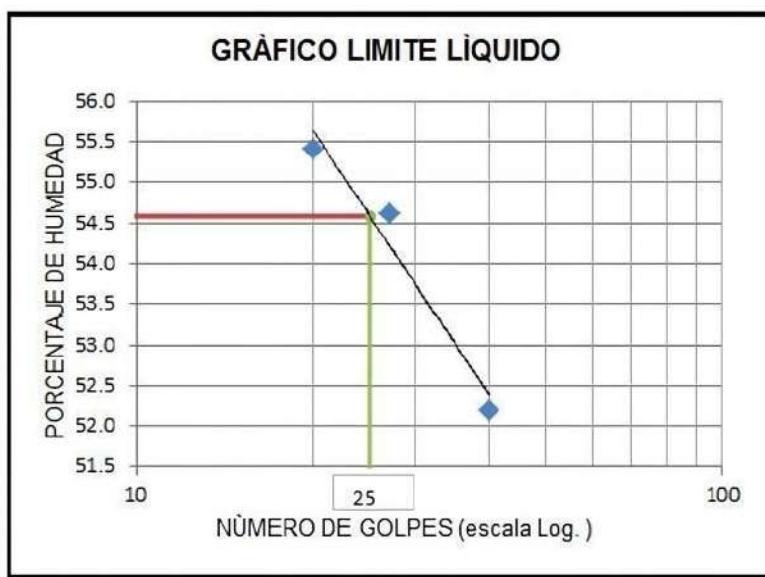


Figura 55. Gráfico para determinar el Límite líquido (2012).

Límite Plástico

El límite plástico fue definido por Atterberg como la frontera que existe entre los estados plástico y semisólido del suelo. En términos de laboratorio este límite es definido como el momento en términos de contenido de humedad

El índice de plasticidad es la diferencia entre los valores de Límite Líquido y Límite Plástico. Un índice de plasticidad bajo, significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la condición de líquido, es decir resulta muy sensible a los cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto, indica que para que un suelo pase del estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua (University, 2023).

-Del suelo preparado para la realización del ensayo del límite líquido se toma una porción de mínimo 15

A continuación, se lleva su estado de humedad hasta que el material permita formar rollos y el mismo no se pegue al ser manipulado con las manos. La reducción de humedad, se puede realizar por moldeo con espátula o exponiendo la muestra a corrientes de aire.

- Se selecciona una porción de aproximadamente 1,5 – 2,0 g, de la muestra previamente preparada.

- Se hace rodar la porción de muestra entre la palma de la mano o los dedos y la placa de vidrio esmerilado, aplicando una presión constante y no superior a la necesaria para formar rollos.

- Se debe formar un rollo de diámetro uniforme en la totalidad de la longitud, hasta que este alcance un diámetro de aproximadamente 3,2 mm.

Si al alcanzar este diámetro el rollo no presenta agrietamiento y desmoronamiento, se tiene un material con humedad superior a su límite plástico. En tal caso se junta de nuevo todo el material formando una esfera, manipulándola con las manos, produciendo así su pérdida de humedad.

- Se repiten los pasos anteriores hasta lograr que una vez el material alcance el diámetro de 3,2 mm, se produzca un agrietamiento y desmoronamiento del mismo.

- Se colocan en un recipiente de masa conocida y se registra el peso de muestra más recipiente (University, 2023).

Cálculo:

$$LP = \frac{W_1 + W_2 + \dots + W_n}{n}$$

Donde:

LP= Límite Plástico

W: Humedad Natural

n: Número de puntos de humedad tomados

-Índice de Plasticidad

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP= Índice de Plasticidad

LL= Límite Líquido

LP= Límite Plástico

Límite de Contracción

La contracción lineal se define como el cambio volumétrico del material, el cual se representa como la reducción del largo de una barra de suelo con forma prismática rectangular. Con relación a su dimensión inicial, dicha barra es elaborada con aquel material que pasa del tamiz núm. 40. La contracción del material se da cuando la cantidad de agua del material disminuye hasta tener una pérdida total de humedad.

-Verter en un recipiente de plástico los 100 g de suelo seco y cribado por el tamiz núm. 40, aplicar la cantidad de agua que corresponda al límite líquido y mezclar hasta que el material sea maleable (Suarez Bandonedo, 2006).

-Determinar las dimensiones interiores del molde rectangular de madera o acrílico con el que se trabajará, es necesario medir el centro y los extremos para tener un valor 2 promedio.

-Recubrir con aceite o vaselina la parte interior del molde.

-Llenar el molde con el material mezclado, el llenado es poco a poco y golpeando sobre la mesa con la finalidad de que vayan saliendo las burbujas de aire atrapado, una vez que se ha llenado perfectamente el molde, se enraza con ayuda del abatelenguas y 4 se deja secar a la sombra en un periodo de 16 a 24 horas.

- Después del periodo de secado de 24 horas, desmoldar la probeta y dejar secar por un lapso de entre 5 a 7 días o, si se tiene acceso a un horno eléctrico regulable, se pone a secar en periodos de 30 minutos a 110°, es necesario pesar la muestra antes de meterla al horno y cada 30 minutos volver a pesarla, la prueba 5 termina cuando ya no existe una variación en el peso de la muestra (Suarez Bandonedo, 2006).

Cálculo:

-Contracción Lineal

$$CL = \frac{Li - Lf}{Li} * 100$$

Donde:

Li= Longitud inicial

Lf= Longitud final

6.1.6 CONTENIDO DE AGUA

El suelo depende principalmente del agua, la que se absorbe y actúa como un solvente, moviendo nutrientes a lo largo del suelo. Los nutrientes son necesarios para que las plantas crezcan. El contenido de agua del suelo mantiene sus principales funciones, sin agua, los nutrientes no pueden reciclarse y transferirse a las raíces de las plantas, lo que no les permite crecer, además, los microorganismos serán incapaces de sobrevivir en suelos secos, entre otros factores. La mayoría de la humedad del suelo proviene del agua de superficie por irrigación o condiciones del clima como la lluvia (Tecnológica, 2020).

Para esta prueba se obtiene una muestra representativa del suelo muestreado de forma alterada y se registra su peso (W_m). A continuación, se seca al horno durante 24 horas a una temperatura constante de 105° a 110° C. Al término de las 24 horas, la muestra se pesa nuevamente (W_s) (Juárez Badillo, 2005).

Cálculo:

- Contenido de Humedad de cada una de las muestras tomadas

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

w: Contenido de Humedad

W_w : Peso de agua presente en la masa de suelo

W_s : Peso seco de los sólidos

El peso del agua se obtiene con la expresión siguiente:

$$W_w = W_m - W_s$$

Donde:

W_m = peso húmedo de la muestra

6.1.7 CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Hay dos sistemas de clasificación de suelos de uso común para propósitos de ingeniería. 1) el Sistema Unificado de Clasificación del suelo (SUCS o USCS) que se utiliza para casi todos los trabajos de ingeniería geotécnica; 2) el sistema de clasificación AASHTO que se usa por la construcción de carreteras y terraplenes.

El USCS clasifica los suelos según su distribución granulométrica y plasticidad. Por lo tanto, solo se requiere un análisis granulométrico y los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) para clasificar un suelo en este sistema. Con base en la distribución granulométrica, los suelos se clasifican como (1) de grano grueso (más del 50% retenido en el tamiz n.º 200) o (2) de grano fino (50% o más pasa el tamiz n.º 200). Los suelos de grano grueso se clasifican a su vez como gravas (50% o más de la fracción gruesa retenida en el tamiz n.º 4) o arenas (50% o más de la fracción gruesa pasa el tamiz n.º 4); mientras que los suelos de grano fino se clasifican como limos y arcillas inorgánicos u orgánicos y por su límite líquido (igual o menor del 50%, o mayor del 50%) e índice de plasticidad. Las gravas y arenas con entre un 5 % y un 12 % de finos se clasifican según sus propiedades o símbolos de suelo duales. El USCS también incluye turba y otros suelos altamente orgánicos, que son compresibles y no se recomiendan para la construcción de carreteras. La turba y otros suelos altamente orgánicos deben eliminarse siempre que sea posible antes de colocar la estructura del pavimento (Suelos, 2023).

El USCS basado en la norma ASTM D 2487 se resume en la Tabla 614.2. La frecuencia de las pruebas dependerá de la probabilidad de que los tipos de suelo cambien dentro de los límites del proyecto. Consulte la Guía de Investigación del Sitio para obtener orientación sobre la frecuencia de muestreo y análisis de suelos. La investigación de suelos incluye el muestreo y análisis para su clasificación, pruebas con el penetrómetro de cono dinámico (DCP) y también incluye pruebas de módulo resiliente. Las pruebas de DCP se utilizan para evaluar la variabilidad y deben realizarse cada 152 m (500 pies) o con mayor frecuencia, según la observación visual de la variabilidad. El muestreo de suelo debe realizarse cada 305 m (1000 pies) o con menor frecuencia (mínimo uno por milla), según la variabilidad de la rigidez del suelo y la resistencia al corte, determinadas a partir de los resultados del DCP (Suelos, 2023). En la siguiente tabla se muestra la clasificación:

Tabla 7. Sistema unificado de clasificación de suelos (de ASTM D 2487)

Grupo de clasificación principal	Subgrupos	Símbolo de clasificación	Descripción
Suelos de grano grueso Más del 50% retenido en el tamiz No. 200	Gravas con 50% o más de fracción gruesa retenida en	GW	Gravas bien calibradas y mezclas de grava y arena, con poco o ningún fino.
		Médico de cabecera	Gravas mal calibradas y mezclas de grava y arena, con poco o ningún fino

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Suelos de grano fino Más del 50% pasa el tamiz No. 200	el tamiz n. ^o 4	Gravas con finos	Gerente General	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
			GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla
	Arenas con un 50% o más de fracción gruesa que pasan por el tamiz n.^o 4	Arenas limpias	SUDOESTE	Arenas bien calibradas y arenas con grava, con poco o ningún fino.
			SP	Arenas mal calibradas y arenas con grava, con poco o ningún fino.
		Arenas con finos	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo
			CAROLINA DEL SUR	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.
Suelos altamente orgánicos	Limos y arcillas Límite líquido 50% o menos		ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, rocas, arenas finas limosas o arcillosas.
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas grava/arenosas/limosas/pobres
			OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad
	Límite líquido de limos y arcillas mayor al 50%		MH	Limusinas inorgánicas, arenas finas o limusinas micáceas o diatomáceas, limusinas elásticas
			CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas
			OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta.
		PT	Turba, lodo y otros suelos altamente orgánicos	
Prefijo: G = Grava, S = Arena, M = Limo, C = Arcilla, O = Orgánico				
Sufijo: W = Bien clasificado, P = Mal clasificado, M = Limoso, L = Arcilla, LL < 50%, H = Arcilla, LL > 50%				

6.1.8 PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS

El peso específico relativo de sólidos (G_s) es la relación entre el peso de un volumen dado de sólidos y el peso del mismo volumen de agua a una temperatura determinada, típicamente 4°C (donde el agua tiene su máxima densidad). Es una medida adimensional que indica cuán "pesado" es un sólido en comparación con el agua y se utiliza en ingeniería geotécnica para caracterizar suelos (Suelos, 2023).

Para obtener el peso específico se realiza el siguiente cálculo:

$$S_s = \frac{Y_s}{Y_0} = \frac{W_s}{V_s V_0}$$

Donde:

S_s = Peso específico relativo de la fase sólida del suelo

Y_s = Peso específico de la fase sólida del suelo

Y_0 = Peso específico del agua destilada, a 4°C de temperatura y la presión atmosférica correspondiente al nivel del mar

W_s = Peso de la fase sólida de la muestra de suelo

V_s =Volumen de la fase sólida de la muestra

6.1.9 PRUEBA DE SUPERFICIE ESPECÍFICA

La superficie específica de un suelo es una medida del área total de la superficie de sus partículas por unidad de masa. Es un parámetro importante porque influye en la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, así como en otros procesos físicos y químicos. La prueba más común para determinar la superficie específica es el análisis Brunauer-Emmett-Teller (BET), que utiliza la adsorción de gases para medir la superficie.

Se refiere al área total de la superficie de las partículas de suelo por unidad de masa del suelo (generalmente expresada en m²/g). Esta medida es importante porque la mayoría de los procesos que ocurren en el suelo, como la adsorción de agua y nutrientes, la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica, tienen lugar en la superficie de las partículas (University, 2023).

Se usará la prueba de azul de metíleno para medir esta característica del suelo, la cual mide la capacidad total de intercambio de un sistema arcilloso y determina el

contenido de sólidos reactivos de los fluidos. La prueba mide la capacidad de una arcilla para absorber cationes de una mezcla, donde los cationes intercambiables en la superficie de la arcilla son reemplazados por cationes de azul de metileno. Cuantos más iones pueda intercambiar la arcilla por cationes de azul de metileno, más reactiva será la arcilla y mayor será su potencial de hinchamiento. Solo las partes reactivas de la arcilla están involucradas, y otros materiales presentes, como arena, caliza, barita, etc., no absorben azul de metileno. Cuando solo está presente un tipo de arcilla, se puede realizar una estimación precisa del contenido de arcilla reactiva. Cuando se presentan mezclas de arcillas desconocidas, el método ofrece una estimación razonable del mineral arcilloso predominante y la pureza de la muestra (Suelos, 2023).

6.1.10 PRUEBA DE PROCTOR ESTÁNDAR

La prueba Proctor estándar es un ensayo de laboratorio que determina la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad de un suelo compactado. Se realiza compactando una muestra de suelo en un molde de dimensiones específicas, generalmente de 10.1 cm de diámetro y 11.16 cm de altura, en tres capas, aplicando 25 golpes con un pisón de 2.5 kg a cada capa (Suelos, 2023).

En resumen, la prueba Proctor estándar sirve para:

- Determinar la densidad seca máxima que puede alcanzar un suelo al ser compactado.
- Identificar el contenido de humedad óptimo para lograr esa densidad máxima.
- Controlar la calidad de la compactación en obras de construcción.

Procedimiento:

- Preparación de la muestra.

Se tendrán 12 a 15 kg de material, el cual será disgregado con el empleo de un martillo para posteriormente cribar el material por la malla #4.

El material se secará hasta por 24 hrs y se separará en 5 bolsas cada una con 2kg de suelo.

- Obtención del porcentaje de agua para la prueba.

Para obtener la cantidad de agua a agregar a la muestra es necesario calcular su %porcentaje de agua inicial para lo cual se tomarán 70 gr de suelo y se llevarán al horno desecado durante 24 hrs. Una vez conociendo el % porcentaje de agua inicial se procede a utilizar las siguientes formulas (García, Castro, & Flores, 2023).

$$= \frac{W_w}{W_s}$$

$$\omega = \frac{W_m - W_s}{W_s}$$

$$Wm = (\omega \cdot Ws) + Ws$$

- Pesar el cilindro junto con la base y anotar el peso como W_c
- Mezclar el material con la cantidad de agua calculado para el correspondiente %.
- Dividir la muestra en partes iguales para el numero de capas correspondiente.
- Ir colocando capa por capa en el cilindro, compactando con el número de golpes requerido, dados con el pisón.
- Retire la extensión del molde y enrase la parte superior del cilindro con la regla metálica.
- Pese el cilindro con el material compactado y la placa de base.
- Una vez recuperado el material del molde obtenga 2 muestras de aproximadamente 100 gr, una en la parte superior y otra en el fondo. Para posteriormente calcular el contenido de agua de dichas muestras (García, Castro, & Flores, 2023).

6.1.11 PRUEBA DE RESISTENCIA DEL SUELO

La prueba de resistencia a la compresión en suelos es un ensayo que evalúa la capacidad de un suelo para soportar una carga sin deformarse o romperse. Se realiza aplicando una fuerza vertical a una muestra de suelo, generalmente cilíndrica, y midiendo la resistencia máxima que puede soportar antes de fallar.

Tipos de pruebas de compresión:

- **Prueba de compresión simple:**

Es un método rápido y económico para determinar la resistencia al corte de suelos cohesivos, especialmente saturados.

- **Prueba de compresión triaxial:**

Permite evaluar la resistencia del suelo y su relación esfuerzo-deformación, con un confinamiento lateral generado por la presión de un líquido (Álvarez Quintero, 2019).

Para los suelos del presente trabajo se realizará mediante la prueba de compresión simple o ensayo de compresión uniaxial, una prueba de laboratorio que determina

la resistencia a la compresión no confinada de un material, generalmente un suelo. Consiste en aplicar una carga axial a una muestra cilíndrica del material hasta su fallo, midiendo la carga máxima que resiste antes de la ruptura. Se realiza de la siguiente manera:

- **Aplicación de la carga:**

La muestra se introduce en una máquina de ensayos de compresión, donde se le aplica una carga axial controlada, típicamente a velocidad constante.

- **Medición de la carga:**

Se registra la carga aplicada a la muestra a medida que aumenta, hasta que la muestra falla o se rompe.

- **Cálculo de la resistencia a la compresión:**

La resistencia a la compresión no confinada (q_u) se calcula dividiendo la carga máxima registrada por el área de la sección transversal de la muestra.

- **Interpretación de los resultados:**

La resistencia a la compresión obtenida se utiliza para caracterizar la resistencia del material a la compresión y para la evaluación de la estabilidad de estructuras en geotecnia (Álvarez Quintero, 2019).

Una probeta de tapial, también llamada espécimen, puede soportar una carga de aproximadamente 1500 kPa (o 15 kg/cm²) de resistencia a la compresión. La resistencia puede variar dependiendo del tipo y composición del tapial, pero suele oscilar dentro de un rango de no más del 30% (UNE, 2023).

6.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL AGREGADO GRUESO

6.2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El análisis granulométrico en grava, o el estudio de la distribución de tamaños de las partículas de la grava, es fundamental para evaluar su calidad y adecuación para diferentes usos, como la construcción. Permite conocer la proporción de partículas de diferentes tamaños (desde muy pequeñas hasta grandes) que la componen, lo que influye en sus propiedades mecánicas y su comportamiento en aplicaciones geotécnicas.

Actualmente el método más utilizado para la estimación del análisis granulométrico consiste en la segmentación mecánica de las partículas, este proceso consiste en verter una muestra representativa de las partículas en una serie de tamices vibratorios, donde un operario registra el peso de las partículas retenidas y las

partículas que pasan por cada tamiz. Estos datos registrados son procesados para poder conocer la distribución de tamaño total de la muestra (Muñoz Viveros & Muñoz Velasco, 2022).

Es importante realizar este ensayo en la grava, ya que el tamaño no debe ser muy grande para la elaboración de los BTC.

6.2.2 PESO VOLUMÉTRICO SECO

El peso volumétrico seco de agregado grueso se define como el peso de un volumen dado de agregado grueso, en estado seco, sin humedad. Es una propiedad importante en el diseño de mezclas de concreto y otros materiales de construcción (Tecnológica, 2020).

6.2.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN

La grava tiene una densidad aparente que varía entre 1460 y 1920 kg/m³. La absorción de la grava, que se refiere a la cantidad de agua que puede retener en sus poros, suele estar entre el 0,5% y el 3% (Tecnológica, 2020).

Densidad de la grava:

- La densidad aparente de la grava, que es la masa por unidad de volumen incluyendo los espacios vacíos, varía en función de la granulometría y el origen de la grava.
- La norma ISO 14688 clasifica la grava en fina, media y gruesa, con rangos de tamaño que influyen en la densidad.
- La densidad de la grava excavada en agua puede ser más alta debido al agua que se encuentra en los poros.

Determinación de la densidad:

Método del Picnómetro: Se utiliza un picnómetro, un recipiente especializado, para medir el volumen de la grava. Se pesa la muestra, se llena el picnómetro con agua hasta una marca y se pesa nuevamente. La diferencia de peso y volumen permite calcular la densidad.

Método de Desplazamiento de Agua:

Se mide el peso de la muestra y el volumen de agua desplazada por la muestra al ser sumergida en un recipiente conocido. La densidad se calcula dividiendo el peso de la muestra por el volumen desplazado (Suelos, 2023).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Determinación de la absorción:

Sumérjala en agua, la muestra se sumerge en agua durante un período determinado, típicamente 24 horas, para que se sature.

Pesar la muestra húmeda:

Después de sumergirla, se pesa la muestra húmeda, ya sea inmediatamente después de sacarla del agua o después de secarla con un paño.

Calcular la absorción:

La diferencia de peso entre la muestra húmeda y la seca, expresada como porcentaje de la masa seca, representa la absorción de agua (University, 2023).

6.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS FIBRAS NATURALES Y SINTÉTICAS

6.3.1 DESCRIPCIÓN DE REFUERZOS NATURALES Y SINTÉTICAS

Para determinar que fibras reforzarán los BTC, se realizó una investigación de antecedentes, evaluando la resistencia de los materiales usados en investigaciones y proyectos existentes, de los cuales se buscaron en la zona de Oaxaca para poderlos analizar.

Para determinar los parámetros de las fibras naturales y sintéticas, se utilizan diferentes métodos de identificación, incluyendo la observación microscópica, pruebas de solubilidad, características de calentamiento y combustión, y técnicas de tinción. El análisis químico y pruebas de resistencia son también importantes para determinar la composición y propiedades de las fibras. Estos métodos se investigaron en los parámetros de investigaciones pasadas, de las cuales sirvieron de apoyo para analizar las fibras utilizadas en el proyecto.

6.4 MODELO BTC - DOSIFICACIONES DEL BLOQUE DE TAPIAL

6.4.1 DOSIFICACIÓN Y FABRICACIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL

La fabricación de probetas de tapial implica dosificar la mezcla de tierra y, si se utiliza, algún aglomerante (como cemento o cal), y luego compactar esta mezcla dentro de un encofrado. En la presente investigación se elabora la mezcla sin

aglomerante. Las probetas de tapial se elaboraron con un molde para probetas de acero. Las dosificaciones se realizaron conforme a la norma ASTM D 2166.

Dosificación:

- **Suelo:**

Se utiliza una mezcla de suelo arcilloso, limo y arena, que puede contener agregados más grandes como grava y piedras.

- **Aglomerantes (opcional):**

Cementos o cales se pueden añadir en proporciones variables dependiendo del tipo de tapial y la resistencia deseada.

- **Agua:**

El agua es crucial para la compactación de la mezcla y para la hidratación de posibles aglomerantes.

Las dosificaciones de los materiales como el porcentaje de agua son recabadas del resultado de la prueba de compactación Proctor, usando el (%) de humedad óptima.

6.4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE TAPIAL

6.4.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS DE TAPIAL

La resistencia a la compresión simple de probetas se refiere a la capacidad de un material, como el hormigón o la roca, para soportar una carga aplicada perpendicularmente a una de sus caras, hasta el punto de falla o rotura. Esta resistencia se determina mediante un ensayo en el que se aplica una fuerza creciente a la probeta hasta que se rompe, y se calcula la resistencia a la compresión como la carga máxima soportada dividida por el área de la sección transversal de la probeta.

Los especímenes de muestra que se realizaron para la prueba se realizaron en condiciones de remoldeo ya que no se cuenta con materiales en estado inalterado. Primero se definió el volumen de la muestra en base a las dimensiones de los moldes de trabajo (García, Castro, & Flores, 2023).

$$V = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 h$$

Dónde:

V , Volumen de la muestra, cm³

D , Diámetro del anillo, cm

h , Altura del anillo, cm

Preparación de la probeta:

La probeta se prepara según la norma correspondiente, generalmente en forma cilíndrica o cúbica, con dimensiones definidas.

Colocación en la máquina de compresión:

La probeta se coloca en una máquina de compresión, que aplica una carga controlada y uniforme.

Aplicación de la carga:

La carga se aplica de forma lenta y gradual, y se registra la deformación de la probeta.

Determinación de la resistencia:

La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima que la probeta soportó por el área de la sección transversal.

Interpretación de los resultados:

La resistencia a la compresión es un indicador clave de la calidad y resistencia de un material, especialmente en aplicaciones de ingeniería civil (Tecnológico, 2020).

6.4.2.2 RESISTENCIA A TENSIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL

La prueba de resistencia a tensión o también conocida como prueba brasileña, o ensayo de hendidura, es un método de laboratorio para determinar indirectamente la resistencia a la tracción de materiales frágiles como el hormigón y la roca. Consiste en aplicar una carga de compresión diametral sobre un disco cilíndrico, lo que genera tensiones de tracción en el plano vertical de la probeta y, eventualmente, su ruptura (Suelos, 2023).

El procedimiento de elaboración de probetas es el mismo que se mencionó anteriormente con la prueba de compresión simple, cuando se someten a la máquina de compresión, la probeta se coloca acostada de forma horizontal, junto con un apoyo de una placa de acero en la parte superior del material de tal forma que el punto de rotura sea en medio y reparta la carga.

6.4.3 DETERMINACIÓN DE LAS FIBRAS CON MEJOR RESISTENCIA

Para determinar que fibras son las adecuadas para reforzar los bloques de tapial, se realiza un análisis de resultados en donde se comparan los esfuerzos que aguantas las probetas con las distintas fibras ya sea naturales o sintéticas.

Factores que se analizan en la resistencia de la fibra:

- **Tipo de fibra:**

Las fibras sintéticas normalmente son más resistentes que las naturales debido a su estructura molecular y la capacidad de ser diseñadas con mayor resistencia. En la investigación se contempla las fibras naturales, para hacer un mejor trabajo en sustentabilidad.

- **Longitud:**

La longitud de la fibra es importante, ya que afecta la finura del hilo y, por lo tanto, su resistencia y durabilidad.

- **Contenido de humedad:**

La humedad puede perjudicar la resistencia de algunas fibras, principalmente las celulósicas.

- **Condiciones de almacenamiento y uso:**

La exposición a la luz, el calor y el uso pueden afectar la resistencia de la fibra a lo largo del tiempo.

Fibras con alta resistencia en las investigaciones de los antecedentes:

- **Fibras sintéticas:**

El poliéster y la aramida (Kevlar, Nomex) son conocidos por su alta resistencia.

- **Fibras naturales:**

Aunque menos resistentes que las sintéticas, algunas fibras naturales como el lino, la seda y el yute, también poseen una buena resistencia (Control, 2024).

6.4.4 SELECCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES DEL BLOQUE DE TAPIAL O BTC

Para analizar los porcentajes de mezcla de los BTC, se apoyó de asesores en la estancia realizada en Sevilla España, en donde se realizaron muestras de tapial, probando distintas dosificaciones de materiales, trabajando también con fibras sintéticas como refuerzo, aplicando pruebas de resistencia a las probetas de tapial, de las cuales se analizan los resultados para obtener las dosificaciones más adecuadas, que puedan usarse para la presente investigación.

Otros conceptos a seleccionar, son la composición adecuada del suelo, la proporción de estabilizadores y la humedad óptima. La composición del suelo ideal suele incluir una mezcla de arena, grava, y suelo arcilloso, con proporciones que varían según la resistencia deseada. Se pueden usar estabilizadores como cal o cemento para mejorar la resistencia a la compresión y la resistencia al agua, pero es opcional dependiendo el proyecto. La humedad del suelo es un factor importante, ya que la humedad excesiva puede debilitar los bloques, mientras que la humedad insuficiente puede dificultar la compactación, por lo que la humedad optima se obtiene realizando una prueba de compactación Proctor.

6.4.5 DETERMINACIÓN DE LAS MEDIDAS DEL BTC

La determinación de las dimensiones de los BTC se debe hacer de acuerdo con el procedimiento descrito en la Norma UNE-EN 772-16:2011.

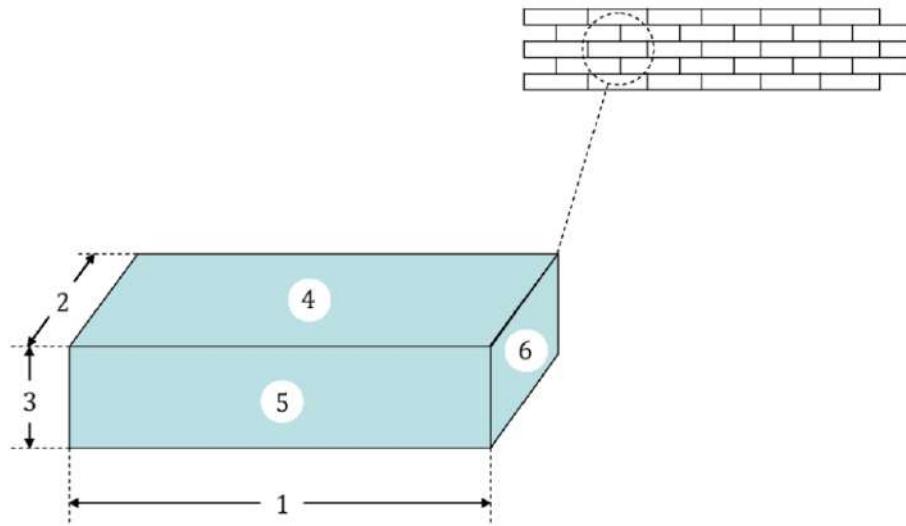
El fabricante debe declarar las dimensiones nominales del bloque en milímetros, especificando la longitud (soga), la anchura (tizón) y la altura (grueso), por este orden (figura 56).

Deben especificarse las dimensiones en función de la dirección de compactación de la pieza. En función de la dirección de compactación, las tolerancias serán diferentes para cada una de las dimensiones. El fabricante podrá declarar tolerancias menores para una o más dimensiones. En el caso de piezas de grandes dimensiones, la tolerancia no será mayor del valor en porcentaje definido en la tabla 8 en función de la dirección de compactación. Es decir, la variación por exceso de las dimensiones efectivas del bloque, respecto de las dimensiones nominales no debe ser mayor de 5 mm. La variación por defecto de las dimensiones efectivas del bloque respecto de las dimensiones nominales no debe ser mayor de 2 mm (UNE, 2023).

La variación de las dimensiones efectivas del bloque respecto de las dimensiones nominales no debe ser mayor que las tolerancias indicadas en la tabla 9 para la dirección de compactación vertical (correspondiente a la altura). Se pueden declarar

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

tolerancias menores para una o más dimensiones. El fabricante debe declarar la categoría de tolerancia del bloque (UNE, 2023).



Leyenda

1 Largo (soga)	2 Ancho (tizón)	3 Alto (grueso)
4 Tabla	5 Canto	6 Testa

Figura 56. Dimensiones y superficies (2023).

Tabla 8. Tolerancia de las dimensiones en forma vertical

Magnitud	Tolerancia en mm
Longitud (l)	$\pm 1,5\% (3 \text{ mm})$
Anchura (w)	$\pm 1,5\% (3 \text{ mm})$
Altura (h), dirección de compactación	$\pm 3,5\% (+5 \text{ mm} / -2 \text{ mm})$

Tabla 9. Tolerancia de las dimensiones en forma horizontal

Magnitud	Tolerancia en mm
Longitud (l)	$\pm 1,5\% (3 \text{ mm})$
Anchura (w) dirección de compactación	$\pm 3,5\% (+5 \text{ mm} / -2 \text{ mm})$
Altura (h)	$\pm 1,5\% (3 \text{ mm})$

6.5 ANÁLISIS EXPERIMENTAL

6.5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental se realizó con las pruebas a compresión de las probetas de tapial, donde se trabajaron con diferentes fibras, misma energía de compactación estándar y misma humedad óptima. En las siguientes tablas 10 y 11, se describen las medidas de las probetas y los BTC.

Tabla 10. Medidas de probetas.

NÚM	MATERIAL	MUESTRA	ALTURA (cm)	PESO (gr)	DIÁMETRO (cm)
1	Suelo STO+18% agua	RP1,4	9.4	173.3	3.5
2	(RP)	RP1,5	9.6	190.2	3.6
3		RP1,6	9.9	190.7	3.5
4	Suelo STO+18% agua+Fibra polipropileno	PFSP4	9.4	201.1	3.5
5	(PFSP)	PFSP5	9.2	206.1	3.5
6		PFSP6	9.2	198.3	3.6
7	Suelo STO+18% agua+Fibra Malla	PFM4	9.9	207.8	3.7
8	(PFM)	PFM5	9.8	206.4	3.6
9		PFM6	9.8	204.5	3.8
10	Suelo STO+18% agua+Fibra Palma	PFP4	9.5	205.0	3.5
11	(PFP)	PFP5	9.5	199.7	3.5
12		PFP6	9.3	201.1	3.5
13	Suelo STO+18% agua+Fibra Yute	PFY4	9.2	202.6	3.5
14	(PFY)	PFY5	9.8	197.5	3.6
15		PFY6	9.6	198.4	3.5
16	Suelo STO+18% agua+Fibra Caña	PFC4	9.4	203.6	3.5
17	(PFC)	PFC5	9.6	204.0	3.5
18		PFC6	9.3	201.0	3.5
19	Suelo STO+18% agua+Fibra Yute + Palma	PFYP4	9.7	197.6	3.8
20	(PFYP)	PFYP5	9.5	196.5	3.8
21		PFYP6	9.3	199.4	3.8

Tabla 11. Medidas de los bloques de tapial.

NÚM	MATERIAL	BTC	ALTURA (cm)	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	PESO (gr)
1	Suelo STO + 18% agua+14% grava	BTCR1	12.3	30	15	8500
2	Suelo STO + 18% agua+14% grava	BTCR2	12.5	30	15	8950
3	Suelo STO + 18% agua+14% grava	BTCR3	12.4	30	15	9370
4	Suelo STO + 18% agua+14% grava+,75%Fibra	BTCF1	12.1	30	15	9.14
5	Suelo STO + 18% agua+14% grava+,75%Fibra	BTCF2	12.3	30	15	8980
6	Suelo STO + 18% agua+14% grava+,75%Fibra	BTCF3	12.4	30	15	9280

6.5.2 ELABORACIÓN DE BLOQUES DE TAPIAL

El proceso de elaboración de bloques de tierra comprimida involucra la preparación de una mezcla de suelo, grava, fibra y agua, en una compactación estándar en un molde de acero.

Para los BTC sin reforzamiento, solo será grava, suelo y agua.

Procedimiento:

1.- Se muele todo el suelo a utilizar en un molino, que pase la malla #40 o #60, no se necesita que sea fino el suelo, solo que no obtenga masas de suelo, pero es importante tamizar para eliminar hojas, raíces y otros materiales no deseados.



Figura 57. Molido de suelo para BTC (2025).

2.- Se agrega el agua al suelo y se empieza a amasar hasta que todo quede uniforme. Después se agrega la grava y se vuelve a amasar.



Figura 58. Mezcla de materiales para BTC sin refuerzo- referencia (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

3.- Ya que quedó lista la mezcla, se prepara el molde, se limpia se engrasa con estopa y aceite.



Figura 59. Preparación del molde (2025).

4.- Se agrega la mezcla de tal forma que arriba de la mitad, se coloca una placa de acero en la parte superior.



Figura 60. Primera capa de mezcla de lista para compactar (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

5.- Se coloca en la prensa para compactar las capas.



Figura 61. Compactación de mezcla de BTC (2025).

6.- Se desmonta el molde.



Figura 62. Desmonte de molde (2025).

6.5.3 APLICACIÓN DE REFUERZOS

El procedimiento de BTC con reforzamiento es el mismo que el anterior, con la diferencia de la agregación de la fibra después del paso #2, como se muestra en la figura 64.

1.- La fibra tiene que estar seca, para prepararse, se separan los hilos y se cortan al tamaño de las especificaciones de la fibra.



Figura 63. Preparación de la fibra (2025).

2.- Se agrega con los materiales preparados, se amasa hasta que la mezcla quede bien homogeneizada.

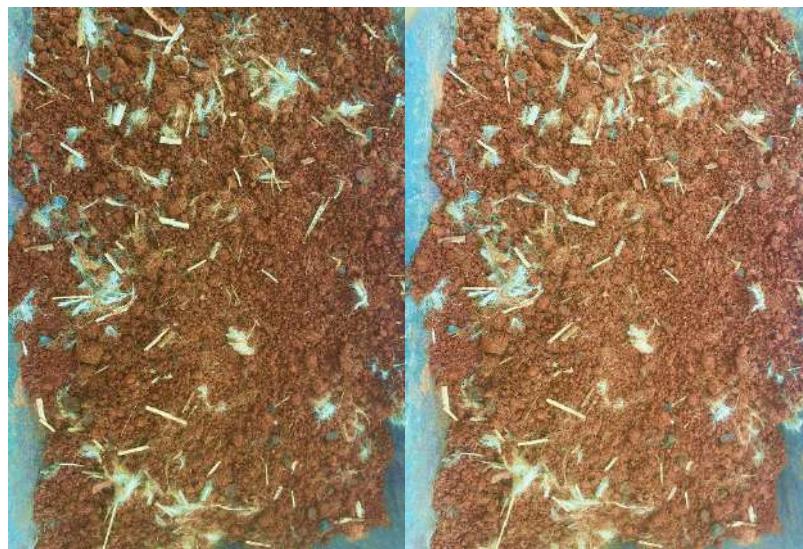


Figura 64. Mezcla de refuerzo con suelo, agua y grava (2025).

3.-Se pasa a la prensa compactar, se desmonta.



Figura 65. Desmonte de molde (2025).

6.6 EXPERIMENTACIÓN FINAL

6.6.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS BTC

Un bloque de tierra comprimida (BTC) puede soportar cargas considerables, aunque su resistencia varía según el tipo de suelo y los aditivos utilizados. La resistencia a la compresión de los BTC puede variar entre 2 y 6 para blocks curados, y en algunos casos puede superar los 148 kg/cm². Para blocks no curados la resistencia puede ser más baja, entre 1 y 3 MPa. También hay clasificaciones basadas en la resistencia, como BSC 20 (2 MPa), BSC 40 (4 MPa) y BSC 60 (6 MPa), véase en la tabla 12, (UNE, 2023).

El fabricante debe declarar la resistencia normalizada a compresión del BTC en N/mm² (1 Mega Pascal (MPa) = 1 Newton por milímetro cuadrado (N/mm²)).

Tabla 12. Clases de Resistencia Normalizada a compresión

Bloques	BTC 1	BTC 2	BTC3	BTC 5
Resistencia normalizada (fráctil 5%) en N/mm ²)	< 1,3	≥ 1,3 ¹⁾	≥ 3	≥ 5

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

En las siguientes figuras se muestra la prueba de resistencia a la compresión en una maquina universal.



Figura 66. Prueba de resistencia a la compresión en BTC sin refuerzo (2025).



Figura 67. Prueba de resistencia a la compresión en BTC con refuerzo de fibra (2025).

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de Suelo de Tuxtepec Oaxaca (STO) y Suelo de Oaxaca Juárez (SOJ). La composición granulométrica del STO está conformada por 0.4% de grava, 1.03% de arcillas y 98.57% de arenas. La composición granulométrica del SOJ está conformada por 11.87% de grava, 1.53% de arcillas y 86.6% de arenas.

7.1 GRANULOMÉTRIA

Las figuras 68 y 69 muestran los suelos ensayados.



Figura 68. Suelo de Tuxtepec Oaxaca – STO (2024).



Figura 69. Suelo de Oaxaca Juárez- SOJ (2024).

La tabla 13 presenta los resultados del ensayo granulométrico del STO en estado natural.

Tabla 13. Resumen de la granulometría del STO

Núm malla	Abertura (mm)	Peso (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
4	4.75	14.3	0.37	0.37	99.63
10	2	863.8	22.12	22.48	77.52
20	0.84	806.2	20.64	43.12	56.88
40	0.42	1233	31.57	74.69	25.31
60	0.25	298	7.63	82.32	17.68
80	0.21	296.5	7.59	89.91	10.09
100	0.149	256	6.55	96.46	3.54
200	0.074	97.9	2.51	98.97	1.03
pasa 200		40.2	1.03	100	0
Total:		3905.9			

La tabla 14 presenta los resultados del ensayo granulométrico del SOJ en estado natural.

Tabla 14. Resumen de la granulometría del SOJ

Núm malla	Abertura (mm)	Peso (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
4	4.75	604.3	11.87	11.87	88.13
10	2	1124	22.09	33.96	66.04
20	0.84	1193.7	23.46	57.42	42.58
40	0.42	904.7	17.78	75.19	24.81
60	0.25	963.2	18.93	94.12	5.88
80	0.21	136.3	2.68	96.80	3.20
100	0.149	27.2	0.53	97.33	2.67
200	0.074	58	1.14	98.47	1.53
pasa 200		77.7	1.53	100.00	0.00
Total:		5089.1			

El presente análisis indica que los suelos usados en los tapias del estado de Oaxaca no son arcillosos en composición, contienen un porcentaje bajo, el STO contiene un 1.03% y el SOJ un 1.52% de arcilla, por lo que serán reforzados.

7.1.1 CURVA GRANULOMÉTRICA

En la figura 70 se presenta la curva granulométrica del STO que se obtuvo de los ensayos de granulometría.



Figura 70. Curva granulométrica del STO (2024).

En la figura 71 se presenta la curva granulométrica del SOJ que se obtuvo de los ensayos de granulometría.

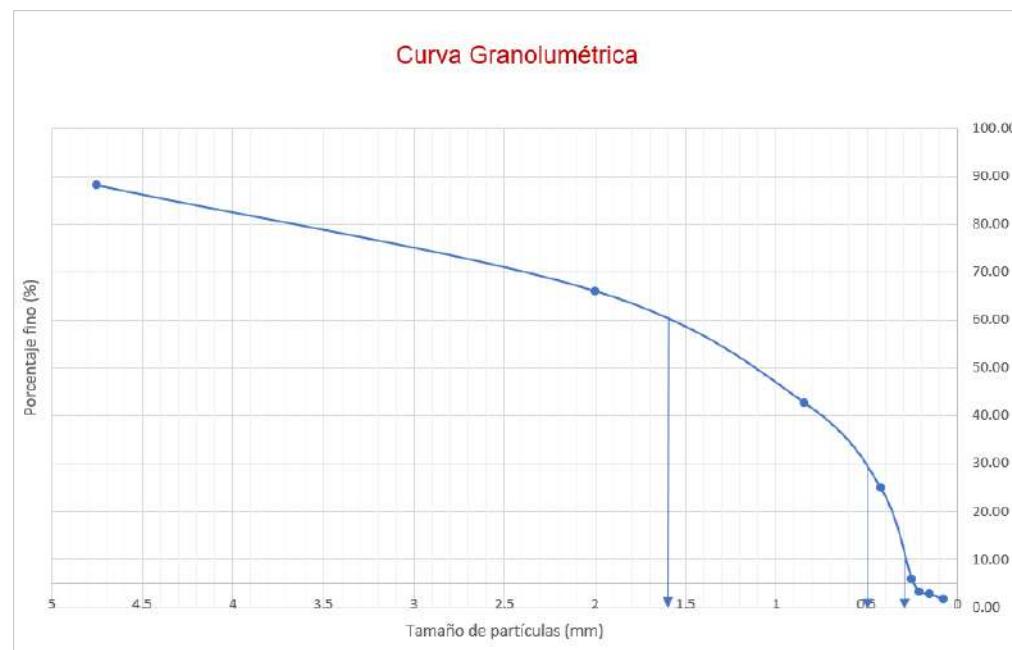


Figura 71. Curva granulométrica del SOJ (2024).

En la tabla 15 se muestran los deciles obtenidos de la curva granulométrica y en la tabla 16 el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc) del STO.

Tabla 15. Deciles 10, 30, y 60 de STO

Tabla 16. Coeficiente uniformidad y curvatura de STO

D60	0.9000
D30	0.4800
D10	0.2100

Cu	4.285714
Cc	1.219048

En la tabla 17 se muestran los deciles obtenidos de la curva granulométrica y en la tabla 18 el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc) del SOJ.

Tabla 17. Deciles 10, 30, y 60 de SOJ

Tabla 18. Coeficiente uniformidad y curvatura de SOJ

D60	1.6000
D30	0.5000
D10	0.3000

Cu	5.3333333
Cc	0.5208333

7.2 HIDRÓMETRO

Para determinar el tamaño de partículas en los suelos, se realizó la prueba de hidrómetro, la cual se realizó solo con el suelo STO, ya que los resultados de granulometría indicaban que lo más viable sería trabajar con SOJ, pero por la disponibilidad de recolección del suelo, se optó por trabajar con STO. De la prueba de hidrómetro se obtuvieron las siguientes lecturas:



Figura 72. Ensayo de hidrómetro (2024).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 19. Lecturas de prueba de hidrómetro en STO

Tiempo	Tiempo (seg)	Lectura Rc	Conversión Rc	Temperatura °C	Factor de Corrección	Lec. Corregida	W ₀ (%)	d	K	Diámetro
5 seg	5	60	92.140	27	1.00	26.000	98.983	174.518	0.0042	0.015
10 seg	10	60	92.140	27	1.00	26.000	98.983	174.518	0.0042	0.010
30 seg	30	60	92.140	27	1.00	26.000	98.983	174.518	0.0042	0.006
1 min	60	60	92.140	27	1.00	26.000	98.983	174.518	0.0042	0.004
2 min	120	60	92.140	27	1.00	26.000	98.983	174.518	0.0042	0.003
5 min	300	60	92.140	27	1.00	26.000	98.983	174.518	0.0042	0.002
10 min	600	60	92.140	27	1.00	26.000	98.983	174.518	0.0042	0.001
30 min	1800	65	99.818	28	1.00	27.000	113.123	182.196	0.0041	0.001
1 hr	3600	64	98.283	28	1.00	27.000	109.588	180.660	0.0041	0.001
2 hr	7200	64	98.283	28	1.00	27.000	109.588	180.660	0.0041	0.0004
5 hr	18000	62	95.211	28	1.00	27.000	102.518	177.589	0.0041	0.0002
10 hr	36000	62	95.211	28	0.70	27.300	101.457	177.589	0.0041	0.0002
24 hr	86400	64	98.283	29	0.20	28.800	103.225	180.660	0.0041	0.0001
48 hr	172800	64	98.283	27	0.20	26.800	110.295	180.660	0.0041	0.0001

Para conocer el diámetro para cada lectura del hidrómetro:

$$D = K * \frac{\sqrt{d}}{t}$$

$$d = R_c + r + \frac{1}{2} * \left(h_b - \frac{V_b}{A} \right)$$

Donde **D** es el diámetro:

Tabla 20. Formulación de datos de la prueba

Vb=	69964.94	mm ³
A=	2,827.44	mm ²
r=	30	mm
hb=	129.5	mm

Rc la lectura del hidrómetro

r distancia del 60 al inicio del bulbo del hidrómetro

hb altura del bulbo del hidrómetro

Vb volumen del hidrómetro

A área de la probeta

7.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA

En la tabla 21 se presenta el resumen de los límites de consistencia de STO, tales como el Límite líquido (LL), Límite plástico (LP) e Índice plástico (IP).

Tabla 21. Límites de consistencia de STO

Flanera	Peso flanera (gr)	Flanera + suelo húmedo (gr)	Flanera + suelo seco (gr)	Peso húmedo (gr)	Peso seco (gr)	Peso de agua (gr)	Contenido gravimétrico de agua w (%)	Límite
3	120.8	122.6	122.2	1.8	1.4	0.4	28.57	LP
4	123.7	164.8	153.3	41.1	29.6	11.5	38.85	LL
						10.28		IP
				Porcentaje de agua "Natural" (%)		25		

En la figura 75 se aprecia el STO en la copa de Casagrande, antes de ser ranurado, para la prueba del límite líquido.



Figura 73. Prueba de LL en copa de Casagrande STO (2024)



Figura 75. Rolado de LP del STO (2024).



Figura 74. Extracción de STO de la copa de Casagrande para LL (2024).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

En la figura 74 se muestra el proceso de rolado para obtener los especímenes que servirán para determinar el LP, y extracción del STO para determinar el LL (figura 73).

En la tabla 22 se presenta el resumen de los límites de consistencia de SOJ, tales como el Límite líquido (LL), Límite plástico (LP) e Índice plástico (IP).

Tabla 22. Límites de consistencia de SOJ

Flanera	Peso flanera (gr)	Flanera + suelo húmedo (gr)	Flanera + suelo seco (gr)	Peso húmedo (gr)	Peso seco (gr)	Peso de agua (gr)	Contenido gravimétrico de agua w (%)	Límite
1	124.1	138.8	136.7	14.7	12.6	2.1	16.67	LP
2	124.1	173.3	161.7	49.2	37.6	11.6	30.85	LL
						14.18		IP
		Porcentaje de agua "Natural" (%)		25				

En la figura 78 se aprecia el STO en la copa de Casagrande, antes y después de ser ranurado para la prueba del límite líquido.



Figura 78. Prueba de LL en copa de Casagrande SOJ (2024).

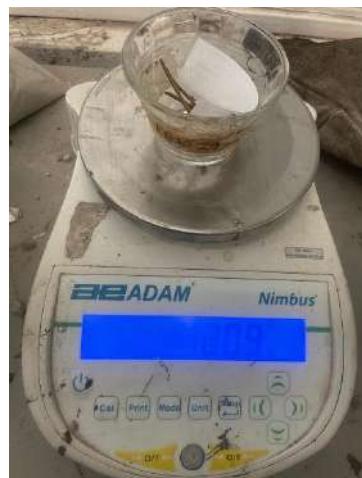


Figura 77. Rolado de LP del SOJ (2024).



Figura 76. Extracción de SOJ de la copa de Casagrande para LL (2024).

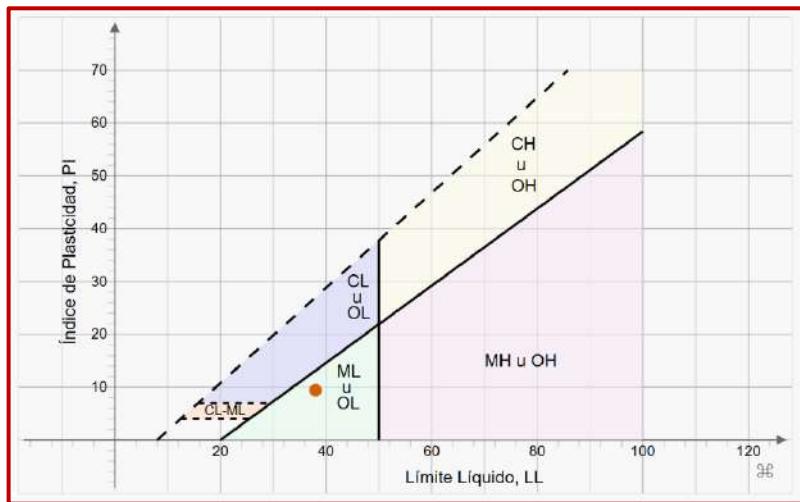
Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

En la figura 77 se muestra el proceso de rolado para obtener los especímenes que servirán para determinar el LP, y extracción del STO para determinar el LL (figura 76).

7.4 CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Suelo STO

El análisis indicado en la carta de plasticidad, corresponde a un Limo Inorgánico de baja compresibilidad (ML), como se observa en la figura 79.



Suelo SOJ

El análisis indicado en la carta de plasticidad, corresponde a una Arcilla inorgánica de baja compresibilidad (CL), como se observa en la figura 80.

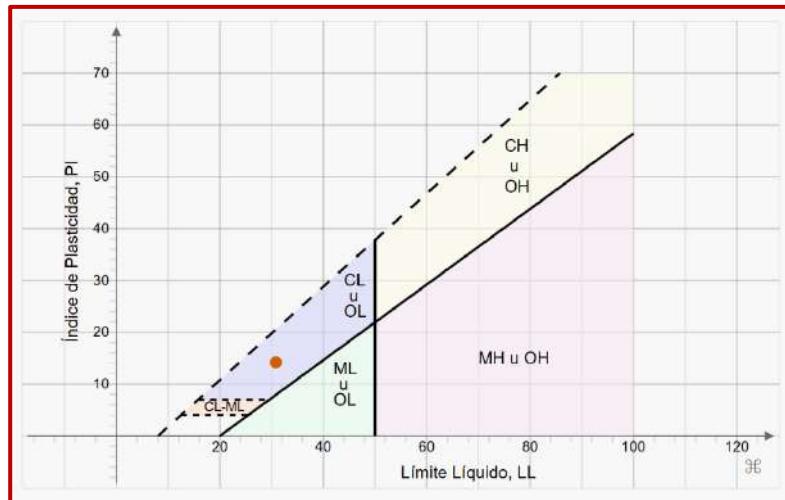


Figura 80. Carta de plasticidad del SOJ (2024).

7.5 CONTENIDO DE AGUA

En la tabla 23 se presentan los resultados del contenido de humedad del suelo, se extrajo 100 gr para hacer el cálculo más viable.

Tabla 23. Resultados del contenido de agua del suelo natural STO

Contenido de agua (%)	
Tara (g)	255
Tara + suelo húmedo (g)	355
Tara + suelo seco (g)	345
Peso suelo húmedo (g)	100
Peso suelo seco (g)	90
w(%)	10%

7.6 PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SÓLIDOS

El peso específico relativo de los sólidos del suelo en estado natural fue de 2.43 en promedio.

En las siguientes figuras se observa la temperatura y el matraz con suelo aforado. En el anexo 10.1 se observan los datos de la prueba.

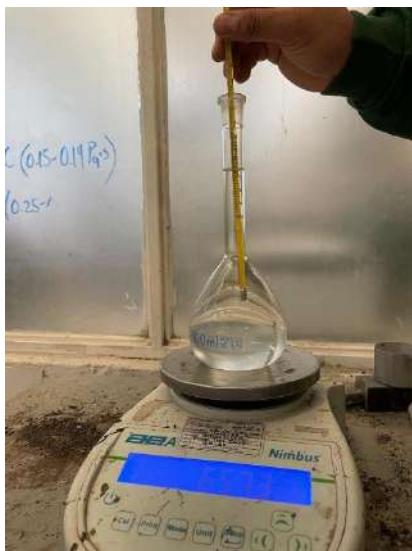


Figura 82. Temperatura en agua destilada (2025).

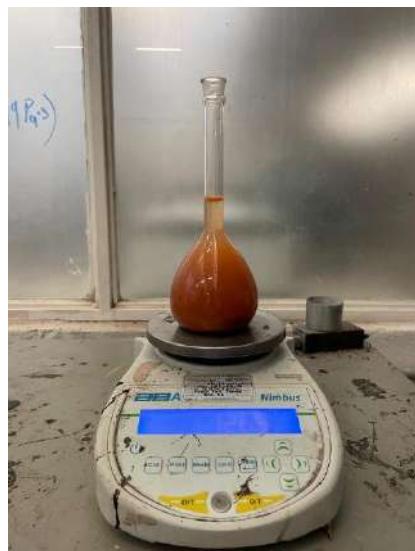


Figura 81. Peso de matraz con suelo aforado (2025).

7.7 PRUEBA DE SUPERFICIE ESPECÍFICA

Para determinar la cantidad de arcilla y materia orgánica presente en un material. Se dispuso el azul de metileno en estado seco con una espátula tipo cuchillo en un vidrio de reloj ya colocado y tarado sobre la báscula para obtener 1 gr del compuesto. Este material se dispuso a un matraz de 500 mL. Se introdujeron 100 mL de agua y una pastilla magnética. La solución se mezcló en el agitador magnético por 10 minutos para asegurar que el azul de metilenos se mezclará completamente con el agua (figura 84).

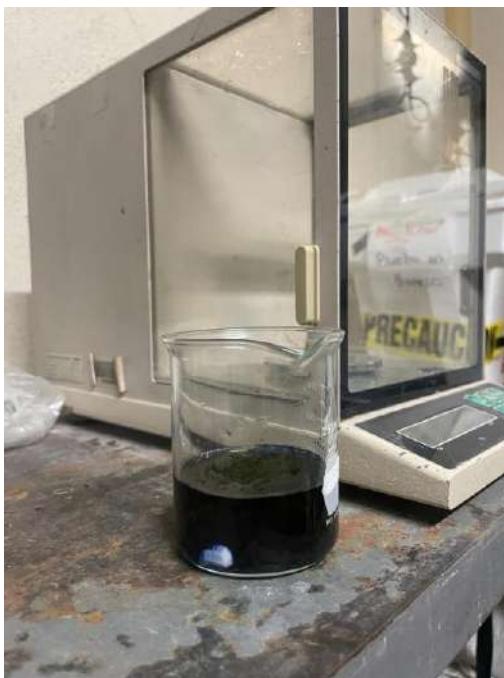


Figura 84. Preparación del azul de metileno (2025).



Figura 83. Azul de metileno en bureta (2025).

Se colocó el vaso de precipitado y se inició la adición de la solución a cada 1 mL. Se abría la llave para permitir el paso del azul de metileno (figura 83).

Para determinar el área específica del suelo STO se aplicó la siguiente ecuación:

$$Se = \frac{\gamma_{VMB} * Av * N * Se_{MB}}{\gamma_{VM} * Ws}$$

Donde:

γ_{VM} = Peso volumétrico azul de metileno

γ_{VMB} = Peso volumétrico relativo azul de metileno

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

$$v = \text{Número de Avogadro} = 6.02 \times 10^{23} \frac{\text{Partículas}}{\text{mol}}$$

N = Cantidad de mL agregados

$$Se_{MB} = \text{Superficie específica azul de metileno } 1.3 \times 10^{-18} \frac{\text{m}^2}{\text{gr}}$$

Ws = Peso de suelo seco

Se =Superficie específica del suelo

En la tabla 24 se presenta el resultado de la ecuación, como resultado la Se del suelo STO es de 19.57 m²/gr, por lo que se determina que el mineral es una caolinita (Anexo 10.2).

Tabla 24. Superficie específica de suelo STO

YMB:	319.87	gr/mol
YVMB:	0.01	gr/mL
Av:	6.02E+23	Partículas/mol
N:	8	mL
Se MB:	1.3E-18	m ² /gr
Ws=	10	gr
Se:	19.57295	m ² /gr

En la figura 85 la iteración número 8 ya tenía el halo brillante alrededor de la gota, pero se detuvo la prueba hasta la gota 22 para verificar bien.

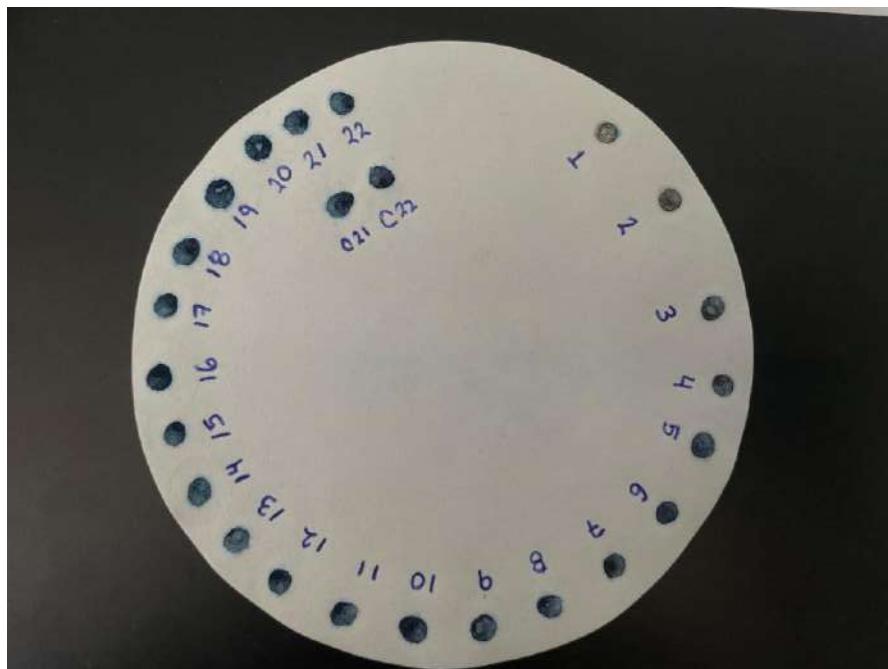


Figura 85. Registro de interacciones de neutralización (2025).

7.8 PRÓCTOR ESTÁNDAR

Para la prueba de Proctor estándar se pudo realizar con los dos suelos, con 5 humedades cada uno.

En la figura 86 y 87 se presenta la prueba de ensayo.



Figura 87. Peso de segunda capa de compactación Proctor SOJ (2025).



Figura 86. Peso de segunda capa de compactación Proctor SOJ (2025).

En la tabla 25 y 26 se muestran los datos recolectados de la prueba para cada suelo.

Tabla 25. Datos de ensayo de Proctor estándar de STO

SUELO TUXTEPEC OAXACA (STO)					
No. Prueba	1	2	3	4	5
Peso molde + suelo húmedo (g)	5110.2	5192.1	5393.2	5542.6	5503.3
Peso molde (g)	3757.3	3757.3	3757.3	3757.3	3757.3
Peso suelo húmedo (g)	1352.9	1434.8	1635.9	1785.3	1746
Peso específico húmedo (T/m ³)	1.55	1.65	1.88	2.05	2.00
Tara No.	1	2	3	4	5
Peso tara + suelo húmedo (g)	155.2	156.9	141.1	166.3	193
Peso tara + suelo seco (g)	153	154	137.3	158	170.5
Peso del agua (g)	2.2	2.9	3.8	8.3	22.5
Peso tara (g)	124.4	136	116.4	123.7	120.9
Peso suelo seco (g)	28.6	18	20.9	34.3	49.6
Peso tara + suelo húmedo (g)	161	154.9	163.5	171.2	183.5
Peso tara + suelo seco (g)	158.9	152.4	157.6	161.4	166.6
Peso del agua (g)	2.1	2.5	5.9	9.8	16.9
Peso tara (g)	126	124.3	125.6	127.4	122.4
Peso suelo seco (g)	32.9	28.1	32	34	44.2
Contenido de agua arriba (%)	7.69	16.11	18.18	24.20	45.36
Contenido de agua abajo (%)	6.38	8.90	14.30	28.82	38.24
Contenido de agua promedio (%)	7.04	12.50	17.24	26.51	36.00
Peso específico seco (T/m ³)	1.45	1.50	1.61	1.46	1.24

Tabla 26. Datos de ensayo de Proctor estándar de SOJ

SUELO OAXACA DE JUÁREZ (SOJ)					
No. Prueba	1	2	3	4	5
Peso molde + suelo húmedo (g)	5110,6	5245,6	5350,3	5447,4	5442,2
Peso molde (g)	3757,3	3757,3	3757,3	3757,3	3757,3
Peso suelo húmedo (g)	1353,3	1488,3	1593	1690,1	1684,9
Peso específico húmedo (T/m ³)	1,55	1,71	1,83	1,94	1,93
Tara No.	1	2	3	4	5
Peso tara + suelo húmedo (g)	141,5	150,4	162,3	174,1	200,5
Peso tara + suelo seco (g)	139	148	156,4	167	193
Peso del agua (g)	2,5	2,4	5,9	7,1	7,5
Peso tara (g)	120,5	123,3	120,9	123,8	125,7
Peso suelo seco (g)	18,5	24,7	35,5	43,2	67,3
Peso tara + suelo húmedo (g)	163	168,6	175,2	162,1	207,1
Peso tara + suelo seco (g)	162,3	164,3	171	154	191
Peso del agua (g)	0,7	4,3	4,2	8,1	16,1
Peso tara (g)	129,4	122,4	127,5	116,4	124,3
Peso suelo seco (g)	32,9	41,9	43,5	37,6	66,7
Contenido de agua arriba (%)	5,59	9,72	16,62	22,10	25,10
Contenido de agua abajo (%)	4,45	10,26	14,57	21,54	24,14
Contenido de agua promedio (%)	5,02	9,99	15,59	21,82	22,00
Peso específico seco (T/m ³)	1,48	1,53	1,56	1,52	1,50

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

En la figura 88 y 89 se visualiza la curva Proctor para cada suelo, determinando que para SOJ la humedad óptima del suelo es del 15.59% con un peso volumétrico seco máximo de 1.56 T/m² y para el material SOT, la humedad óptima es del 17.24% con un peso específico seco máximo de 1.61 T/m².

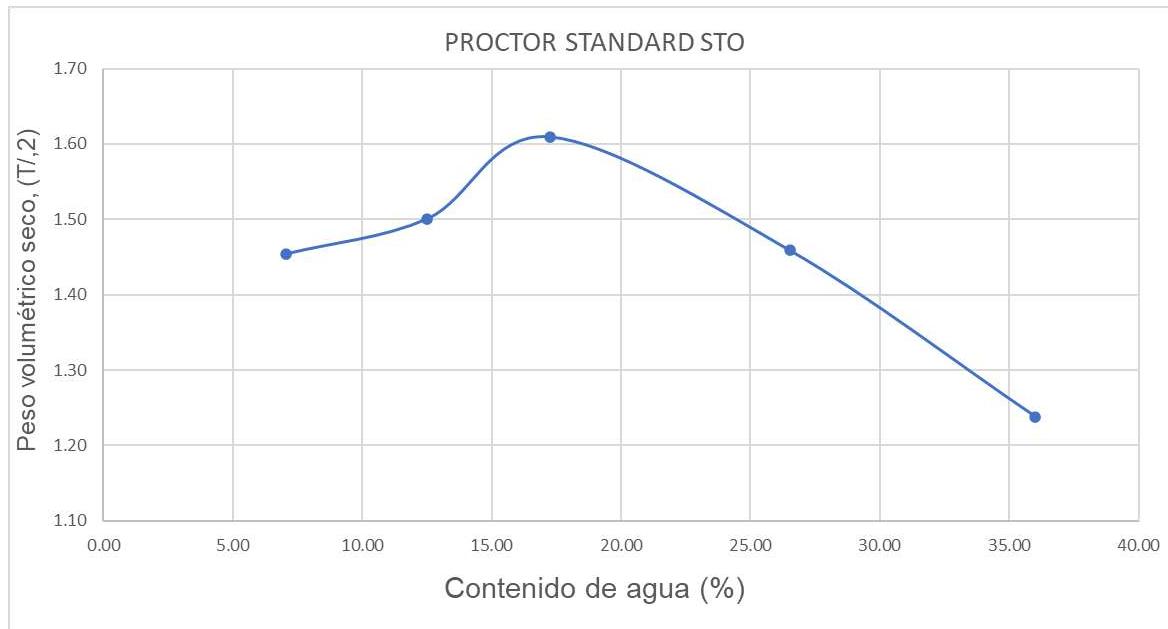


Figura 88. Curva Proctor de STO (2025).

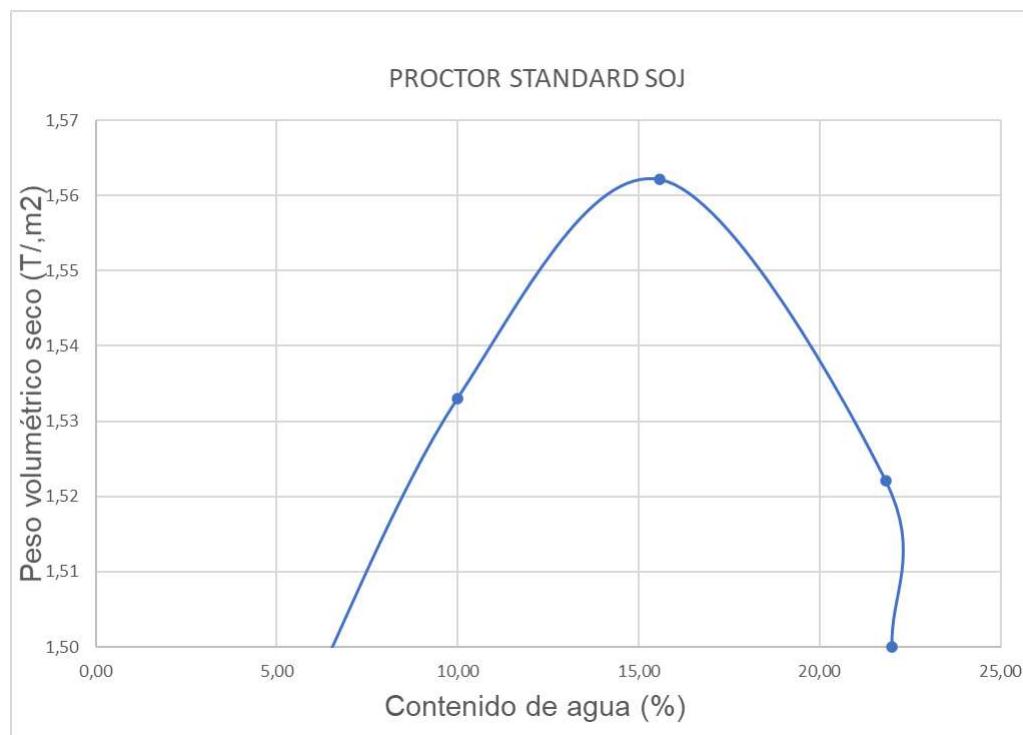


Figura 89. Curva Proctor de SOJ (2025).

7.9 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL SUELO

Para obtener la resistencia del suelo STO se realizó la prueba de compresión triaxial a probetas de suelo remoldeado, en donde se obtuvieron esfuerzos de 8.92, 7.45 y 8.31 kg/cm². En la tabla 27 se presenta el resumen de los esfuerzos en kPa y kg/cm² de las probetas. Las probetas de referencia sin refuerzo son nombradas de la siguiente manera: RP1.4, RP1.5 Y RP1.6.

Tabla 27. Esfuerzos principales de la prueba de compresión triaxial

Pobetas	RP1.4		RP1.5		RP1.6	
Unidades	kPa	kg/cm ²	kPa	kg/cm ²	kPa	kg/cm ²
Esfuerzo	874.75	8.92	731.58	7.45	814.93	8.31

En la figura 90 y 91 se muestran las probetas ensayadas.



Figura 91. Probetas de referencia (2025).



Figura 90. Prueba de resistencia a la compresión (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

En la figura 92, 93 y 94 se presenta la curva de esfuerzo – deformación obtenida en la prueba de compresión triaxial. El eje horizontal corresponde a la deformación unitaria y el eje vertical al esfuerzo de compresión corregido.



Figura 92. Curva esfuerzo – deformación de la prueba de compresión triaxial – RP1.4 (2025).

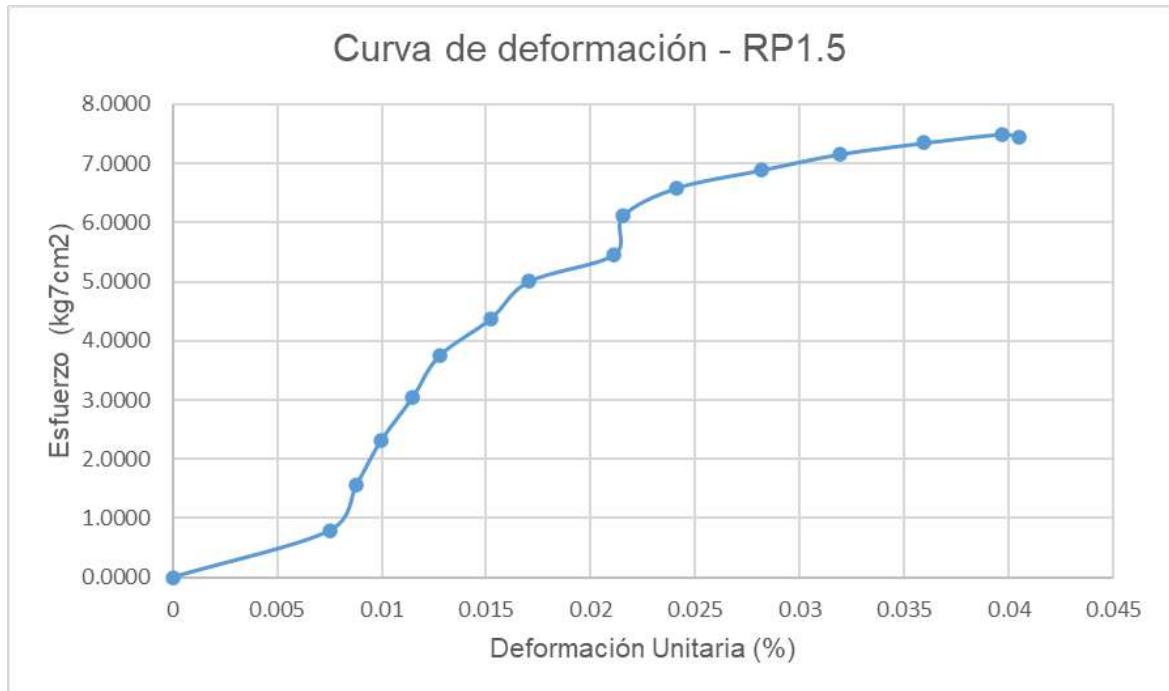


Figura 93. Curva esfuerzo – deformación de la prueba de compresión triaxial – RP1.5 (2025).

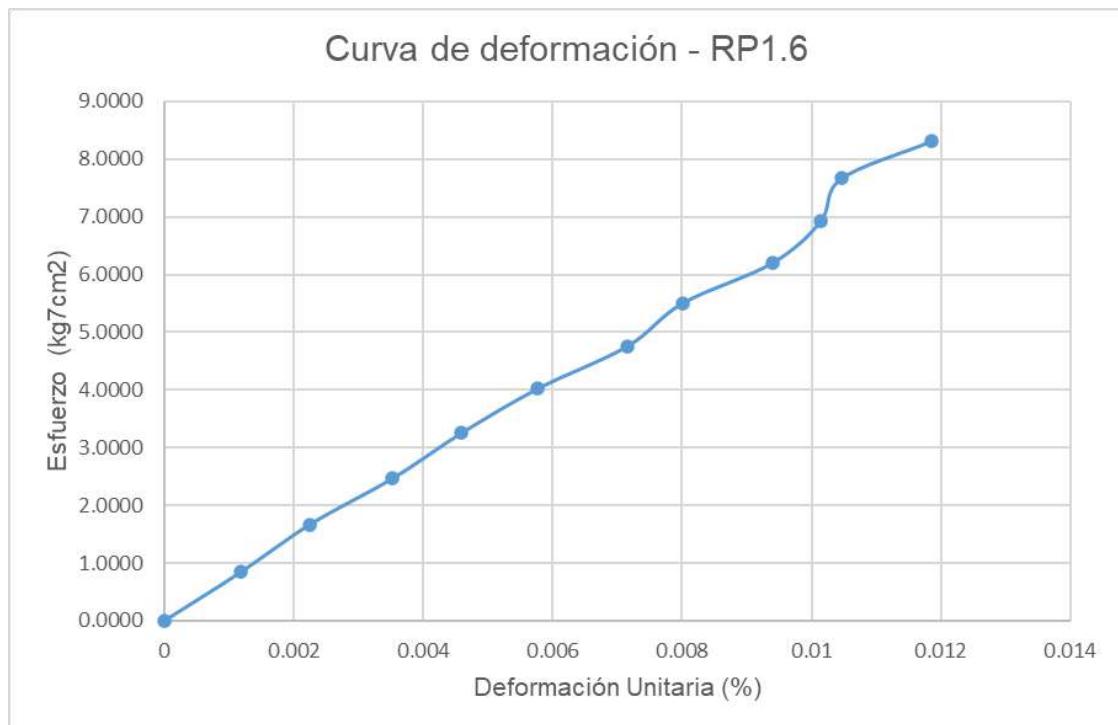


Figura 94. Curva esfuerzo – deformación de la prueba de compresión triaxial – RP1.6 (2025).

7.10 PARÁMETROS DEL AGREGADO GRUESO

7.10.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

En la tabla 28 se muestran los resultados de la granulometría vía seca del agregado grueso, en la figura 95 se presenta la curva granulométrica con los datos obtenidos.

Tabla 28. Granulometría del agregado grueso

Núm malla	Abertura (mm)	Peso (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1"	25	0	0.00	0.00	100.00
3/4	19	0	0.00	0.00	100.00
1/2	12.7	215.8	7.80	7.80	92.20
3/8	9.5	1077.5	38.93	46.73	53.27
1/4	6.34	1315.1	47.52	94.25	5.75
4	4.75	145.6	5.26	99.51	0.49
Pasa #4		13.6	0.49	100.00	0.00
Total:		2767.6			

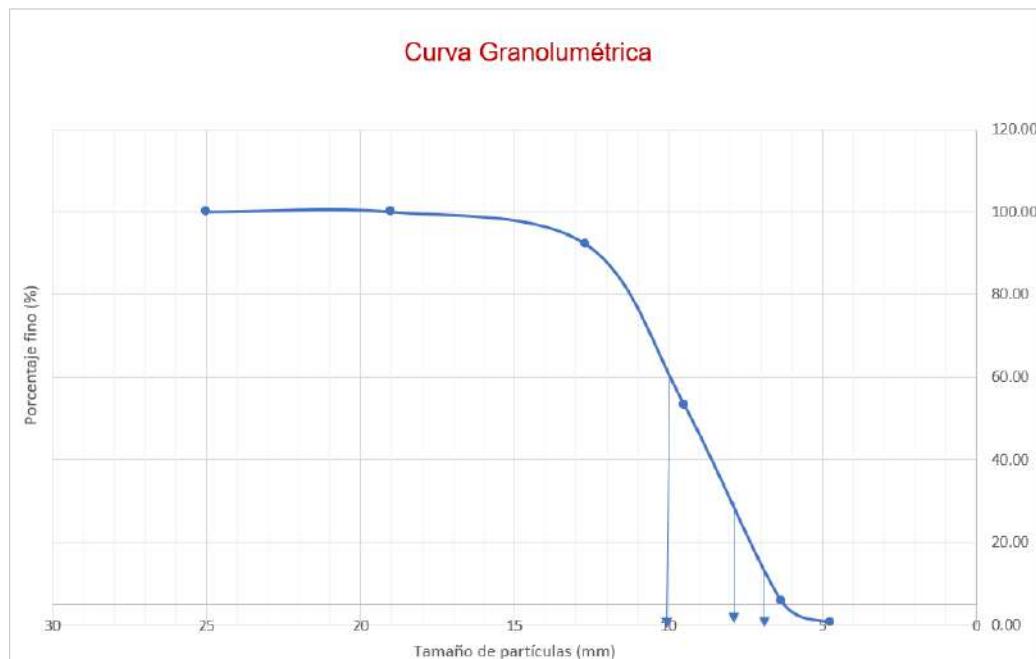


Figura 95. Curva granulométrica del agregado grueso (2025).

En la tabla 29 se muestran los deciles obtenidos de la curva granulométrica y en la tabla 30 el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c) del agregado grueso.

Tabla 29. Deciles 10, 30, y 60 de STO

Tabla 30. Coeficiente uniformidad y curvatura de STO

D60	1.0000
D30	0.8000
D10	0.7000

C_u	1.428571429
C_c	0.914285714

7.10.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO

En la tabla 31 se expone el resumen de los datos del agregado grueso como densidad, absorción y peso volumétrico seco. En la figura 98 se presenta la prueba de peso volumétrico seco compacto, en la figura 97 la granulometría y figura 96 se muestra la prueba de densidad y absorción.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 31. Resumen de los datos del agregado grueso

Parámetro	Unidad	Valor
Peso volumétrico seco compacto (PVSC)	kg/m ³	1550
Densidad	gr/cm ³	2.7
Absorción	%	1.4
D10	-	1
D30	-	0.8
D60	-	0.7
Coeficiente de uniformidad (Cu)	-	1.42
Coeficiente de curvatura (Cc)	-	0.91
Clasificación del agregado pétreo	-	Grava mal graduada (GP)



Figura 98. Prueba de peso volumétrico seco compacto (2025).



Figura 97. Granulometría de agregado grueso (2025).



Figura 96. Prueba de densidad y absorción de agregado grueso (2025).

7.11 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS FIBRAS NATURALES Y SINTÉTICAS

7.11.1 DESCRIPCIÓN DE FIBRAS

Los refuerzos recolectados para la presente investigación, fueron extraídos de la zona de Oaxaca, a los alrededores de la ciudad de Tuxtepec, para las cuales se describirán adelante.

Naturales:

Yute

Fibra de origen vegetal que se extrae de la planta *corchorus capsularis*. Tiene una alta resistencia a la tracción, baja extensibilidad y buena transpirabilidad, no se estira fácilmente, lo que ayuda a mantener la forma de los productos (figura 99).

Longitud: 1cm para probetas y 3 cm para BTC

Diámetro: 18 micras



Figura 99. Fibra de yute seca de 1 cm de longitud (2025).

Palma

La fibra de palma se obtuvo de las palmeras de plátano, del tallo y de las hojas (figura 100). Tiene una resistencia a la tracción mejor que otras fibras naturales, como el bambú.

Longitud: 1.2 cm

Diámetro: 1.3 mm

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento



Figura 100. Fibra de palma de plátano de 1.2 cm de longitud (2025).

Caña

La fibra de la caña extraída se llama bagazo, es el residuo fibroso que queda después de extraer el jugo de los tallos de la caña de azúcar (figura 101).

Longitud: 1.2 cm

Diámetro: 1.1 mm



Figura 101. Fibra de caña de 1.2 cm de longitud (2025).

Sintéticas:

Polipropileno

La fibra de polipropileno (PP) es de la marca Sika, la misma fibra que se usa para concreto. El PP exhibe una alta resistencia a impactos, fatiga y compresión, es completamente recicitable, lo que contribuye a la sostenibilidad (figura 102).

Longitud: 1.2 cm

Diámetro: 32 um



Figura 102. Fibra de polipropileno M-12 Sika (2025).

Fibra malla

La fibra malla se usó de las que se fabrican para construcciones de muros. Su uso es adecuado para aumentar la resistencia al impacto de los materiales, prevenir las fisuras en diversas estructuras y mejorar la integridad de los revoques y la terminación de los muros (figura 103).

Longitud: 1.2 cm

Diámetro: 10 micras



Figura 103. Fibra malla (2025).

7.12 MODELO BTC - DOSIFICACIONES DEL BLOQUE DE TAPIAL

7.12.1 DOSIFICACIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL

Para seleccionar las dosificaciones adecuadas para los BTC y las probetas, se realizaron investigaciones que usaron suelos arcillosos con características similares al suelo STO, se realizó una estancia en la Universidad de Sevilla, en donde se impartieron pruebas de suelos para elegir las dosificaciones. Se hicieron pruebas de tapial, a las cuales se les aplicó ensayos de resistencia a la compresión, densidad, porosidad y ultrasonido (Anexo 10.4).

En la investigación se presenta de forma ilustrativa lo que aportó a la selección de las dosificaciones. En las siguientes figuras se muestran las tongadas de tapial, fueron 4 tongadas con 4 muestras cada una, la primera es nombrada como referencia sin refuerzo (Ref), la segunda es reforzada por polipropileno monofilamento de 12 mm (F12), la tercera con fibra plástica (F48) y la cuarta con fibra malla de vidrio (M10).



Figura 105. Tongada de tapial reforzada con fibra plástica- Ref. (2024).



Figura 104. Tongada de tapial reforzada con fibra malla de vidrio-F12 (2024).



Figura 107. Tongada de tapial reforzada con fibra plástica – F48 (2024).



Figura 106. Tongada de tapial reforzada con fibra malla de vidrio – M10 (2024).

A continuación, se expresan los resultados de la caracterización físico mecánica de las probetas reforzadas con fibras sintéticas.

La densidad para todos los grupos es similar, estando el promedio de cada uno en torno a los $2 \text{ gr/cm}^3 \pm 0.016$, lo que representa una variación de menos de un 1%. Estos valores están en los rangos esperados para este tipo de material de suelo compactado (REF). Considerando las pequeñas variaciones, al emplear los refuerzos la densidad decrece ligeramente, lo que es lógico pues se emplea un material que tiene una menor densidad promedio que la tapia.

Por otro lado, los resultados tanto para son consistentes pues tanto para la densidad y la porosidad la desviación estándar y el coeficiente de variación son reducidos; siendo menos de un 3% para la densidad y menos de 7% para la porosidad. Estas desviaciones son lógicas y esperadas para este tipo de material heterogéneo (Tabla 32).

Tabla 32. Resultados de densidad y porosidad. N: Número de muestras; P: Promedio; DE: desviación estándar; CV: coeficiente de variación

	N	Densidad P gr/cm ³	DE gr/cm ³	CV	Porosidad P %	DE %	CV
Ref	3	2.019	0.033	0.0166	24.10	0.014	0.0539
F12	3	1.998	0.039	0.0194	24.80	0.015	0.063
F48	3	2.012	0.009	0.0047	23.50	0.003	0.0138
M10	3	1.984	0.046	0.0234	26.55	0.018	0.0652

En la figura 108 se representan los resultados de la resistencia a compresión y los módulos de elasticidad obtenidos a partir de las curvas de tensión-deformación.

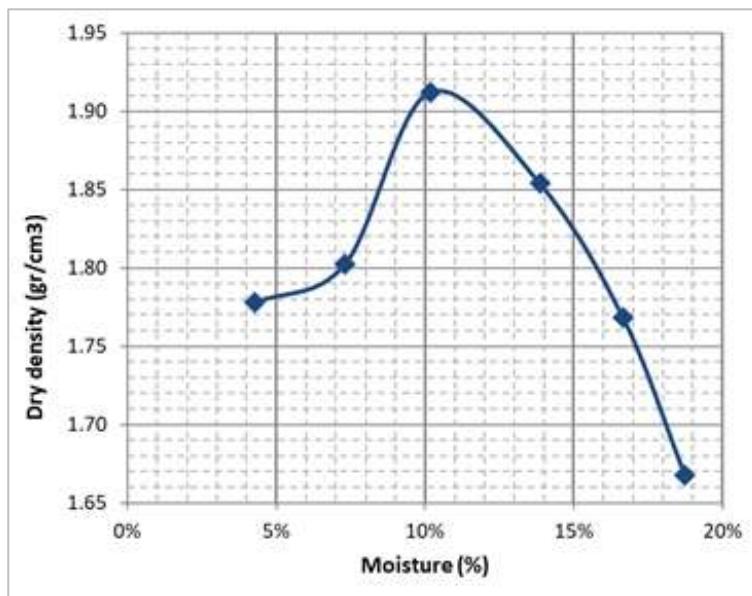


Figura 108. Curva de compactación de Proctor para un contenido de humedad óptimo y máxima densidad de suelo de Sevilla, España (2024).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

En primer lugar, para UCS la desviación típica y el coeficiente de variación son reducidos (1-2%), para los grupos Ref y F12, lo que se traduce en datos muy consistentes y más uniformes. Sin embargo, para F48 y M10, VC es mayor, en torno al 17-18%, lo que se corresponde con una dispersión mayor, que para este tipo de materiales heterogéneos es una circunstancia habitual (REF).

Se observa que la resistencia promedio para el grupo sin refuerzo de fibras o mallas presenta un valor lógico y esperado para una tapia estabilizada con cal a la edad de 28 días (REF).

Los valores de UCS máximos se encuentran para las probetas que emplean la fibra más gruesa (F48), que supone una mejora de un 25% sobre el grupo de referencia. Con respecto al grupo F12 se detecta un aumento menor de un 12%. Por el contrario, las fibras de malla de fibra de vidrio (M10) suponen un menoscabo de un 24% en la resistencia a compresión los cuales se muestran en la tabla 33.

Tabla 33. Resistencia a la compresión media (UCS) Módulo elástico (E), Desviación estándar (DE) Coeficiente de variación (CV) Promedio (P)

	N	UCS-P (MPa)	DE (MPa)	P	E-P (MPa)	DE (MPa)	CV
Ref	3	1.63	0.03	0.02	105.61	22.08	0.21
F12	3	1.83	0.01	0.01	71.89	4.74	0.07
F48	3	2.04	0.36	0.18	52.81	12.61	0.24
M10	3	1.23	0.21	0.17	76.79	13.13	0.17

Con los resultados obtenidos se confirmaron las dosificaciones de las mezclas para realizar las pruebas con el suelo STO.

Las dosificaciones quedaron de la siguiente manera (Tabla 34).

Tabla 34. Dosificaciones de probetas de suelo STO

Probeta	Suelo (gr)	Agua (ml) 18%	Fibra (gr)
			0.75%
Referencia (RP)	198.72	35.77	1.49
Fibra Polipropileno (PFSP)	198.72	35.77	1.49
Fibra Malla (PFM)	198.72	35.77	1.49
Fibra Palma (PFP)	198.72	35.77	1.49
Fibra Yute (PFT)	198.72	35.77	1.49
Fibra Caña (PFC)	198.72	35.77	1.49
Fibra Yute + Palma (PFYP)	198.72	35.77	1.49

7.12.2 DEMOSTRACIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL

Se presentan los resultados de las probetas realizadas por un molde de acero, los parámetros se muestran en la parte metodológica, en este apartado se hace la demostración. Se realizaron 6 probetas de cada refuerzo de fibra, de las cuales 3 se ensayaron en prueba de tensión y 3 probetas en pruebas de compresión.



Figura 112. Probetas de referencia – RF para prueba de tensión (2025).



Figura 111. Probetas de referencia – RF para prueba de compresión simple (2025).



Figura 110. Probetas de polipropileno – PFSP para prueba de tensión (2025).



Figura 109. Probetas de polipropileno - PFSP para prueba de compresión simple (2025).



Figura 114. Probetas de fibra malla - PFM para prueba de tensión (2025).



Figura 113. Probetas de fibra malla - PFM para prueba de compresión simple (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento



Figura 116. Probetas de fibra de palma – PFP para prueba de tensión (2025).



Figura 115. Probetas de fibra de palma – PFP para prueba de compresión (2025).



Figura 120. Probetas de fibra de yute– PFY para prueba de tensión (2025).



Figura 119. Probetas de fibra de yute– PFY para prueba de compresión (2025).



Figura 118. Probetas de fibra de caña – PFC para prueba de tensión (2025).



Figura 117. Probetas de fibra de caña – PFC para prueba de compresión (2025).



Figura 122. Probetas de fibra de yute + palma PFYP para prueba de tensión (2024).



Figura 121. Probetas de fibra de yute + palma PFYP para prueba de compresión (2024).

7.12.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE TAPIAL

7.12.2.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS DE TAPIAL

Los resultados de la prueba a compresión simple de las probetas se muestran en la tabla 35, se muestra un resumen, una comparación en la figura 124. Se puede observar que el punto más alto en reforzamiento lo tiene las probetas PFSP con promedio de 16.03 kg/cm² aumentando la resistencia en un 100%. La fibra más baja mantiene la misma resistencia que las probetas de referencia, incluso se podría especificar que la disminuye un 7%.

Tabla 35. Resumen - resistencia de las probetas ensayadas a compresión simple

NÚM	MATERIAL	MUESTRA	Deformación δ (mm)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kPa)
1	Suelo STO+18% agua	RP1,4	193	8,919	873.77
2	(RP)	RP1,5	378	7,456	731.18
3		RP1,6	111	8,314	815.33
4	Suelo STO+18% agua+Fibra polipropileno	PFSP4	223	13,872	1360.38
5	(PFSP)	PFSP5	333	22,003	2157.76
6		PFSP6	195	12,319	1208.08
7	Suelo STO+18% agua+Fibra Malla	PFM4		7,644	749.62
8	(PFM)	PFM5	189	7,169	703.04
9		PFM6	175	7,216	707.65
10	Suelo STO+18% agua+Fibra Palma	PFP4	204	10,151	995.47
11	(PFP)	PFP5	267	11,840	1161.11
12		PFP6	280	12,243	1200.63
13	Suelo STO+18% agua+Fibra Yute	PFY4	383	13,114	1286.04
14	(PFY)	PFY5	230	12,438	1219.75
15		PFY6	180	11,851	1162.19
16	Suelo STO+18% agua+Fibra Caña	PFC4	150	8,672	850.43
17	(PFC)	PFC5	161	8,559	839.35
18		PFC6	178	10,483	1028.03
19	Suelo STO+18% agua+Fibra Yute + Palma	PFYP4	319	14,416	1413.73
20	(PFYP)	PFYP5	248	10,869	1065.89
21		PFYP6	290	12,797	1254.96

Comparativa de esfuerzos de compresión simple de probetas

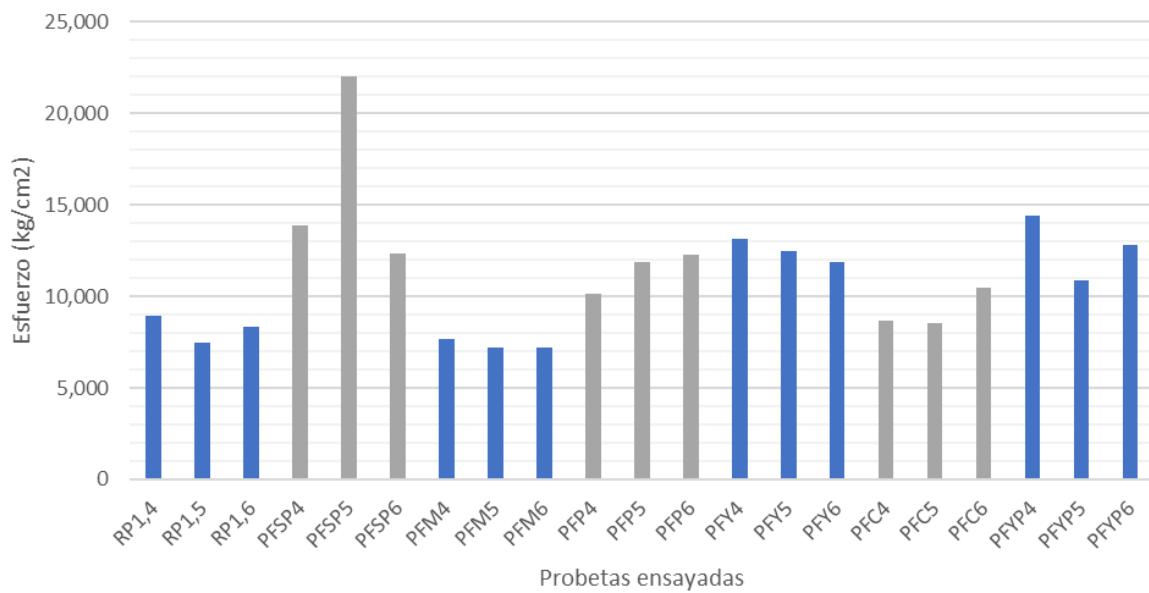


Figura 124. Gráfica de comparación de resistencia a la compresión de probetas (2025).

En las siguientes figuras se muestra la aplicación de prueba de compresión simple. Los desgloses de los esfuerzos y curvas de deformación se muestran en el Anexo 10.5



Figura 123. Prueba de compresión simple en probetas de tapial (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento



Figura 125. Deformación de probetas en esfuerzo máximo- prueba de compresión simple (2025).

7.12.2.4 RESISTENCIA A TENSIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL

La prueba de tensión o de tracción, se aplicó a las mismas características de probetas, con los diferentes tipos de refuerzos de fibra, los resultados fueron diferentes en comparación con la prueba de compresión simple, las probetas que fueron reforzadas con yute + palma (PFYP) aumentaron más del 100% que las probetas sin refuerzo, las de propileno (PFSP) en este caso obtienen el 5º lugar en aumento de resistencia, esto es debido a que las fibras naturales tienen mayor adherencia al momento de la rotura, en la figura 126 se muestra la diferencia del corte entre probetas sin reforzamiento y con reforzamiento.



Figura 126. Corte de probetas en esfuerzo máximo- prueba de tensión: RF-PFSP-PFY-PFP (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento



Figura 127. Corte de probetas en esfuerzo máximo- prueba de tensión: PFC-PFM-PFYP (2025).

En la tabla 36 se muestra la síntesis de resultados de los esfuerzos máximos de las probetas.

Tabla 36. Resultados de prueba de tensión de probetas de tapial

PROBETA	Lectura del Micrómetro	Lectura del anillo	Carga	Diámetro (cm)	Largo (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kPa)
RP1	4	11.08	44.32	3.5	9.33	32.66	1.3572	133.1
RP2	3	11.08	33.24	3.5	9.5	33.25	0.9997	98.0371
RP3	5	11.08	55.4	3.5	9.37	32.80	1.6893	165.66
PFSP1	8	11.08	88.64	3.5	9.22	32.27	2.7468	269.37
PFSP2	9	11.08	99.72	3.5	9.26	32.41	3.0768	301.73
PFSP3	9.2	11.08	101.936	3.5	9.11	31.89	3.1970	313.52
PFM1	11.2	11.08	124.096	3.76	9.9	37.224	3.3338	326.93
PFM2	11.9	11.08	131.852	3.78	9.7	36.666	3.5960	352.65
PFM3	12.4	11.08	137.392	3.76	9.64	36.2464	3.7905	371.72
PFP1	13	11.08	144.04	3.5	9.41	32.935	4.3735	428.89
PFP2	10.5	11.08	116.34	3.5	9.5	33.25	3.4989	343.12
PFP3	14	11.08	155.12	3.5	9.44	33.04	4.6949	460.41
PFY1	8	11.08	88.64	3.5	9.55	33.43	2.6519	260.06
PFY2	10	11.08	110.8	3.5	9.25	32.38	3.4224	335.62
PFY3	10	11.08	110.8	3.5	9.31	32.59	3.4003	333.46
PFC1	12.5	11.08	138.5	3.6	9.49	34.1640	4.0540	397.56
PFC2	12	11.08	132.96	3.55	9.51	33.7605	3.9383	386.22
PFC3	13	11.08	144.04	3.63	9.32	33.8316	4.2576	417.53
PFYP1	14.5	11.08	160.66	3.75	9.68	36.3000	4.4259	434.03
PFYP2	18	11.08	199.44	3.7	9.51	35.187	5.6680	555.84
PFYP3	17.5	11.08	193.9	3.76	9.3	34.968	5.5451	543.79

En la figura 128 se muestra una comparativa de los esfuerzos máximos de las probetas, se puede observar que probetas tuvieron mejor resistencia a la tensión.

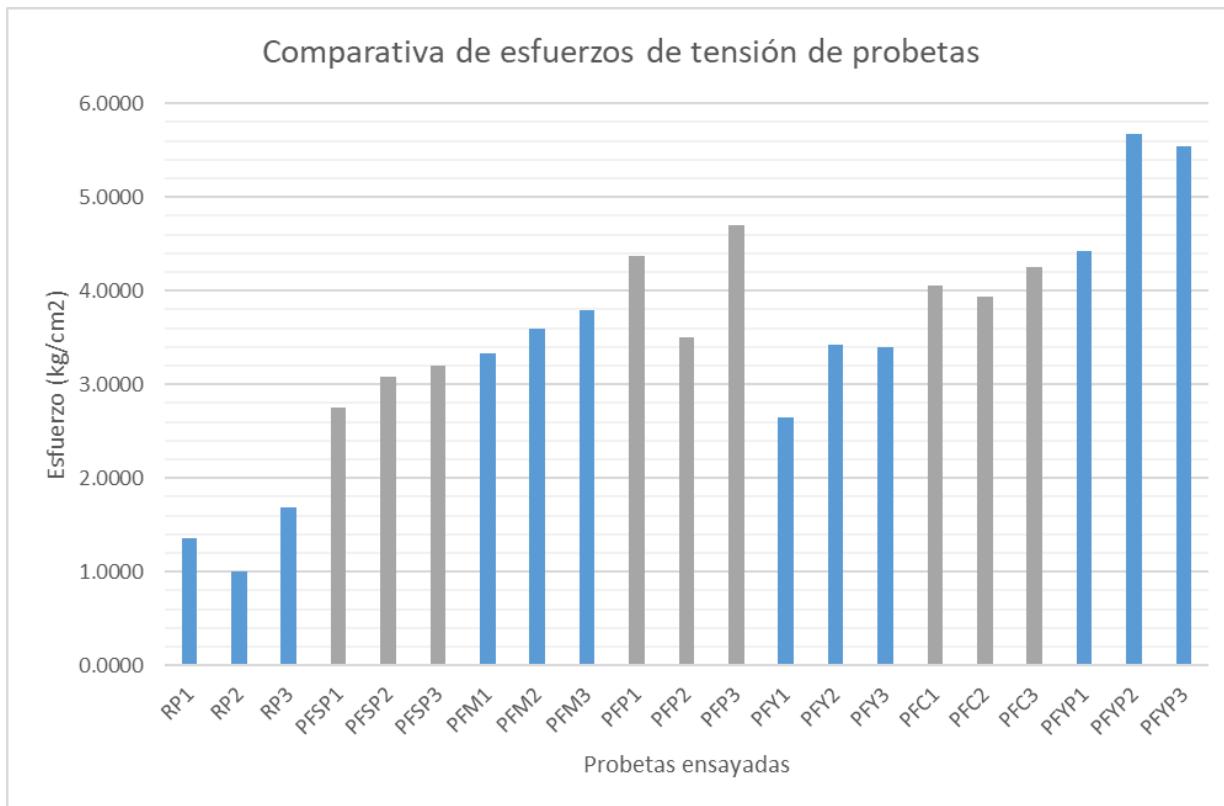


Figura 128. Gráfica de comparación de resistencia a la tensión de probetas (2025).

7.12.4 DETERMINACIÓN DE LAS FIBRAS CON MEJOR RESISTENCIA

Analizando los resultados de las pruebas, las fibras sintéticas en resistencia a compresión obtienen un mejor aumento que todas las demás fibras, pero al recibir una fuerza a tensión estas probetas no obtienen el aumento adecuado a comparación de las probetas con refuerzo natural, las cuales, al momento de mezclar yute con palma, se aumenta y se obtiene una resistencia arriba del 100%.

El proyecto tiene por objetivo realizar BTC con las dosificaciones más adecuadas a un aumento de resistencia para las zonas sísmicas de Oaxaca, por lo que principalmente se tomaron los dos tipos de refuerzos. Las casas de tapial son construidas en su mayoría de una planta, la fuerza a compresión trabaja más en construcciones de 2 niveles en adelante, pero en tensión la estructura de un nivel es afectada más, ya que son sometidas a un movimiento que las estira o las separa, generando esfuerzos de tensión que provocan fracturas o agrietamientos. Se podría elegir la fibra sintética de polipropileno como primera opción, pero al analizar la falla a tensión, se considera nula. Observando que, dentro de las fibras naturales, el yute

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

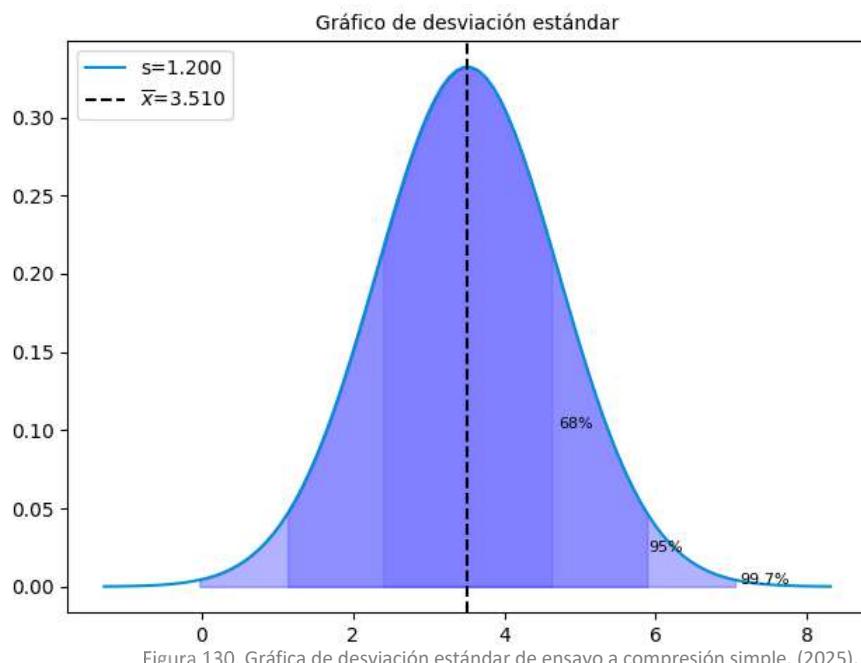
y la palma trabajan con mejor resistencia en los dos esfuerzos. Por lo que, se determina que los BTC sean reforzados con .37% fibra de yute y .37% fibra de palma (figura129).



Figura 129. Reforzamiento de mezcla con fibra de yute y palma (2025).

7.12.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

-A compresión



DESV. ESTÁNDAR	1.2	(Kg/cm ²)
MEDIA	3.51	(Kg/cm ²)

-A tensión

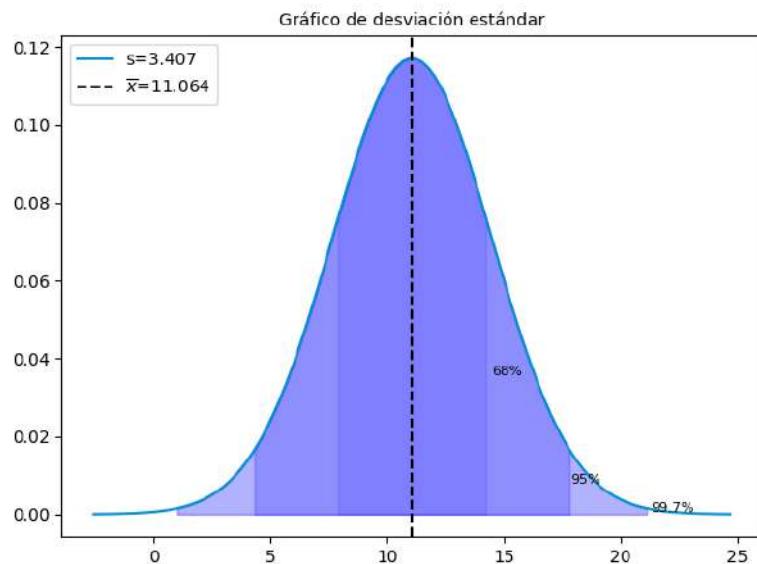


Figura 131. Gráfica de desviación estándar de ensayo a tensión (2025).

DESV. ESTÁNDAR	3.40	(Kg/cm ²)
MEDIA	11.06	(Kg/cm ²)

7.12.6 SELECCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES DEL BLOQUE DE TAPIAL O BTC

Con los resultados obtenidos del apartado 7.12 se confirmaron las dosificaciones de las mezclas para realizar los BTC, tomando en cuenta el análisis de las pruebas de compresión simple y tensión de las probetas. La norma española UNE 41410 dicta que hay que mezclar un % definido de arena, tomando en cuenta los resultados del suelo a utilizar STO, se determina que el suelo ya contiene el % de arena, por lo cual no se agrega más arena en base a esta determinación.

Las dosificaciones quedaron de la siguiente manera (Tabla 37).

Tabla 37. Dosificaciones de mezcla de BTC

BTC	Suelo (kg)	Grava (kg)	Agua (Lt)	Fibra (gr)
	85.25%	14%	18%	0.75%
Referencia (RP)	8.87	1.46	1.88	-
Fibra Yute + Palma (PFYP)	8.87	1.46	1.88	0.78

7.13 ANÁLISIS EXPERIMENTAL

7.13.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño de un BTC se realiza conforme a las características de los materiales, al tener las dosificaciones y las medidas definidas (figura 130), se procede a la construcción de los bloques de tapial. El proceso se puede observar en la parte metodológica de la investigación presente. En este apartado de análisis experimental se mostrarán de forma ilustrativa y escrita los resultados.

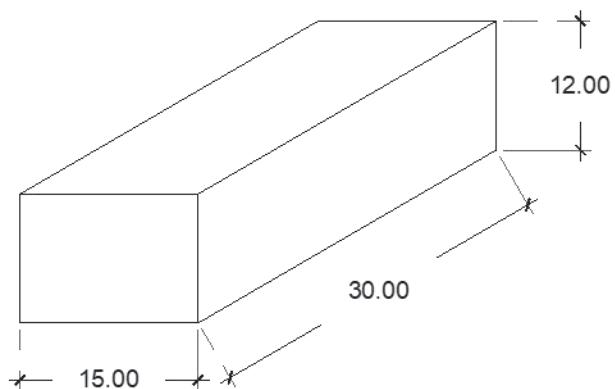


Figura 132. Medidas de los bloques de tierra comprimida a construir (2025).

7.13.2 BLOQUES DE TAPIAL SIN REFUERZOS

Se presentan los BTC sin refuerzos nombrados como Bloque de tierra comprimida referencia (BTCR). (figura 131)



Figura 133. Vista de BTCA realizados (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

7.13.3 APPLICACIÓN DE REFUERZOS

En la figura 132 se muestran los 3 diseños de BTC con refuerzo, nombrados como Bloques de tierra comprimida con fibra (BTCF).



Figura 134. Vista de BTCF realizados (2025).

7.14 EXPERIMENTACIÓN FINAL

7.14.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS BTC

Los resultados indican que la resistencia de los bloques reforzados con fibra aumenta un 35% más que los bloques sin refuerzo, los BTCF obtienen una resistencia de bloques de tapial no curados entre 1 y 3 MPa como lo dicta la norma española UNE 2023.

Los resultados de las pruebas se presentan en las siguientes tablas y figuras.

Primero se muestran los resultados de los bloques de tapial sin refuerzo BTCA, y como siguiente se presentan los resultados de los que de tapial con refuerzo de fibra yute + palma BTCF.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 38. Resultados de prueba de compresión simple en BTCR-1

BTCR-1					
Número de probeta	BTCR-1				
Altura promedio (cm)	12				
Área promedio (cm)	450.00				
Volumen Promedio (cm3)	5400.00				
Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.0270	0.2250	750	462.4872	1.6217	0.15903
0.0288	0.2400	1500	463.3443	3.2373	0.31747
0.0325	0.2704	2388	465.0922	5.1345	0.50352
0.0335	0.2792	2856	465.5975	6.1341	0.60155
0.0405	0.3375	3501	468.9943	7.4649	0.73206
0.0415	0.3460	3789	469.4934	8.0704	0.79144
0.0425	0.3538	3859	469.9493	8.2115	0.80528
0.0435	0.3625	3945	470.4652	8.3853	0.82232
0.0439	0.3658	4102	470.6571	8.7155	0.85470
0.0448	0.3731	4256	471.0907	9.0344	0.88597
0.0479	0.3988	4578	472.6196	9.6864	0.94992
0.0488	0.4065	4596	473.0767	9.7151	0.95273
0.0525	0.4371	4856	474.9090	10.2251	1.00274
0.0499	0.4158	4956	473.6344	10.4638	1.02615
Resistencia a la compresión simple (qu)				1.0261	(Mpa)

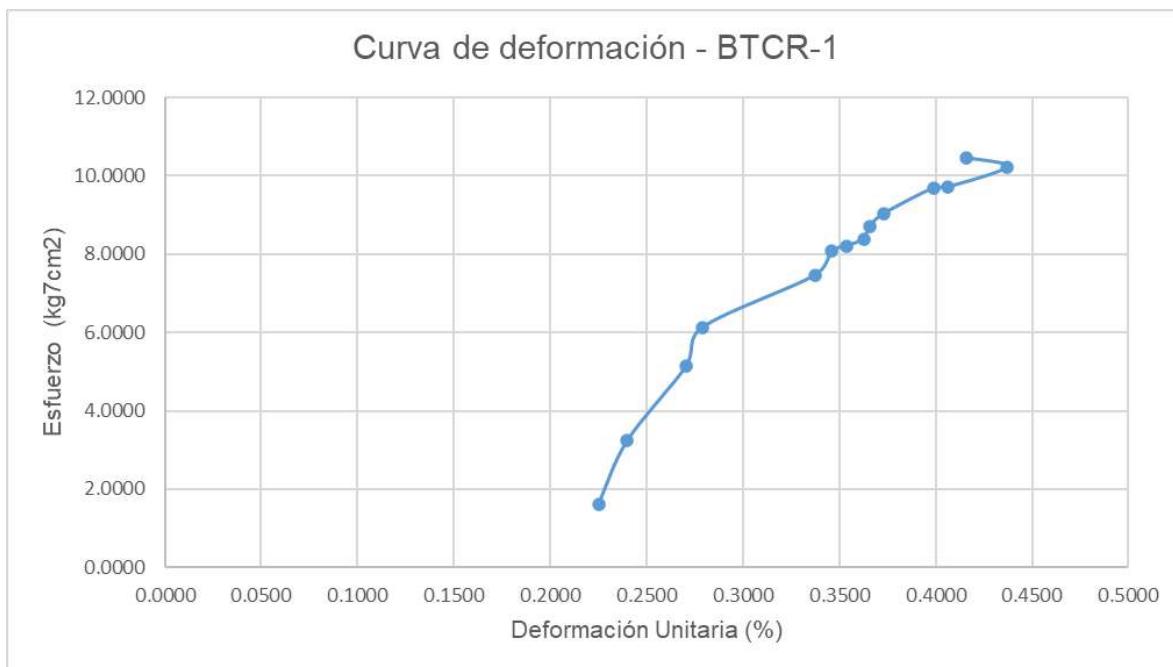


Figura 135. Curva de deformación de prueba de compresión simple en BTCR-1 (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 39. Resultados de prueba de compresión simple en BTCR-2

BTCR-2					
Número de probeta	BTCR-2				
Altura promedio (cm)	12				
Área promedio (cm)	450.00				
Volumen Promedio (cm ³)	5400.00				
Deformación δ (cm)	ε=δ/L (%)	Carga	Área corr. Ac=Ao/(1-δ/L) (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.0305	0.2542	835	464.1568	1.7990	0.17642
0.0325	0.2712	1211	465.1355	2.6035	0.25532
0.0358	0.2983	1389	466.7082	2.9762	0.29186
0.0394	0.3283	1856	468.4572	3.9619	0.38853
0.0444	0.3700	2410	470.9083	5.1178	0.50188
0.0453	0.3778	2755	471.3671	5.8447	0.57317
0.0457	0.3808	3289	471.5498	6.9749	0.68400
0.0461	0.3842	3455	471.7476	7.3238	0.71822
0.0462	0.3850	3895	471.7970	8.2557	0.80960
0.0464	0.3867	3986	471.8960	8.4468	0.82835
0.0465	0.3875	4125	471.9455	8.7404	0.85714
0.0506	0.4217	4358	473.9836	9.1944	0.90166
0.0659	0.5492	4798	481.7471	9.9596	0.97670
0.0789	0.6575	4956	488.5463	10.1444	0.99482
Resistencia a la compresión simple (qu)				0.9948	(Mpa)

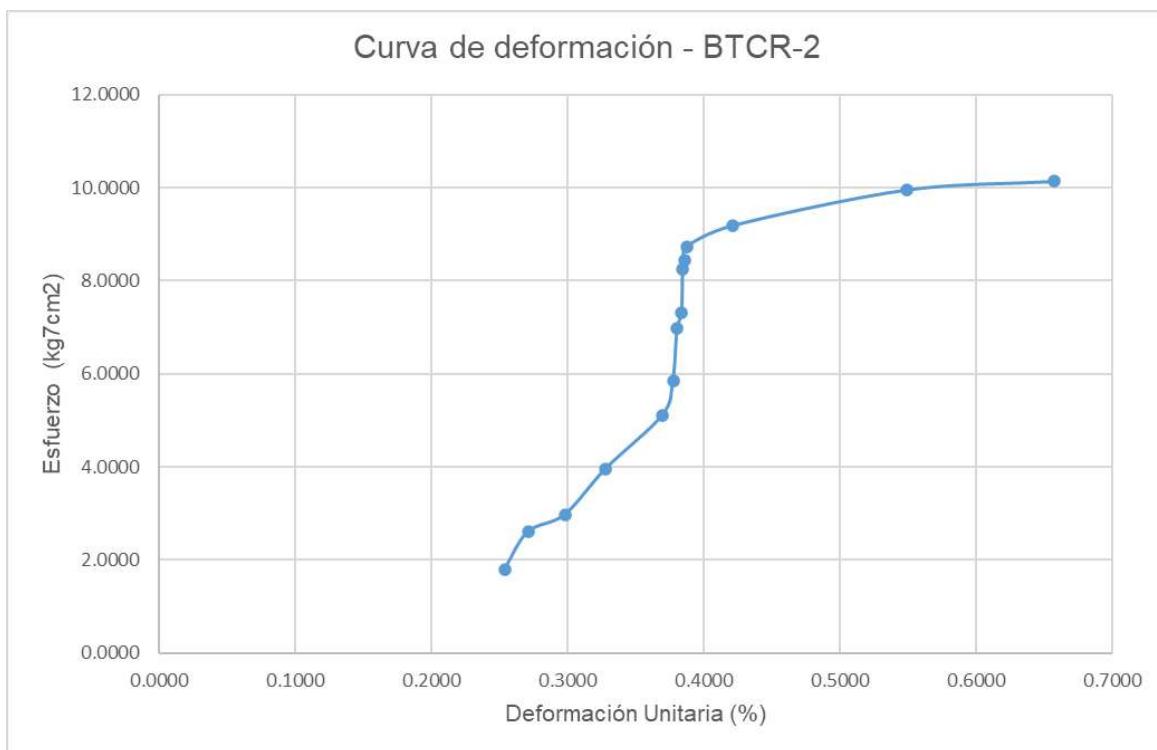


Figura 136. Curva de deformación de prueba de compresión simple en BTCR-2 (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 40. Resultados de prueba de compresión simple en BTCR-3

BTCR-3					
Número de probeta	BTCR-3				
Altura promedio (cm)	12				
Área promedio (cm) ²	450.00				
Volumen Promedio (cm ³)	5400.00				
Deformación δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1 - \delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.0325	0.2712	895	465.1355	1.9242	0.18870
0.0335	0.2788	986	465.5734	2.1178	0.20769
0.0335	0.2790	1245	465.5879	2.6740	0.26223
0.0369	0.3074	1325	467.2363	2.8358	0.27810
0.0379	0.3157	1356	467.7171	2.8992	0.28431
0.0389	0.3242	2558	468.2135	5.4633	0.53577
0.0405	0.3375	3356	468.9943	7.1557	0.70174
0.0428	0.3565	3589	470.1114	7.6344	0.74868
0.0450	0.3750	4156	471.2042	8.8200	0.86494
0.0580	0.4833	4244	477.7070	8.8841	0.87123
0.0599	0.4991	4488	478.6674	9.3760	0.91947
0.0608	0.5065	4789	479.1210	9.9954	0.98021
0.0615	0.5121	4956	479.4630	10.3366	1.01367
0.0620	0.5167	5048	479.7441	10.5223	1.03188
0.0790	0.6583	5125	488.5993	10.4892	1.02864
Resistencia a la compresión simple (qu)				1.0286	(Mpa)

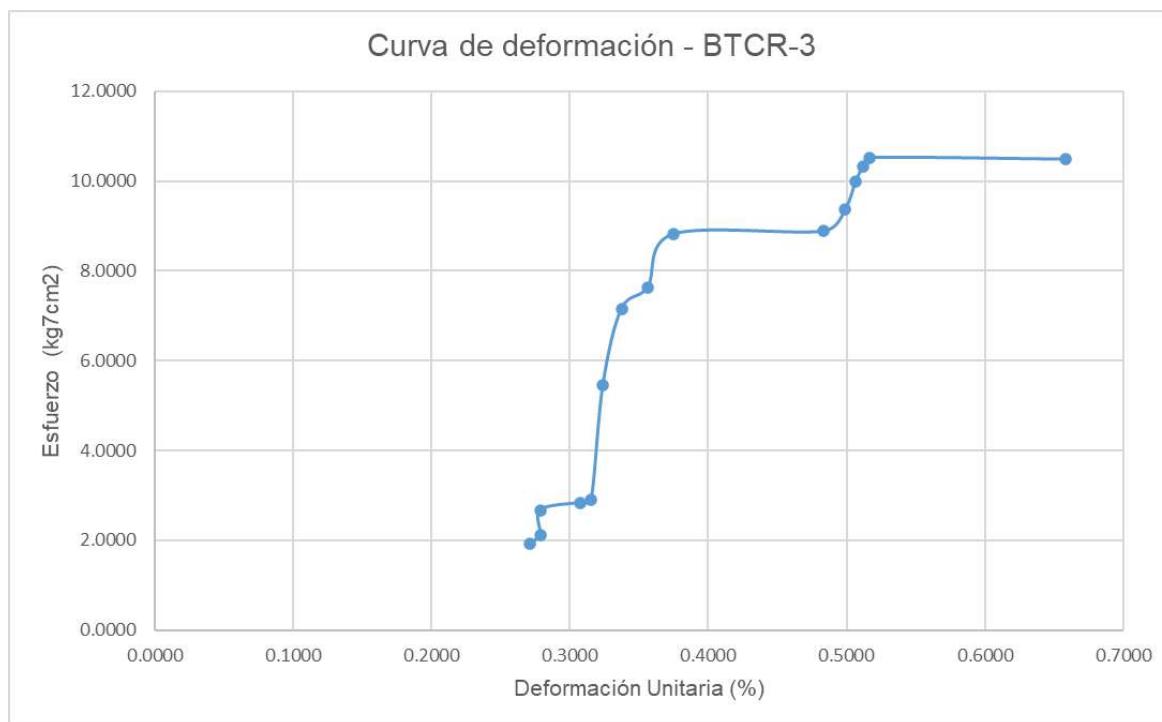


Figura 137. Curva de deformación de prueba de compresión simple en BTCR-3 (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 41. Resultados de prueba de compresión simple en BTCF-1

BTCF-1					
Número de probeta	BTCF-1				
Altura promedio (cm)	12.1				
Área promedio (cm)	450.00				
Volumen Promedio (cm)	5445.00				
Deformación δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.036	0.297521	107	466.8050	0.2292	0.02248
0.041	0.338843	1500	469.2388	3.1967	0.31349
0.0422	0.34876	2388	469.8267	5.0827	0.49845
0.043	0.355372	3369	470.2194	7.1647	0.70262
0.0507	0.419008	4236	474.0335	8.9361	0.87633
0.0537	0.443802	4956	475.5363	10.4219	1.02204
0.0555	0.458678	4957	476.4426	10.4042	1.02030
0.0623	0.514876	4957	479.8976	10.3293	1.01296
0.0716	0.591736	4958	484.7049	10.2289	1.00311
0.0749	0.619008	4959	486.4339	10.1946	0.99975
0.0864	0.71405	4960	492.5569	10.0699	0.98752
0.0896	0.740496	4959	494.2882	10.0326	0.98386
0.0954	0.78843	5236	497.4574	10.5255	1.03220
0.0978	0.808264	5458	498.7808	10.9427	1.07311
0.1056	0.872727	5899	503.1306	11.7246	1.14979
0.1115	0.921488	5956	506.4716	11.7598	1.15324
0.1189	0.982645	6252	510.7252	12.2414	1.20047
0.1211	1.000826	6654	512.0036	12.9960	1.27447
0.1289	1.065289	6895	516.5882	13.3472	1.30891
0.1345	1.11157	7113	519.9307	13.6807	1.34162
Resistencia a la compresión simple (qu)				1.3416	(Mpa)

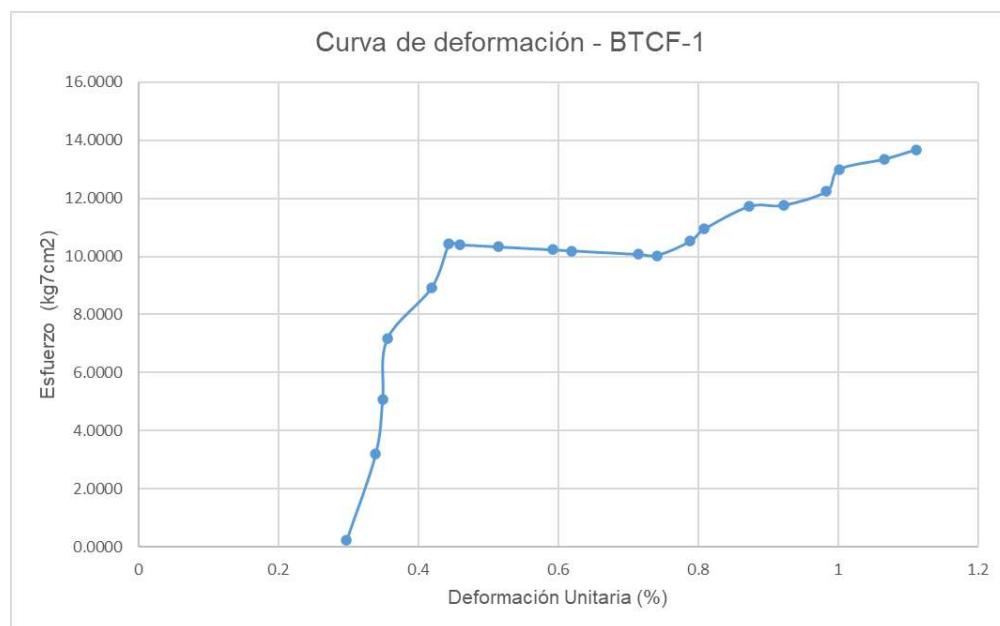


Figura 138. Curva de deformación de prueba de compresión simple en BTCF-1 (2025).

Tabla 42. Resultados de prueba de compresión simple en BDCF-2

BDCF-2					
Número de probeta	BDCF-2				
Altura promedio (cm)	12.3				
Área promedio (cm)	450.00				
Volumen Promedio (cm ³)	5535.00				
Deformación δ (cm)	ε=δ/L (%)	Carga	Área corr. Ac=Ao/(1-δ/L) (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.0926	0.75284553	254	495.9224	0.5122	0.05023
0.1176	0.95609756	845	509.9728	1.6570	0.16249
0.1276	1.03739837	1212	515.8184	2.3497	0.23042
0.1327	1.07886179	2356	518.8516	4.5408	0.44530
0.1528	1.24227642	3487	531.1615	6.5649	0.64379
0.1786	1.45203252	4212	547.8451	7.6883	0.75397
0.1896	1.54146341	4698	555.2813	8.4606	0.82970
0.2064	1.67804878	4895	567.0363	8.6326	0.84657
0.2222	1.80650407	4958	578.5549	8.5696	0.84039
0.2392	1.94471545	4959	591.4826	8.3840	0.82219
0.2653	2.15691057	4964	612.4949	8.1046	0.79479
0.271	2.20325203	4985	617.2840	8.0757	0.79196
0.2724	2.21463415	5212	618.4717	8.4272	0.82643
0.273	2.2195122	5346	618.9821	8.6368	0.84698
0.2769	2.25121951	5689	622.3206	9.1416	0.89648
0.2802	2.27804878	5784	625.1737	9.2518	0.90729
0.2855	2.32113821	5950	629.8111	9.4473	0.92646
0.2955	2.40243902	6248	638.7509	9.7816	0.95925
0.3145	2.55691057	6444	656.4551	9.8164	0.96266
0.3176	2.58211382	6894	659.4373	10.4544	1.02522
0.3222	2.6195122	7356	663.9127	11.0798	1.08655
0.3306	2.68780488	7656	672.2438	11.3887	1.11685
0.3389	2.75528455	7895	680.6837	11.5986	1.13744
0.3478	2.82764228	8105	689.9724	11.7468	1.15197
0.3594	2.92195122	8526	702.4664	12.1372	1.19026
0.3785	3.07723577	8952	724.0547	12.3637	1.21247
0.3893	3.16504065	10252	736.8593	13.9131	1.36441
Resistencia a la compresión simple (qu)				1.3644	(Mpa)

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento



Figura 140. Curva de deformación de prueba de compresión simple en BTCF-2 (2025).

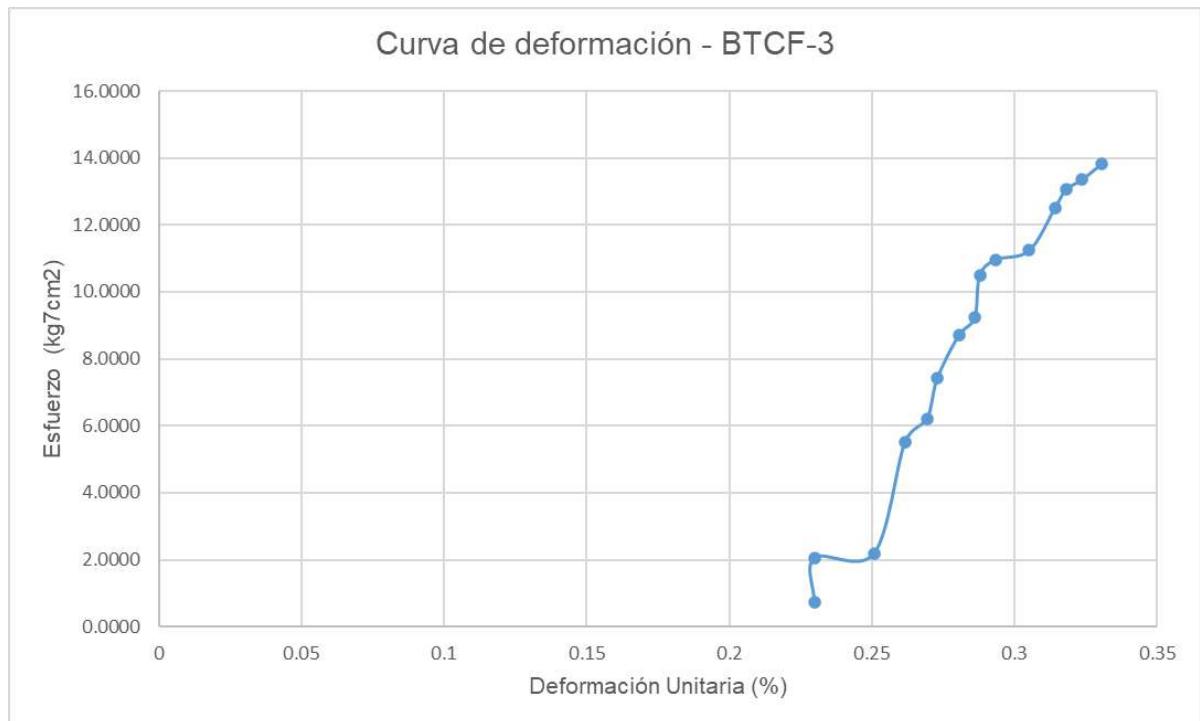


Figura 139. Curva de deformación de prueba de compresión simple en BTCF-3 (2025).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 43. Resultados de prueba de compresión simple en BCF-3

BCF-3					
Número de probeta	BCF-3				
Altura promedio (cm)	12.4				
Área promedio (cm)	450.00				
Volumen Promedio (cm)	5580.00				
Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Carga	Área corr. $Ac = Ao / (1 - \delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.0285	0.229839	345	463.2012	0.7448	0.07304
0.0285	0.229839	956	463.2012	2.0639	0.20240
0.0311	0.250806	1015	464.4442	2.1854	0.21432
0.03245	0.261694	2569	465.0922	5.5236	0.54168
0.03341	0.269435	2895	465.5542	6.2184	0.60982
0.03385	0.272984	3456	465.7662	7.4200	0.72766
0.03478	0.280484	4056	466.2150	8.6998	0.85316
0.03548	0.286129	4312	466.5533	9.2422	0.90635
0.03569	0.287823	4889	466.6549	10.4767	1.02741
0.03637	0.293306	5122	466.9842	10.9683	1.07562
0.03784	0.305161	5256	467.6977	11.2380	1.10207
0.03896	0.314194	5854	468.2427	12.5021	1.22603
0.03945	0.318145	6122	468.4816	13.0677	1.28151
0.04012	0.323548	6257	468.8086	13.3466	1.30885
0.04098	0.330484	6485	469.2290	13.8205	1.35533
Resistencia a la compresión simple (qu)				1.3553	(Mpa)

VIII. CONCLUSIÓN

Esta investigación ha analizado que, en los antecedentes, los muros de tapial son resistentes a fuertes cargas de compresión, las dificultades se presentan cuando los muros deben soportar cargas horizontales de sismos, con la investigación presente se aporta un refuerzo a estas cargas, con las pruebas realizadas a los suelos se puede confirmar que los suelos no contienen mucha arcilla, el suelo STO corresponde a un limo inorgánico de baja compresibilidad y el suelo SOJ corresponde a una arcilla inorgánica de baja compresibilidad, esto podría presentar problemas de estabilidad y resistencia.

La arcilla le da cohesión y resistencia a la mezcla del suelo. En estos suelos ensayados con poca arcilla, se necesitaría agregar suelo arcilloso o utilizar otros métodos para asegurar la estabilidad de la estructura. Esta conclusión se llegó al analizar los resultados de granulometría y clasificación de los suelos, por lo que se definió si se agregaría arcilla o refuerzos, analizando el objetivo del proyecto principal que dictaba realizar una compactación con fibras naturales y/o sintéticas, reforzando así la mezcla para aumentar resistencias a compresión y reducir la posibilidad de fallo de los BTC, se optó por reforzar los suelos con fibras.

Se concluye que, dentro de la caracterización de refuerzos de fibras, las fibras de polipropileno (PFSP) con promedio de 16.03 kg/cm² aumentaron la resistencia a compresión un 100% más que los suelos sin refuerzo, mientras que la fibra malla PFM no obtuvo ningún cambio, incluso se especifica que disminuye su resistencia un 7%. Dentro de las fibras naturales, la fibra de yute (PFY) aumenta la resistencia a la compresión un 57% y la fibra de yute + palma (PFYP) aumenta un 62%, concluyendo así que, en cargas de resistencia a compresión, las fibras sintéticas tienen una mayor resistencia con una diferencia de entre 43-38% con las fibras naturales.

Como conclusión de la resistencia de los suelos reforzados bajo cargas a tensión, se define que las fibras naturales tienen más alto porcentaje de resistencia, las probetas que fueron reforzadas con yute + palma (PFYP) aumentaron más del 100% que las probetas sin refuerzo, las de propileno (PFSP) en este caso obtienen el 5º lugar aumentando más del 100% pero abajo de las fibras naturales.

Se determinó que los BTC sean reforzados con .37% fibra de yute y .37% fibra de palma por sus resultados en los dos tipos de esfuerzos. La norma española UNE 41410 dicta que se debe mezclar un % definido de arena, por lo que tomando en cuenta los resultados del suelo a utilizar STO, se determina que el suelo ya contiene el % de arena, no se agregó más arena en base a este dictamen. Las dosificaciones de los BTC contienen 85.25% de suelo STO, 14% de grava, 18% de agua y .75% de fibra natural.

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Los resultados de los BTC reforzados con yute + palma (BTCF) aumentaron la resistencia a compresión un 35% más que los bloques sin refuerzo, los BTCF obtienen una resistencia de bloques de tapial no curados entre 1 y 3 MPa como lo dicta la norma española UNE 2023.

Se llega a una específica conclusión; los refuerzos naturales definidos en la presente investigación aumentan la resistencia a compresión un 35%, lo que aumenta la prevención de un posible agrietamiento en los muros de bloques de tapial o muros ER.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- González , A. (2025). *Situación sísmica de México*. Ciudad de México: Secretaría de Protección Civil del DF.
- A. Koutous, E. H. (2021). Reforzamiento de tierra apisonada con fibras vegetales: un estudio de caso. *Estudios de caso en materiales de construcción*, 14.
- Ajabi, A., & Siddiqua, S. (2021). Una nueva tierra apisonada estabilizada que utiliza cenizas volantes de fábricas de celulosa como material cementante alternativo con bajas emisiones de carbono. *Materiales de Construcción y Construcción*, 300.
- Alexandra H. Meeka, M. E. (2021). Materiales alternativos de tierra apisonada estabilizada que incorporan residuos. *Materiales de Construcción y Edificación*, 277.
- Álvarez Quintero, A. D. (2019). Evaluación de la resistencia a compresión simple en probetas de suelo adicionadas con concreto reciclados . *Universidad de Colombia*, 96.
- Ángel, L. M. (2013). Edificio modular mixto de entramado de madera y tapial asumen que los costos en una edificación de dos pisos de ER reducen en su costo un 40% respecto a los de una construcción convencional. *Oficina Española de Patentes y Marcas*.
- Arno, T. B. (2013). Un informe sobre la investigación y la construcción contemporánea con tierra apisonada en América del Norte. *Sostenibilidad*, 400-416.
- Ávila Fernando, P. E. (2022). Caracterización de las propiedades mecánicas y físicas de la tierra apisonada estabilizada: una revisión. *Materiales de Construcción y Construcción*, 09-50.
- Barbeta Solá, G. (2002). Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el siglo XXI. *Escuela Técnica Superior d'Arquitectura de Barcelona*, 41.
- Bernat., E. G. (2017). Tapa de tierra reforzada y método de fabricación de la misma. *Oficina Español de Patentes y Marcas*.
- Bertrand Francois, e. a. (2017). Comportamiento estructural de construcciones de tierra apisonada no estabilizadas sometidas a condiciones higroscópicas. *Materiales de Construcción y Construcción*, 155.

- Bourki, A. (2023). Una revisión sobre el uso de fibras de palmera datilera para reforzar materiales de construcción a base de tierra. *Materiales hoy en día*, 20-50.
- Canales Barrera, J. E. (2022). Uso de biopolímeros en la prefabricación de muros de tapia. *Cuadernos de estructuras*, 10.
- Carmen Galán Marín, C. R. (2012). Procedimiento para la estabilización de suelos arcillosos con polímeros orgánicos naturales y armados con fibras animales. *Oficina Española de Patentes y Marcas*.
- Chiappero Rubén Osvaldo, M. C. (2003). Arquitectura en tierra cruda; breves consideraciones sobre la consideración y la restauración. *Buenos Aires, nobuko*, 34.
- Ciancio, D. (2012). Investigación experimental sobre la resistencia a la compresión de muestras de tierra apisonada estabilizadas con cemento y moldeadas. *Materiales de Construcción y Construcción*, 294-304.
- Civil, P. (2019). *Cartografía de Oaxaca*. Oaxaca: Coordinación Estatal de Protección Civil y Gestión de Riesgos.
- Control, T. (2024). *Prueba de análisis de fibras: una guía para el control de calidad textil*. España: Textiles TEstex.
- Daniela, J. P. (2013). Avances en la evaluación de la idoneidad del suelo para tierra apisonada. *Construcción y Materiales de Construcción*, 40-47.
- David, C. (2016). Cajón de madera para ejecución de muros llenos de tierra cruda apisonada. *Oficina Española de Patentes y Marcas*.
- David, E. (2007). The Rammed Earth House Completely Revised Edition. *Publishing Company, EUA*, 100.
- Ernest Bernat Masó, C. E. (2016). Tierra apisonada reforzada con textiles: caracterización experimental de la resistencia a la flexión y la dencidad. *Materiales de Cosntrucción Construcción*, 470-479.
- Escamilla, T. D. (2013). Análisis del tiempo óptimo de reacción en la estabilización de un suelo arcilloso tratado con cal. *Oficina Española de Patentes y Marcas*.
- Estado, O. G. (2021). *Regiones de Oaxaca*. Oaxaca: Gobierno de Oaxaca.
- Fagone, M. L. (2017). Evaluación de resistencia de tejido de yute para el refuerzo de estructuras de tierra apisonada, compuestos parte B. *Construcción*.
- García, M., Castro, D. P., & Flores, J. (2023). *Granulometría, reporte de practica*. Querétaro : Universidad Autónoma de Querétaro.

- Ghorbania. (2023). Imágenes del contenido de agua durante el ascenso capilar dentro de estructura de tierra apisonada. *Ingeniería Geológica*, 325.
- Gianfranco, C. (2013). Bloque plegable de formación con tapias para la construcción de muros. *MAteriales de Construcción y Construcción*.
- Gobierno, O. (2017). *Peligros de origen geológico y localización de zonas vulnerables*. Oaxaca, Juárez: Alteraciones.
- Grant, S. K. (2023). Mejora de las propiedades mecánicas de la construcción con tierra apisonada estabilizada con polímeros. *Materiales de Construcción*, 377-388.
- Guettala, A. A. (2012). Estudio de durabilidad del hormigón de tierra estabilizado bajo exposición de condiciones climáticas y de laboratorio. *Materiales de Construcción y Construcción*, 129-127.
- Hernández, A. (2023). Comportamiento mecánico de un suelo arcilloso estabilizado con puzolanas y cal como material para capa sub base. *Repositorio institucional de la UAQ*.
- Hernández, F. (2023). Comportamiento mecánico de un suelo arcilloso estabilizado con puzolanas y cal como material para capa sub base. *Materiales*, 14-20.
- Hurtado, D. R. (2014). Mejoramiento de suelos expansivos mediante inclusiones de fibras. *Construcción*.
- INEGI. (2020). *Geología de Oaxaca*. Oaxaca: Sistema de Información geográfica del estado de Oaxaca.
- Institution, B. S. (2015). *Métodos de prueba de suelos con fines de ingeniería civil. Pruebas de clasificación*. Huelva, España.
- Jayasinghe C., K. N. (2012). Características de resistencia a la compresión de muros de tierra apisonada estabilizados con cemento. *Construcción consstruir*, 1971-1976.
- Juárez Badillo, E. (2005). Fundamentos de la mecánica de suelos Tomo 1. En J. Badillo, *Mecánica de Suelos* (pág. 644). México: Limusa.
- López, C., Ruiz, D., & Jerez, S. (2020). Comportamiento sísmico de edificaciones de tapia pisada reforzadas con marcos de madera y viga de coronación en concreto. *Informes de la construcción*, 72.
- Lorenzo Miccoli, U. M. (2017). Muros de tierra apisonada reforzados con tiras de tejido de poliéster: análisis experimental bajo carga ciclífica en el plano. *Materiales de Construcción y Construcción*, 29-36.
- M, C. (2012). Fortificaciones islámicas en tapia militar. *Piedra Cal*, 16-24.

- Molina, N. C. (2009). Muros de tierra compactada- Tapia. *UNAM*, 24-35.
- Mora Espinosa, W., & Ramón Valencia, B. A. (2019). Fibras Naturales como alternativa de refuerzo en materiales compuestos.Una revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Pamplona Colombia*, 60-72.
- Muñoz Viveros, D. A., & Muñoz Velasco, J. (2022). Análisis granulométrico de la grava para Fabricación de concreto hidráulico mediante procesamiento digital de imágenes y técnicas de aprendizaje automático. *Ingeniería electrónica y comunicaciones*, 10.
- Narloch, A. H. (2019). Diseño de la composición de tierra apisonada estabilizada con cemento usando redes neuronales artificiales. *Materiales*, 12.
- Olvera, N., Arellano, D., & al., D. R. (2020). Bloques de Tierra comprimida sin adición de cemento utilizando el suelo de un predio ubicado en El Marquez, Querétaro. *Construcción*.
- Prime, N. (2022). Impacto de contenido de humedad en el comportamiento elasviscoplástico de un muro de tierra apisonada: nuevos hallazgos. *Construcción Madre*, 1-13.
- Ramírez, R. (2022). Contracción temprana y adherencia del refuerzo LC-TRM en tierra apisonada. *Materiales de Construcción y Construcción*, 350.
- Rocha, M. (2012). Escuela de las Artes plásticas de Oaxaca. *Arquine: revista internacional de arquitectura*, 52-57.
- Ruiz, D., & Galindo, P. (2023). Reforzamiento estructural de edificaciones patrimoniales en tierra de 1 y 2 pisos: aplicación de la normativa AIS-610-EP-2017. *Informes de la Construcción* 75, 10.
- Ruiz, J. C. (2023). Rendimiento sísmico de un modelo de tierra apisonada de dos pisos a escala 1:4 reforzada con placas de acero probado en una mesa vibratoria biaxial. *Edificios*, 13.
- Satya Sai Profundo Raavi, &. D. (2023). Comportamiento compresivo y cortante de carteras de tierra apisonada estabilizadas con cemento y reforzadas con fibra de coco, tablillas de bambú y barras de acero. *Estructuras*, 1389-1401.
- Sena, B., & Rajib, S. (2022). Investigación experimental y numérica de las características de resistencia mecánica de muros de tierra apisonada rehabilitados con fibras naturales. *Geotextiles y Geomembranas*, 970-993.
- Sima Samadianfard, &. V. (2023). Efecto de estabilización sobre el comportamiento Higrotérmico de materiales de tierra apisonada . *Materiales de Construcción y Construcción*, 409.
- SMG, S. G. (2017). *Sismología de México*. México: Gobierno de México.

- Sorín, C. (2023). Características termofísicas de la arcilla para la construcción eficiente de muros de tierra apisonada. *Materiales*, 16.
- SSN, S. S. (2023). *Reportes especiales se sismicidad en Oaxaca*. Oaxaca: Universidad Autónoma de México.
- Suarez Bandonedo, M. (2006). Construcción con tierra. *Construcción*, 15-20.
- Suelos, C. (2023). Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. En *Manual de Diseño de Carreteras de California (HDM)* (pág. 12).
- Tecnológica, C. a. (2020). *La importancia del contenido de agua en los suelos*. Cromtek.
- Tectónica. (2020). Bloque prefabricado de tierra natural compactada. *TECTONICA*, 5.
- Tortajada, M. G. (2000). La tapia valenciana: una técnica poco conocida. *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Madrid, 5.
- UNE. (2023). *Norma española UNE 41410, Bloques de Tierra Comprimida (BTC) para muros y tabiques*. España: Normalización española.
- University, P. S. (2023). *Introducción a los suelos: La calidad de los suelos*.
- Urbano Tejada, e. a. (2016). Uso del Tapial en la construcción. *Ministerio de vivienda*, 15-30.
- Zhou, T. (2019). Estudio experimental sobre las pruebas de mesa vibratoria de una estructura moderna de tierra apisonada reforzada interiormente. *Materiales de Construcción y Construcción*, 567-578.

X ANEXOS

10.1 PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SÓLIDOS

En la tabla 44 se presentan los pesos de los matraces usados en la prueba.

Tabla 44. Datos de matraces, peso y temperatura

Peso matraz aforado (gr)	Temperatura inicio de bulbo (°C)	Temperatura mitad bulbo (°C)
695	36	35.5
696.2	29	28
696.9	25	24
696.9	22	21
697.1	20	19
697.3	19	18
697.4	17	16.4

En la tabla 45 se presentan los datos para la obtención del peso específico relativo.

Tabla 45. Obtención del peso específico relativo de sólidos

Peso específico relativo de sólidos (gr)	
Ws	50
Matraz seco sin suelo	19.5
Matraz seco con suelo seco	248.9
Wfs	726.9
Temperatura	17
Wfw	697.4
Ss	2.439

La figura 139 indica la curva de la calibración del matraz.

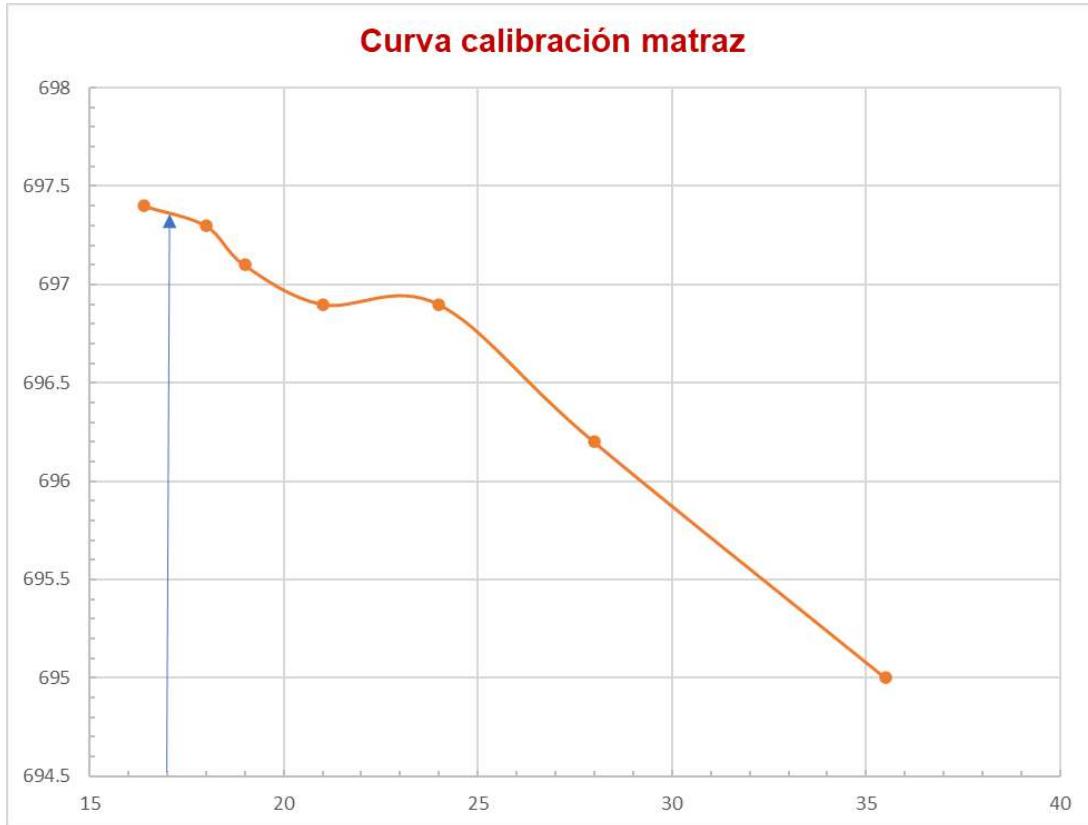


Figura 141. Curva de calibración del matraz (2025).

10.2 PRUEBA DE SUPERFICIE ESPECÍFICA

En la tabla 46 se representa los tipos de arcillas dependiendo la superficie específica.

Tabla 46. Superficie específica de algunas arcillas

Tipo de arcilla	m ² /g
Caolinita	5 a 20
Illita	100 a 200
Montmorillonita	300 a 500
Vermiculita	700 a 800

10.3 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL SUELO

En las tablas 47, 48 y 49 se muestran todos los esfuerzos a detalle de las probetas de referencia sin refuerzo.

Tabla 47. Esfuerzos de la probeta RP1.4

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - RP1.4							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $A_c = A_o / (1 - \delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	35	0.035	0.003751	0.818	8.18	9.9701	0.8205
20	40	0.04	0.004287	0.818	16.36	10.0220	1.6324
30	42	0.042	0.004502	0.818	24.54	10.0430	2.4435
40	45	0.045	0.004823	0.818	32.72	10.0745	3.2478
50	52	0.052	0.005573	0.818	40.9	10.1489	4.0300
60	53	0.053	0.005681	0.818	49.08	10.1596	4.8309
70	70	0.07	0.007503	0.818	57.26	10.3453	5.5349
80	89	0.089	0.009539	0.818	65.44	10.5611	6.1963
90	120	0.12	0.012862	0.818	73.62	10.9331	6.7337
100	135	0.135	0.014469	0.818	81.8	11.1227	7.3543
110	165	0.165	0.017685	0.818	89.98	11.5223	7.8092
120	175	0.175	0.018757	0.818	98.16	11.6620	8.4171
130	193	0.193	0.020686	0.818	106.34	11.9221	8.9196

Tabla 48. Esfuerzos de la probeta RP1.5

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - RP1.5							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $A_c = A_o / (1 - \delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	70	0.07	0.007503	0.818	8.18	10.3453	0.7907
20	82	0.082	0.008789	0.818	16.36	10.4806	1.5610
30	93	0.093	0.009968	0.818	24.54	10.6077	2.3134
40	107	0.107	0.011468	0.818	32.72	10.7740	3.0370
50	119	0.119	0.012755	0.818	40.9	10.9207	3.7452
60	142	0.142	0.01522	0.818	49.08	11.2135	4.3769
70	159	0.159	0.017042	0.818	57.26	11.4401	5.0052
80	197	0.197	0.021115	0.818	65.44	11.9815	5.4618
90	201	0.201	0.021543	0.818	73.62	12.0415	6.1139
100	225	0.225	0.024116	0.818	81.8	12.4144	6.5891
110	263	0.263	0.028189	0.818	89.98	13.0545	6.8927
120	298	0.298	0.03194	0.818	98.16	13.7053	7.1622
130	335	0.335	0.035906	0.818	106.34	14.4679	7.3501
140	370	0.37	0.039657	0.818	114.52	15.2717	7.4989
141	378	0.378	0.040514	0.818	115.338	15.4681	7.4565

Tabla 49. Esfuerzos de la probeta RP1.6

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - RP1.6					ESFUERZOS		
DEFORMACIONES				Lectura del anillo	Carga	Área corr. Ac=Ao/(1- δ/L) (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformaci ón δ (mm)	Deformaci ón δ (cm)	$\epsilon=\delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. Ac=Ao/(1- δ/L) (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	11	0.011	0.001174	0.818	8.18	9.7282	0.8409
20	21	0.021	0.002241	0.818	16.36	9.8275	1.6647
30	33	0.033	0.003522	0.818	24.54	9.9495	2.4665
40	43	0.043	0.004589	0.818	32.72	10.0534	3.2546
50	54	0.054	0.005763	0.818	40.9	10.1703	4.0215
60	67	0.067	0.00715	0.818	49.08	10.3121	4.7595
70	75	0.075	0.008004	0.818	57.26	10.4012	5.5051
80	88	0.088	0.009392	0.818	65.44	10.5495	6.2031
90	95	0.095	0.010139	0.818	73.62	10.6311	6.9250
100	98	0.098	0.010459	0.818	81.8	10.6665	7.6689
110	111	0.111	0.011846	0.818	89.98	10.8224	8.3142

10.4 DOSIFICACIÓN DE PROBETAS DE TAPIAL

En este apartado se muestran imágenes de las pruebas realizadas a los suelos de la estancia.



Figura 143. Compactación de probetas de tapial por medios mecánicos (2024).

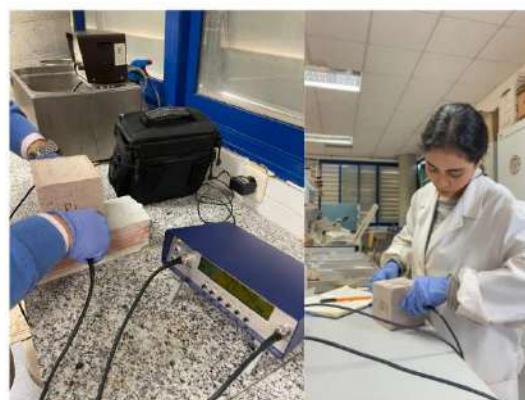


Figura 142. Ensayo de ultrasonido en probetas de tapial (2024).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento



Figura 145. Ensayo de densidad y porosidad (2024).



Figura 144. Ensayo de módulo secante de elasticidad en compresión. (2024).

10.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS DE TAPIAL

En este apartado se presentan las curvas de deformación con sus respectivas tablas de esfuerzos soportados de las probetas.

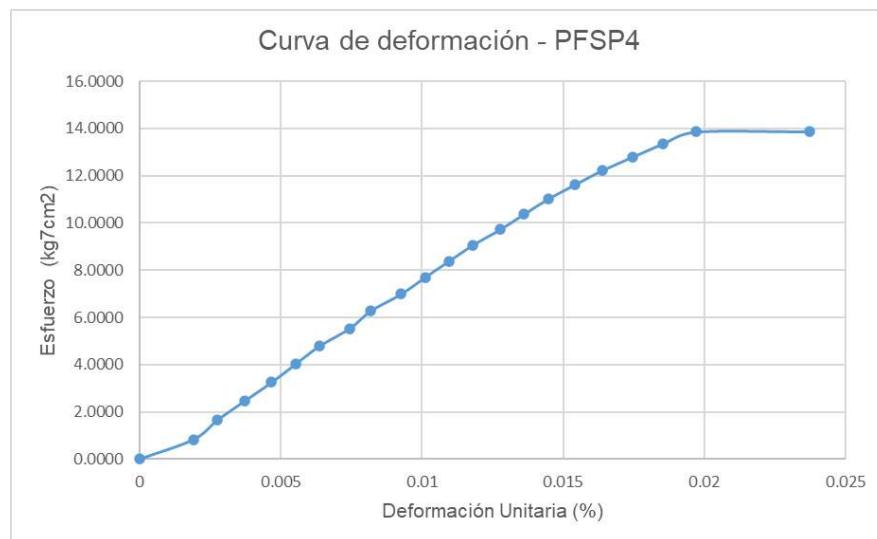


Figura 146. Curva de deformación de probeta reforzada con polipropileno - PFSP4 (2024).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

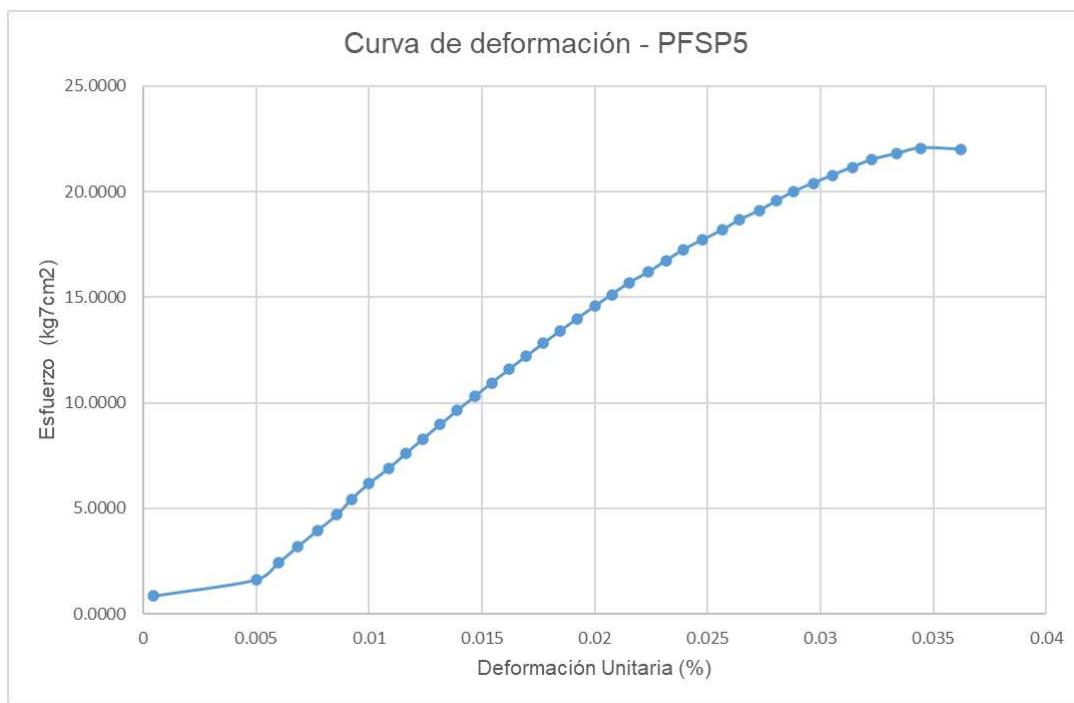


Figura 148. Curva de deformación de probeta reforzada con polipropileno – PFSP5 (2024).

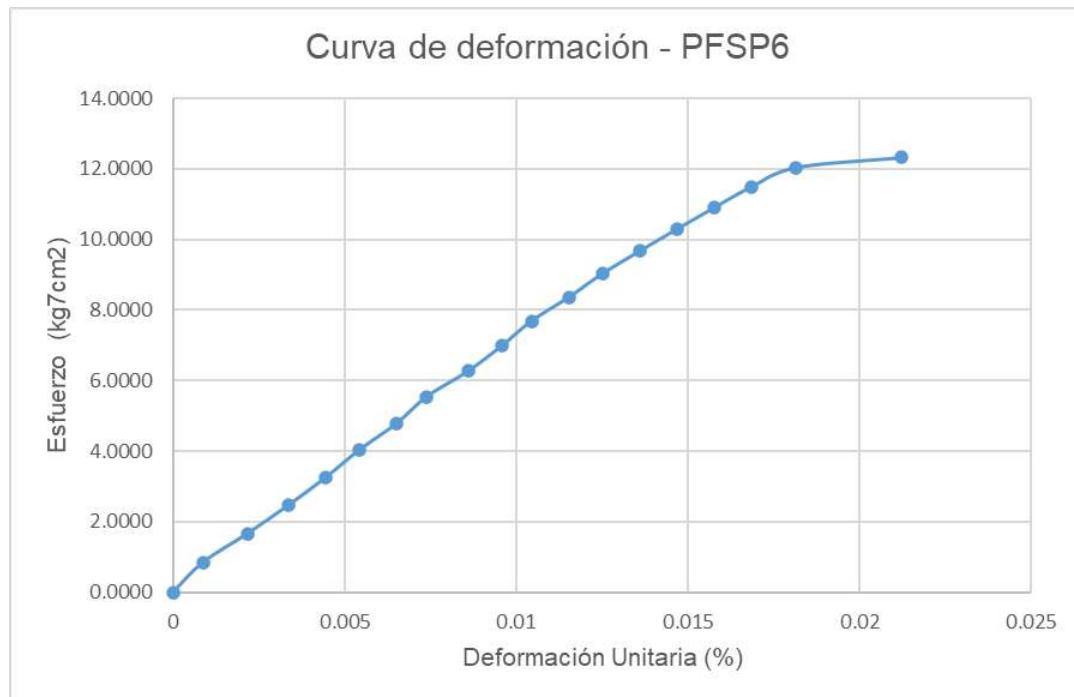


Figura 147. Curva de deformación de probeta reforzada con polipropileno – PFSP6 (2024).

Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 50. Esfuerzos a compresión simple de probeta de polipropileno PFSP4

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFSP4							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac=Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	18	0.018	0.001915	0.818	8.18	9.7975	0.8349
20	26	0.026	0.002766	0.818	16.36	9.8780	1.6562
30	35	0.035	0.003723	0.818	24.54	9.9701	2.4614
40	44	0.044	0.004681	0.818	32.72	10.0640	3.2512
50	52	0.052	0.005532	0.818	40.9	10.1489	4.0300
60	60	0.06	0.006383	0.818	49.08	10.2353	4.7952
70	70	0.07	0.007447	0.818	57.26	10.3453	5.5349
80	77	0.077	0.008191	0.818	65.44	10.4238	6.2780
90	87	0.087	0.009255	0.818	73.62	10.5380	6.9862
100	95	0.095	0.010106	0.818	81.8	10.6311	7.6944
110	103	0.103	0.010957	0.818	89.98	10.7259	8.3890
120	111	0.111	0.011809	0.818	98.16	10.8224	9.0700
130	120	0.12	0.012766	0.818	106.34	10.9331	9.7264
140	128	0.128	0.013617	0.818	114.52	11.0334	10.3794
150	136	0.136	0.014468	0.818	122.7	11.1356	11.0187
160	145	0.145	0.015426	0.818	130.88	11.2528	11.6309
170	154	0.154	0.016383	0.818	139.06	11.3725	12.2277
180	164	0.164	0.017447	0.818	147.24	11.5086	12.7940
190	174	0.174	0.018511	0.818	155.42	11.6479	13.3432
200	185	0.185	0.019681	0.818	163.6	11.8051	13.8584
210	223	0.223	0.023723	0.818	171.78	12.3824	13.8729

Tabla 51. Esfuerzos a compresión simple de probeta de polipropileno PFSP5

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFSP5							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac=Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
10	4	0.004	0.000435	0.818	8.18	9.6598	0.8468
20	46	0.046	0.005	0.818	16.36	10.0851	1.6222
30	55	0.055	0.005978	0.818	24.54	10.1811	2.4103
40	63	0.063	0.006848	0.818	32.72	10.2680	3.1866
50	71	0.071	0.007717	0.818	40.9	10.3565	3.9492
60	79	0.079	0.008587	0.818	49.08	10.4464	4.6983
70	85	0.085	0.009239	0.818	57.26	10.5149	5.4456
80	92	0.092	0.01	0.818	65.44	10.5960	6.1759
90	100	0.1	0.01087	0.818	73.62	10.6902	6.8867
100	107	0.107	0.01163	0.818	81.8	10.7740	7.5924
110	114	0.114	0.012391	0.818	89.98	10.8591	8.2861
120	121	0.121	0.013152	0.818	98.16	10.9456	8.9680
130	128	0.128	0.013913	0.818	106.34	11.0334	9.6380
140	135	0.135	0.014674	0.818	114.52	11.1227	10.2960
150	142	0.142	0.015435	0.818	122.7	11.2135	10.9422
160	149	0.149	0.016196	0.818	130.88	11.3057	11.5765

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

170	156	0.156	0.016957	0.818	139.06	11.3995	12.1988
180	163	0.163	0.017717	0.818	147.24	11.4948	12.8093
190	170	0.17	0.018478	0.818	155.42	11.5917	13.4078
200	177	0.177	0.019239	0.818	163.6	11.6903	13.9945
210	184	0.184	0.02	0.818	171.78	11.7906	14.5692
220	191	0.191	0.020761	0.818	179.96	11.8926	15.1320
230	198	0.198	0.021522	0.818	188.14	11.9964	15.6830
240	206	0.206	0.022391	0.818	196.32	12.1173	16.2016
250	213	0.213	0.023152	0.818	204.5	12.2251	16.7279
260	220	0.22	0.023913	0.818	212.68	12.3348	17.2423
270	228	0.228	0.024783	0.818	220.86	12.4626	17.7218
280	236	0.236	0.025652	0.818	229.04	12.5931	18.1877
290	243	0.243	0.026413	0.818	237.22	12.7096	18.6647
300	251	0.251	0.027283	0.818	245.4	12.8453	19.1042
310	258	0.258	0.028043	0.818	253.58	12.9665	19.5565
320	265	0.265	0.028804	0.818	261.76	13.0900	19.9969
330	273	0.273	0.029674	0.818	269.94	13.2340	20.3974
340	281	0.281	0.030543	0.818	278.12	13.3813	20.7842
350	289	0.289	0.031413	0.818	286.3	13.5319	21.1575
360	297	0.297	0.032283	0.818	294.48	13.6858	21.5171
370	307	0.307	0.033337	0.818	302.66	13.8833	21.8002
380	317	0.317	0.034457	0.818	310.84	14.0866	22.0664
388	333	0.333	0.036196	0.818	317.384	14.4245	22.0031

Tabla 52. Esfuerzos a compresión simple de probeta de polipropileno PFSP6

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFSP6							
DEFORMACIONES				ESFUERZOS			
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	ε=δ/L (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. Ac=Ao/(1-δ/L) (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	8	0.008	0.00087	0.818	8.18	9.6987	0.8434
20	20	0.02	0.002174	0.818	16.36	9.8175	1.6664
30	31	0.031	0.00337	0.818	24.54	9.9289	2.4716
40	41	0.041	0.004457	0.818	32.72	10.0325	3.2614
50	50	0.05	0.005435	0.818	40.9	10.1275	4.0385
60	60	0.06	0.006522	0.818	49.08	10.2353	4.7952
70	68	0.068	0.007391	0.818	57.26	10.3231	5.5468
80	79	0.079	0.008587	0.818	65.44	10.4464	6.2643
90	88	0.088	0.009565	0.818	73.62	10.5495	6.9785
100	96	0.096	0.010435	0.818	81.8	10.6429	7.6859
110	106	0.106	0.011522	0.818	89.98	10.7619	8.3610
120	115	0.115	0.0125	0.818	98.16	10.8714	9.0292
130	125	0.125	0.013587	0.818	106.34	10.9956	9.6711
140	135	0.135	0.014674	0.818	114.52	11.1227	10.2960
150	145	0.145	0.015761	0.818	122.7	11.2528	10.9039
160	155	0.155	0.016848	0.818	130.88	11.3860	11.4948
170	167	0.167	0.018152	0.818	139.06	11.5500	12.0398
180	195	0.195	0.021196	0.818	147.24	11.9517	12.3195

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

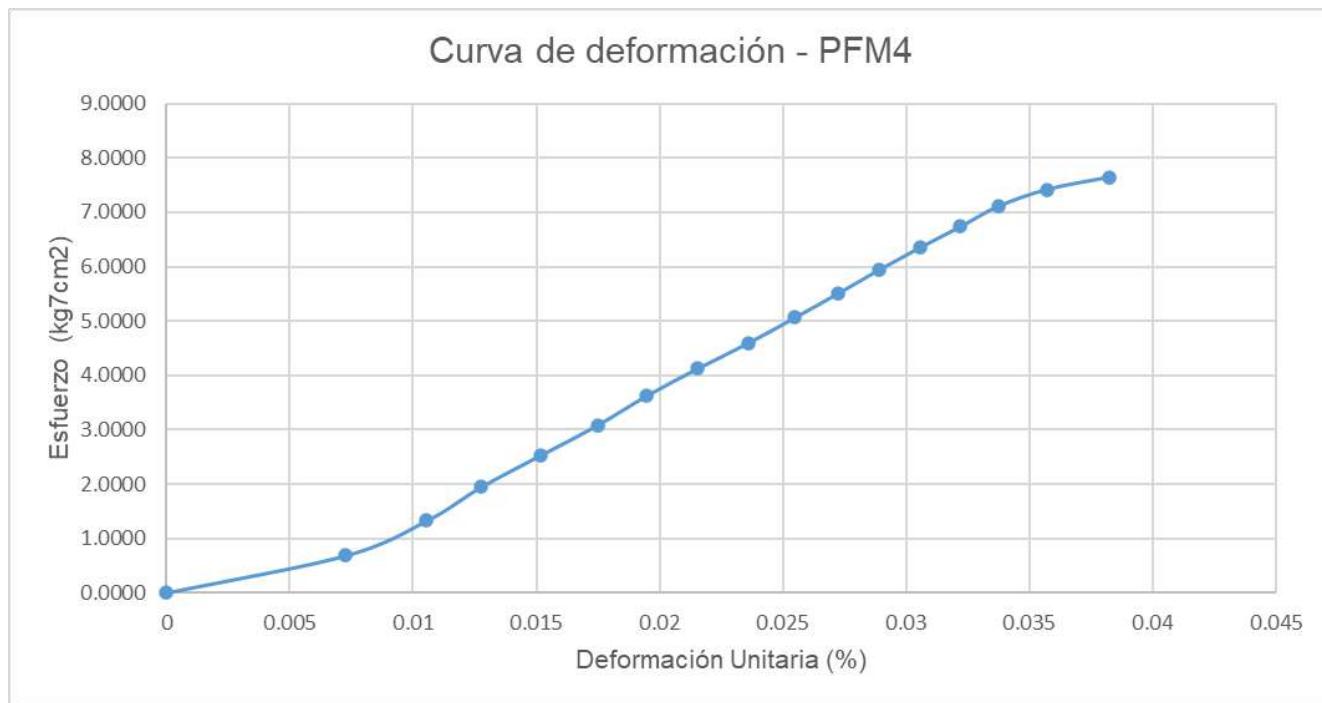


Figura 150. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra malla – PFM4 (2024).

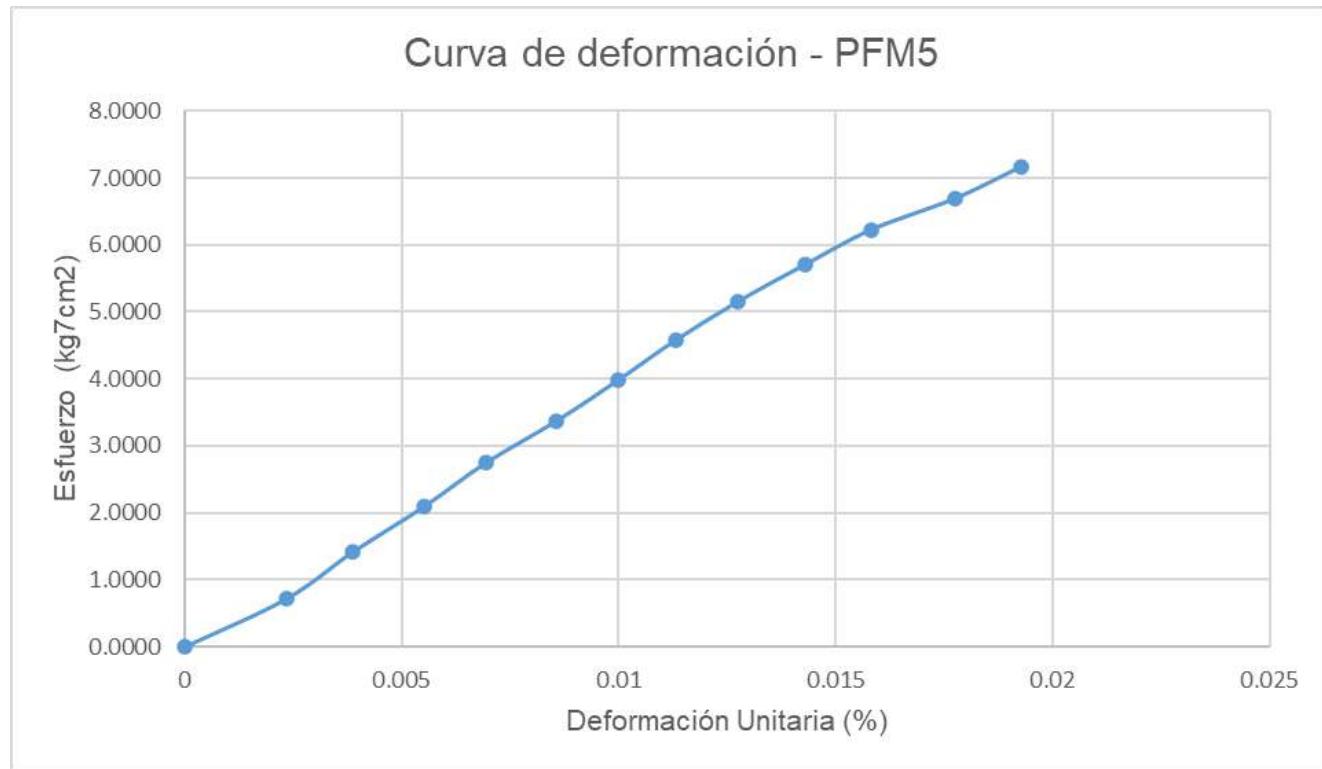


Figura 149. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra malla – PFM5 (2024).

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

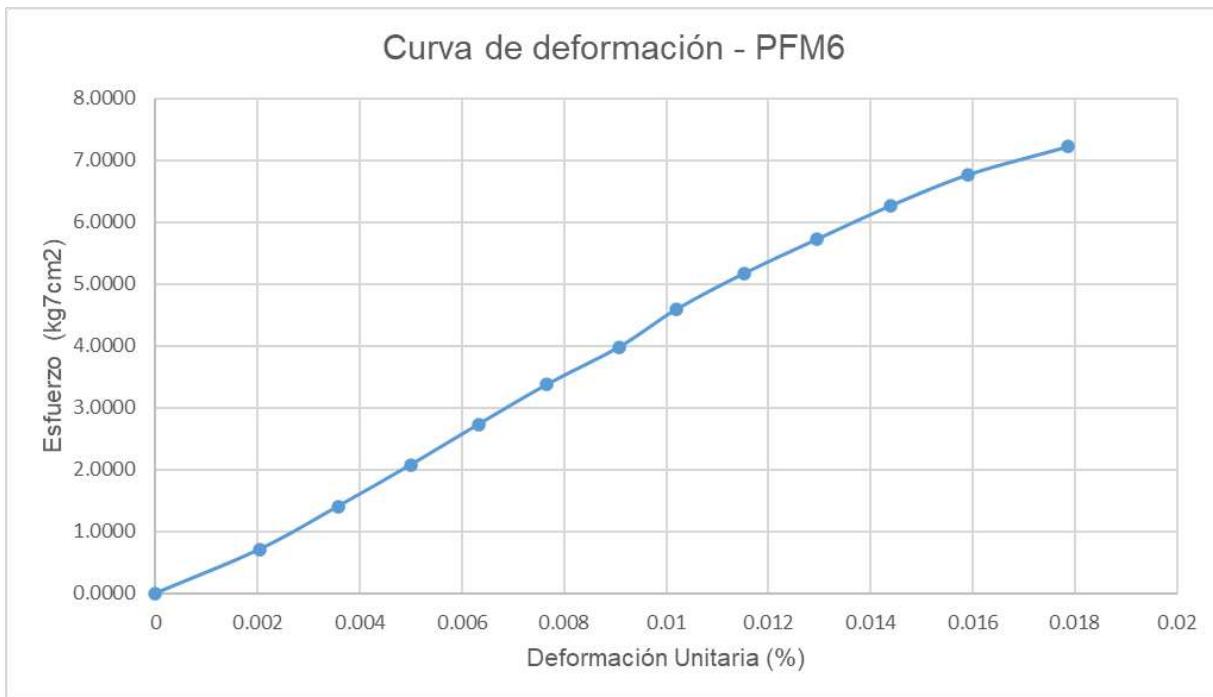


Figura 151. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra malla – PFM6 (2024).

Tabla 53. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra malla PFM4

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFM4							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1 - \delta/L)$ (cm²)	Esfuerzo (kg/cm²)
0	0	0	0	0.818	0	11.1628	0.0000
10	66	0.066	0.007253	0.818	8.18	11.9516	0.6844
20	96	0.096	0.010549	0.818	16.36	12.3482	1.3249
30	116	0.116	0.012747	0.818	24.54	12.6276	1.9434
40	138	0.138	0.015165	0.818	32.72	12.9499	2.5267
50	159	0.159	0.017473	0.818	40.9	13.2733	3.0814
60	177	0.177	0.019451	0.818	49.08	13.5636	3.6185
70	196	0.196	0.021538	0.818	57.26	13.8841	4.1241
80	215	0.215	0.023626	0.818	65.44	14.2201	4.6019
90	232	0.232	0.025495	0.818	73.62	14.5349	5.0650
100	248	0.248	0.027253	0.818	81.8	14.8442	5.5106
110	263	0.263	0.028901	0.818	89.98	15.1463	5.9407
120	278	0.278	0.030549	0.818	98.16	15.4610	6.3489
130	293	0.293	0.032198	0.818	106.34	15.7890	6.7351
140	307	0.307	0.033736	0.818	114.52	16.1080	7.1095
150	325	0.325	0.035714	0.818	122.7	16.5375	7.4195
160	348	0.348	0.038242	0.818	130.88	17.1209	7.6445

Tabla 54. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra malla PFM5

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFM5							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformaci ón δ (mm)	Deformaci ón δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	11.1037	0.0000
10	23	0.023	0.002347	0.818	8.18	11.3651	0.7197
20	38	0.038	0.003878	0.818	16.36	11.5423	1.4174
30	54	0.054	0.00551	0.818	24.54	11.7375	2.0907
40	68	0.068	0.006939	0.818	32.72	11.9138	2.7464
50	84	0.084	0.008571	0.818	40.9	12.1219	3.3741
60	98	0.098	0.01	0.818	49.08	12.3101	3.9870
70	111	0.111	0.011327	0.818	57.26	12.4901	4.5844
80	125	0.125	0.012755	0.818	65.44	12.6899	5.1569
90	140	0.14	0.014286	0.818	73.62	12.9112	5.7020
100	155	0.155	0.015816	0.818	81.8	13.1404	6.2251
110	174	0.174	0.017755	0.818	89.98	13.4427	6.6936
120	189	0.189	0.019286	0.818	98.16	13.6913	7.1695

Tabla 55. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra malla PFM6

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFM6							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformaci ón δ (mm)	Deformaci ón δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	11.2221	0.0000
10	20	0.02	0.002041	0.818	8.18	11.4511	0.7143
20	35	0.035	0.003571	0.818	16.36	11.6291	1.4068
30	49	0.049	0.005	0.818	24.54	11.8003	2.0796
40	62	0.062	0.006327	0.818	32.72	11.9639	2.7349
50	75	0.075	0.007653	0.818	40.9	12.1320	3.3712
60	89	0.089	0.009082	0.818	49.08	12.3185	3.9843
70	100	0.1	0.010204	0.818	57.26	12.4690	4.5922
80	113	0.113	0.011531	0.818	65.44	12.6518	5.1724
90	127	0.127	0.012959	0.818	73.62	12.8546	5.7271
100	141	0.141	0.014388	0.818	81.8	13.0642	6.2614
110	156	0.156	0.015918	0.818	89.98	13.2963	6.7673
120	175	0.175	0.017857	0.818	98.16	13.6026	7.2163

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento



Figura 153. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de palma – PFP4 (2024).

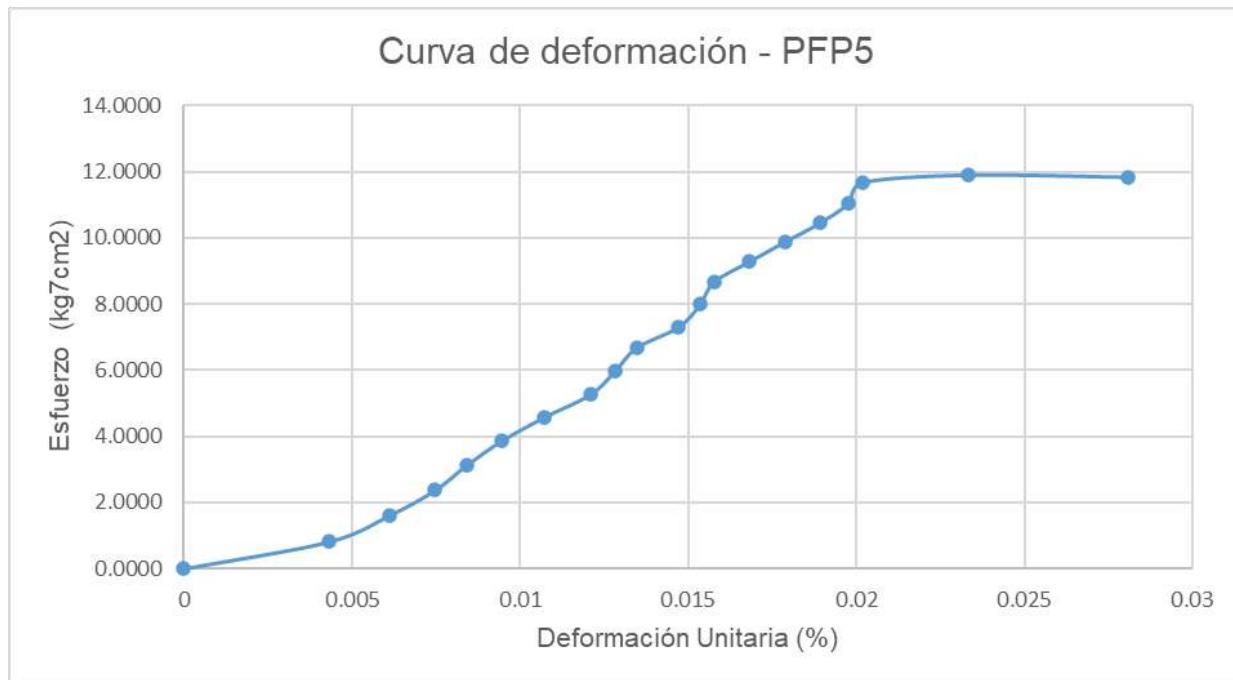


Figura 152. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de palma – PFP5 (2024).

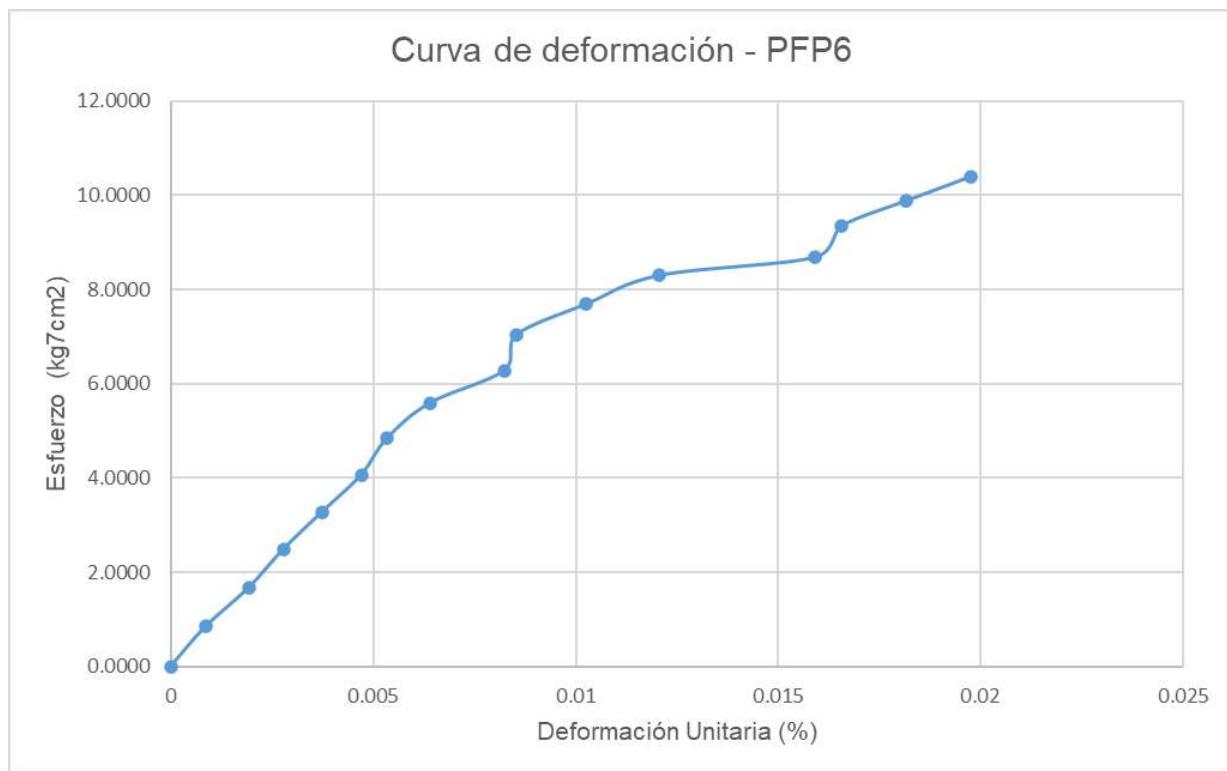


Figura 154. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de palma – PFP6 (2024).

Tabla 56. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra malla PFP4

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFP4							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformaci ón δ (mm)	Deformaci ón δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. Ac=Ao/(1-δ/L) (cm²)	Esfuerzo (kg/cm²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	46	0.046	0.004847	0.818	8.18	10.0851	0.8111
20	61	0.061	0.006428	0.818	16.36	10.2462	1.5967
30	73	0.073	0.007692	0.818	24.54	10.3788	2.3644
40	82	0.082	0.008641	0.818	32.72	10.4806	3.1220
50	93	0.093	0.0098	0.818	40.9	10.6077	3.8557
60	101	0.101	0.010643	0.818	49.08	10.7021	4.5860
70	115	0.115	0.012118	0.818	57.26	10.8714	5.2671
80	124	0.124	0.013066	0.818	65.44	10.9830	5.9583
90	137	0.137	0.014436	0.818	73.62	11.1485	6.6036
100	157	0.157	0.016544	0.818	81.8	11.4130	7.1673
110	162	0.162	0.017071	0.818	89.98	11.4811	7.8372
120	167	0.167	0.017597	0.818	98.16	11.5500	8.4987
130	180	0.18	0.018967	0.818	106.34	11.7331	9.0632
140	192	0.192	0.020232	0.818	114.52	11.9074	9.6176
150	204	0.204	0.021496	0.818	122.7	12.0869	10.1515

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 57. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra palma PFP5

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFP5					ESFUERZOS		
DEFORMACIONES				Lectura del anillo	Carga	Área corr. Ac=Ao/(1- δ/L) (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	41	0.041	0.004311	0.818	8.18	10.0325	0.8154
20	58	0.058	0.006099	0.818	16.36	10.2135	1.6018
30	71	0.071	0.007466	0.818	24.54	10.3565	2.3695
40	80	0.08	0.008412	0.818	32.72	10.4578	3.1288
50	90	0.09	0.009464	0.818	40.9	10.5727	3.8685
60	102	0.102	0.010726	0.818	49.08	10.7140	4.5809
70	115	0.115	0.012093	0.818	57.26	10.8714	5.2671
80	122	0.122	0.012829	0.818	65.44	10.9580	5.9719
90	128	0.128	0.01346	0.818	73.62	11.0334	6.6724
100	140	0.14	0.014721	0.818	81.8	11.1874	7.3118
110	146	0.146	0.015352	0.818	89.98	11.2660	7.9869
120	150	0.15	0.015773	0.818	98.16	11.3190	8.6721
130	160	0.16	0.016824	0.818	106.34	11.4538	9.2843
140	170	0.17	0.017876	0.818	114.52	11.5917	9.8794
150	180	0.18	0.018927	0.818	122.7	11.7331	10.4576
160	188	0.188	0.019769	0.818	130.88	11.8487	11.0459
170	192	0.192	0.020189	0.818	139.06	11.9074	11.6785
180	222	0.222	0.023344	0.818	147.24	12.3665	11.9063
190	267	0.267	0.028076	0.818	155.42	13.1257	11.8409

Tabla 58. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra palma PFP6

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFP6					ESFUERZOS		
DEFORMACIONES				Lectura del anillo	Carga	Área corr. Ac=Ao/(1- δ/L) (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	8	0.008	0.000855	0.818	8.18	9.6987	0.8434
20	18	0.018	0.001923	0.818	16.36	9.7975	1.6698
30	26	0.026	0.002778	0.818	24.54	9.8780	2.4843
40	35	0.035	0.003739	0.818	32.72	9.9701	3.2818
50	44	0.044	0.004701	0.818	40.9	10.0640	4.0640
60	50	0.05	0.005342	0.818	49.08	10.1275	4.8462
70	60	0.06	0.00641	0.818	57.26	10.2353	5.5944
80	77	0.077	0.008226	0.818	65.44	10.4238	6.2780
90	80	0.08	0.008547	0.818	73.62	10.4578	7.0397
100	96	0.096	0.010256	0.818	81.8	10.6429	7.6859
110	113	0.113	0.012073	0.818	89.98	10.8468	8.2955
120	149	0.149	0.015919	0.818	98.16	11.3057	8.6823
130	155	0.155	0.01656	0.818	106.34	11.3860	9.3396
140	170	0.17	0.018162	0.818	114.52	11.5917	9.8794
150	185	0.185	0.019765	0.818	122.7	11.8051	10.3938
160	193	0.193	0.02062	0.818	130.88	11.9221	10.9779
170	199	0.199	0.021261	0.818	139.06	12.0114	11.5773
180	208	0.208	0.022222	0.818	147.24	12.1479	12.1206
190	237	0.237	0.025321	0.818	155.42	12.6096	12.3255
200	280	0.28	0.029915	0.818	163.6	13.3627	12.2430

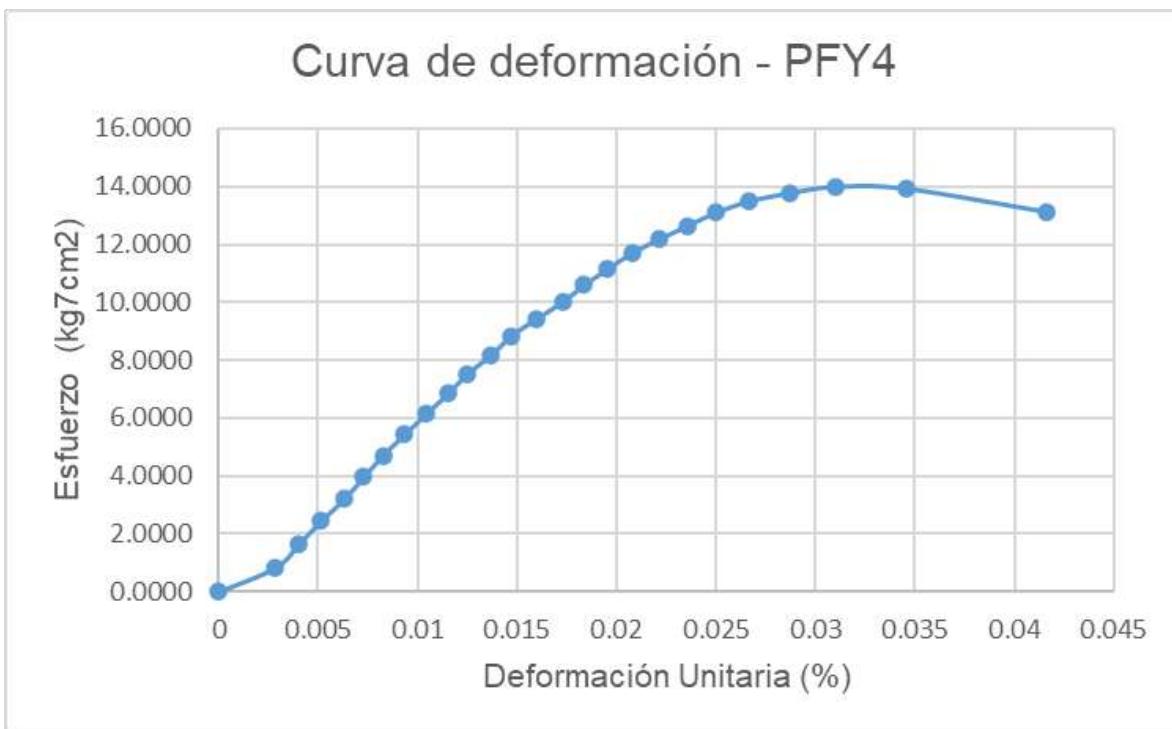


Figura 156. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de yute – PFY4 (2024).

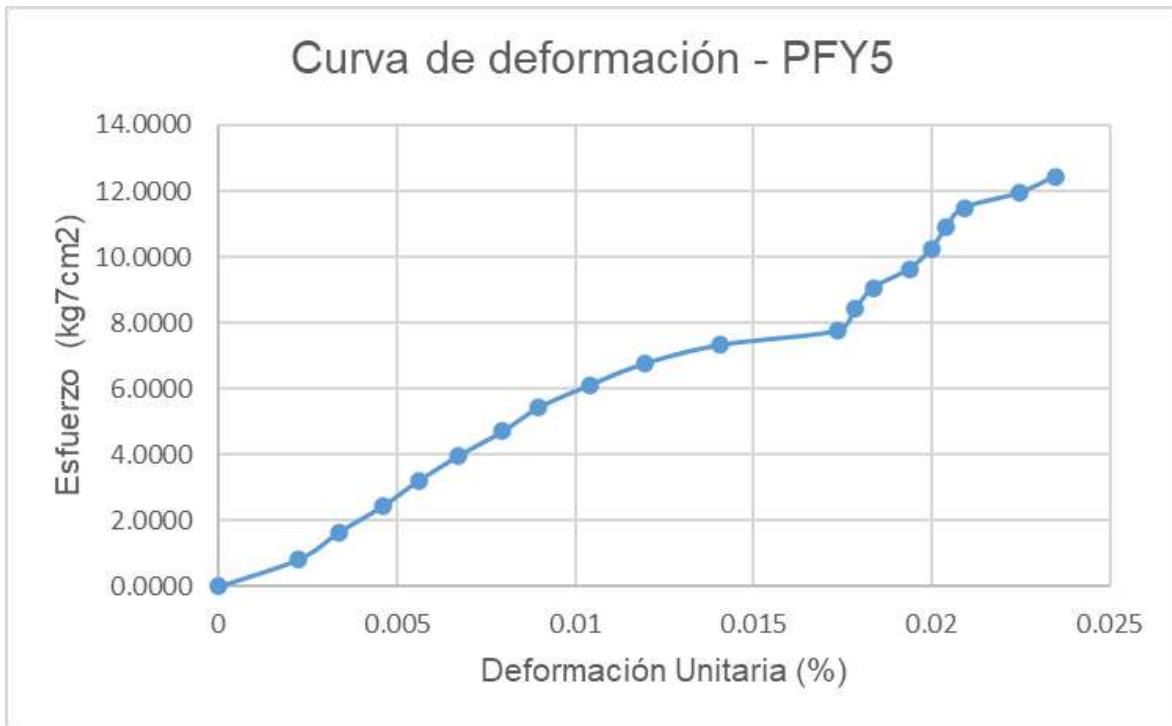


Figura 155. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de yute – PFY5 (2024).

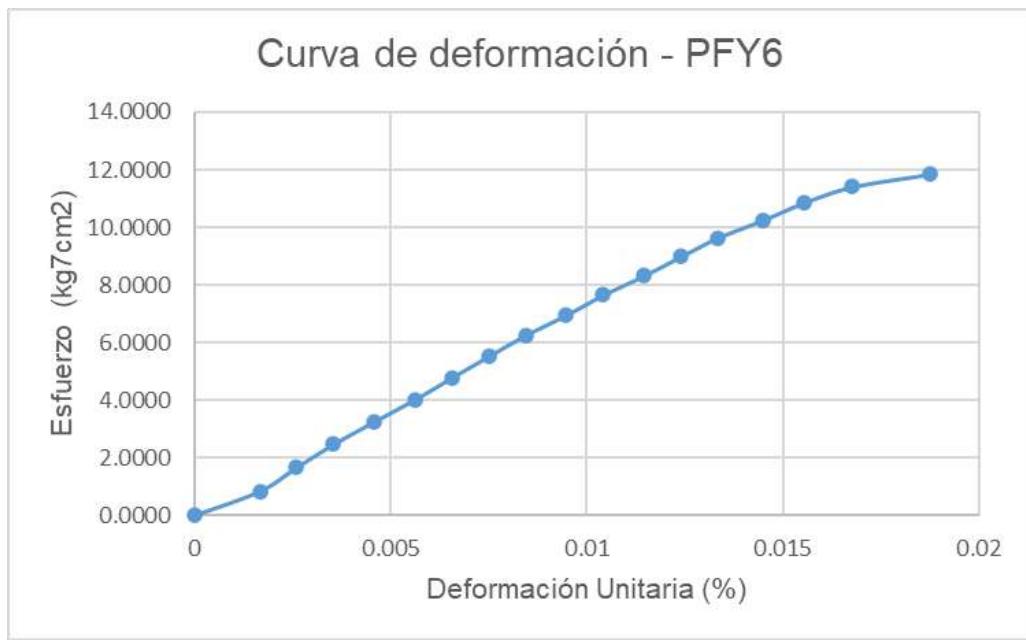


Figura 157. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de yute – PFY6 (2024).

Tabla 59. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra yute PFY4

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFY4							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformaci ón δ (mm)	Deformaci ón δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao / (1 - \delta/L)$ (cm²)	Esfuerzo (kg/cm²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	26	0.026	0.002826	0.818	8.18	9.8780	0.8281
20	37	0.037	0.004022	0.818	16.36	9.9908	1.6375
30	47	0.047	0.005109	0.818	24.54	10.0956	2.4308
40	58	0.058	0.006304	0.818	32.72	10.2135	3.2036
50	67	0.067	0.007283	0.818	40.9	10.3121	3.9662
60	76	0.076	0.008261	0.818	49.08	10.4125	4.7136
70	86	0.086	0.009348	0.818	57.26	10.5264	5.4396
80	96	0.096	0.010435	0.818	65.44	10.6429	6.1487
90	106	0.106	0.011522	0.818	73.62	10.7619	6.8408
100	115	0.115	0.0125	0.818	81.8	10.8714	7.5244
110	126	0.126	0.013696	0.818	89.98	11.0082	8.1739
120	135	0.135	0.014674	0.818	98.16	11.1227	8.8252
130	147	0.147	0.015978	0.818	106.34	11.2792	9.4280
140	159	0.159	0.017283	0.818	114.52	11.4401	10.0104
150	169	0.169	0.01837	0.818	122.7	11.5778	10.5979
160	180	0.18	0.019565	0.818	130.88	11.7331	11.1548
170	191	0.191	0.020761	0.818	139.06	11.8926	11.6929
180	204	0.204	0.022174	0.818	147.24	12.0869	12.1818
190	217	0.217	0.023587	0.818	155.42	12.2875	12.6486
200	230	0.23	0.025	0.818	163.6	12.4950	13.0932
210	245	0.245	0.02663	0.818	171.78	12.7432	13.4801
220	264	0.264	0.028696	0.818	179.96	13.0722	13.7666
230	285	0.285	0.030978	0.818	188.14	13.4562	13.9817
240	318	0.318	0.034565	0.818	196.32	14.1073	13.9162
250	383	0.383	0.04163	0.818	204.5	15.5934	13.1145

Tabla 60. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra yute PFY5

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFY5							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	22	0.022	0.002245	0.818	8.18	9.8376	0.8315
20	33	0.033	0.003367	0.818	16.36	9.9495	1.6443
30	45	0.045	0.004592	0.818	24.54	10.0745	2.4359
40	55	0.055	0.005612	0.818	32.72	10.1811	3.2138
50	66	0.066	0.006735	0.818	40.9	10.3010	3.9705
60	78	0.078	0.007959	0.818	49.08	10.4351	4.7034
70	88	0.088	0.00898	0.818	57.26	10.5495	5.4277
80	102	0.102	0.010408	0.818	65.44	10.7140	6.1079
90	117	0.117	0.011939	0.818	73.62	10.8960	6.7566
100	138	0.138	0.014082	0.818	81.8	11.1614	7.3288
110	170	0.17	0.017347	0.818	89.98	11.5917	7.7624
120	175	0.175	0.017857	0.818	98.16	11.6620	8.4171
130	180	0.18	0.018367	0.818	106.34	11.7331	9.0632
140	90	0.09	0.009184	0.818	114.52	10.5727	10.8317
150	196	0.196	0.02	0.818	122.7	11.9666	10.2535
160	200	0.2	0.020408	0.818	130.88	12.0264	10.8827
170	205	0.205	0.020918	0.818	139.06	12.1021	11.4906
180	220	0.22	0.022449	0.818	147.24	12.3348	11.9370
190	230	0.23	0.023469	0.818	155.42	12.4950	12.4386

Tabla 61. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra yute PFY6

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFY6							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	16	0.016	0.001667	0.818	8.18	9.7776	0.8366
20	25	0.025	0.002604	0.818	16.36	9.8678	1.6579
30	34	0.034	0.003542	0.818	24.54	9.9598	2.4639
40	44	0.044	0.004583	0.818	32.72	10.0640	3.2512
50	54	0.054	0.005625	0.818	40.9	10.1703	4.0215
60	63	0.063	0.006563	0.818	49.08	10.2680	4.7799
70	72	0.072	0.0075	0.818	57.26	10.3676	5.5230
80	81	0.081	0.008438	0.818	65.44	10.4692	6.2507
90	91	0.091	0.009479	0.818	73.62	10.5843	6.9556
100	100	0.1	0.010417	0.818	81.8	10.6902	7.6519
110	110	0.11	0.011458	0.818	89.98	10.8103	8.3236
120	119	0.119	0.012396	0.818	98.16	10.9207	8.9884
130	128	0.128	0.013333	0.818	106.34	11.0334	9.6380
140	139	0.139	0.014479	0.818	114.52	11.1744	10.2484
150	149	0.149	0.015521	0.818	122.7	11.3057	10.8529
160	161	0.161	0.016771	0.818	130.88	11.4674	11.4132
170	180	0.18	0.01875	0.818	139.06	11.7331	11.8519

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

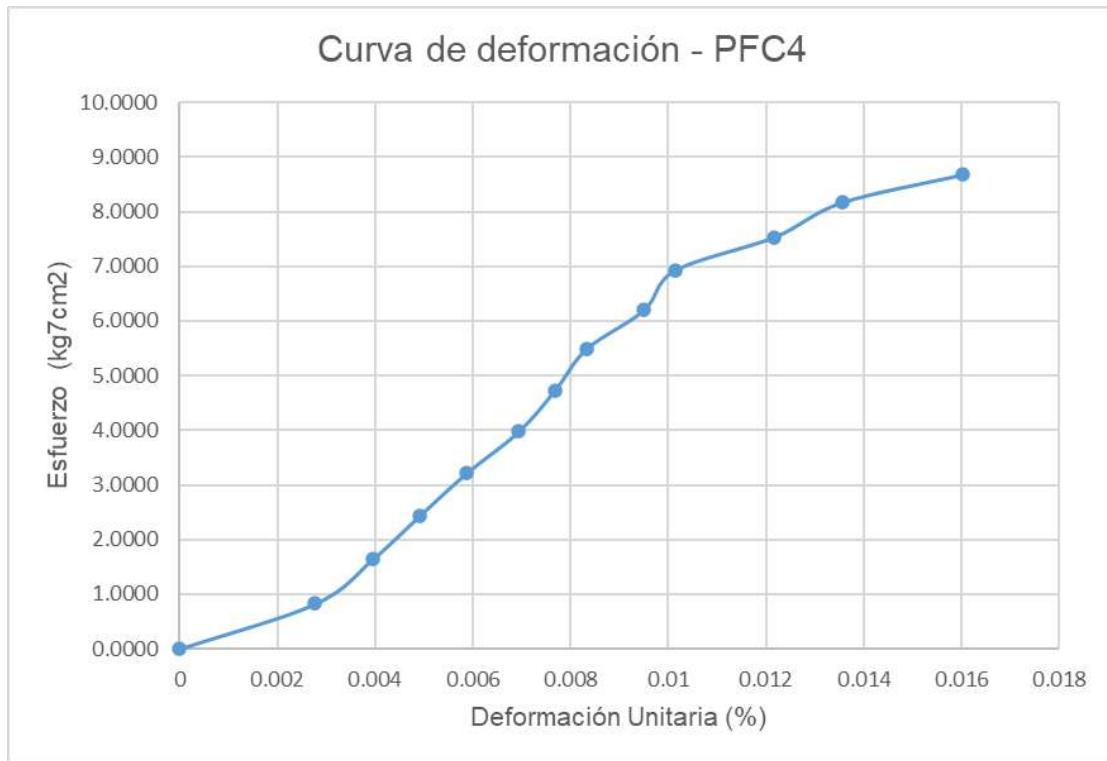


Figura 159. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de caña – PFC4 (2024).

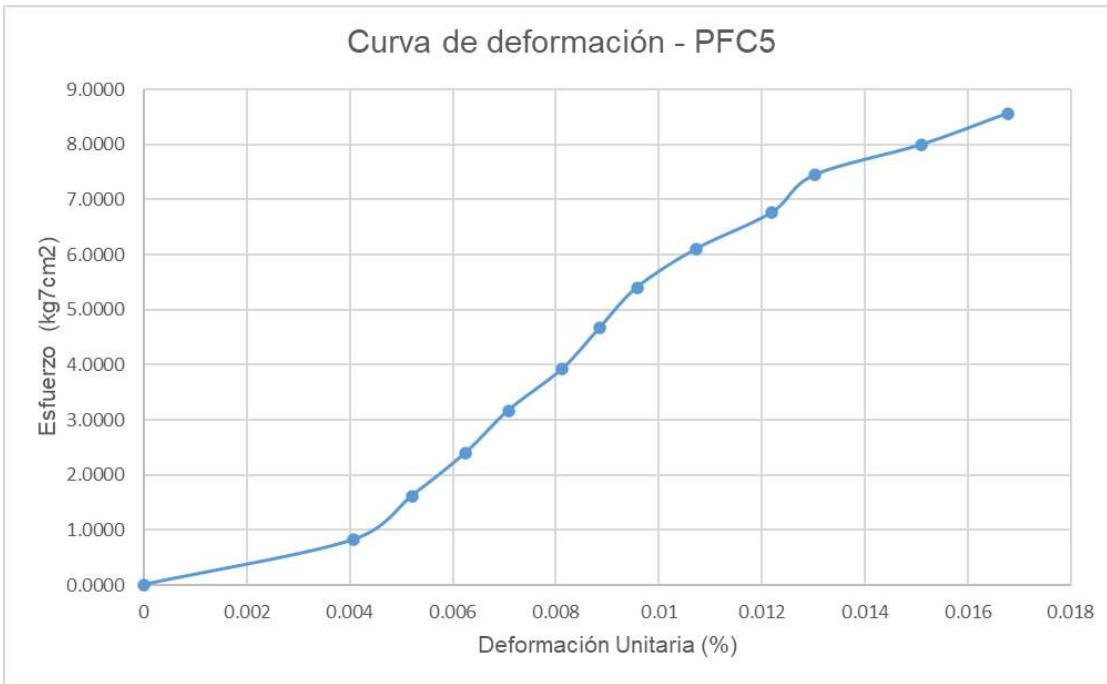


Figura 158. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de caña – PFC5 (2024).

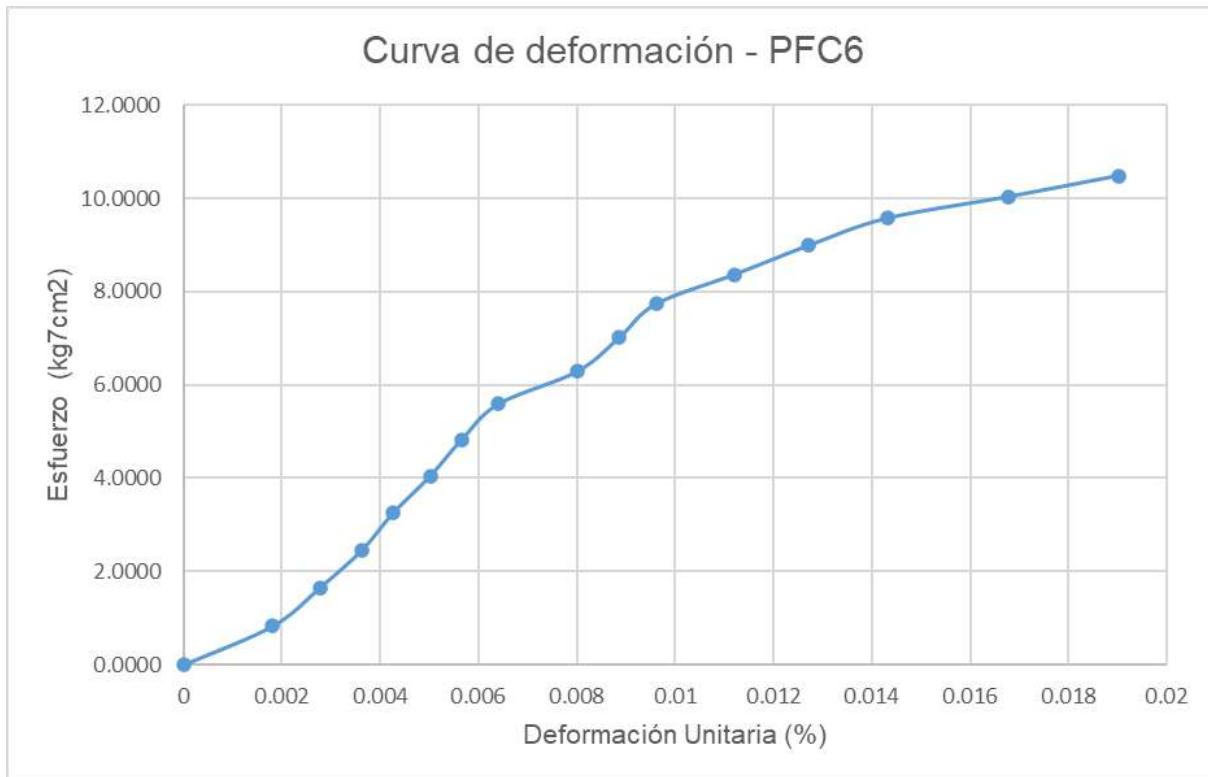


Figura 160. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de caña – PFC6 (2024).

Tabla 62. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra caña PFC4

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFC4							
DEFORMACIONES				ESFUERZOS			
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $A_c = A_o / (1 - \delta/L)$ (cm²)	Esfuerzo (kg/cm²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	26	0.026	0.002775	0.818	8.18	9.8780	0.8281
20	37	0.037	0.003949	0.818	16.36	9.9908	1.6375
30	46	0.046	0.004909	0.818	24.54	10.0851	2.4333
40	55	0.055	0.00587	0.818	32.72	10.1811	3.2138
50	65	0.065	0.006937	0.818	40.9	10.2900	3.9747
60	72	0.072	0.007684	0.818	49.08	10.3676	4.7340
70	78	0.078	0.008324	0.818	57.26	10.4351	5.4873
80	89	0.089	0.009498	0.818	65.44	10.5611	6.1963
90	95	0.095	0.010139	0.818	73.62	10.6311	6.9250
100	114	0.114	0.012166	0.818	81.8	10.8591	7.5329
110	127	0.127	0.013554	0.818	89.98	11.0208	8.1646
120	150	0.15	0.016009	0.818	98.16	11.3190	8.6721

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 63. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra caña PFC5

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFC5							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	39	0.039	0.004063	0.818	8.18	10.0116	0.8171
20	50	0.05	0.005208	0.818	16.36	10.1275	1.6154
30	60	0.06	0.00625	0.818	24.54	10.2353	2.3976
40	68	0.068	0.007083	0.818	32.72	10.3231	3.1696
50	78	0.078	0.008125	0.818	40.9	10.4351	3.9195
60	85	0.085	0.008854	0.818	49.08	10.5149	4.6677
70	92	0.092	0.009583	0.818	57.26	10.5960	5.4039
80	103	0.103	0.010729	0.818	65.44	10.7259	6.1011
90	117	0.117	0.012188	0.818	73.62	10.8960	6.7566
100	125	0.125	0.013021	0.818	81.8	10.9956	7.4393
110	145	0.145	0.015104	0.818	89.98	11.2528	7.9962
120	161	0.161	0.016771	0.818	98.16	11.4674	8.5599

Tabla 64. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra caña PFC6

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFC6							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformación δ (mm)	Deformación δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1-\delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	17	0.017	0.001816	0.818	8.18	9.7875	0.8358
20	26	0.026	0.002778	0.818	16.36	9.8780	1.6562
30	34	0.034	0.003632	0.818	24.54	9.9598	2.4639
40	40	0.04	0.004274	0.818	32.72	10.0220	3.2648
50	47	0.047	0.005021	0.818	40.9	10.0956	4.0513
60	53	0.053	0.005662	0.818	49.08	10.1596	4.8309
70	60	0.06	0.00641	0.818	57.26	10.2353	5.5944
80	75	0.075	0.008013	0.818	65.44	10.4012	6.2916
90	83	0.083	0.008868	0.818	73.62	10.4920	7.0168
100	90	0.09	0.009615	0.818	81.8	10.5727	7.7369
110	105	0.105	0.011218	0.818	89.98	10.7499	8.3703
120	119	0.119	0.012714	0.818	98.16	10.9207	8.9884
130	134	0.134	0.014316	0.818	106.34	11.1099	9.5717
140	157	0.157	0.016774	0.818	114.52	11.4130	10.0342
150	178	0.178	0.019017	0.818	122.7	11.7046	10.4831

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

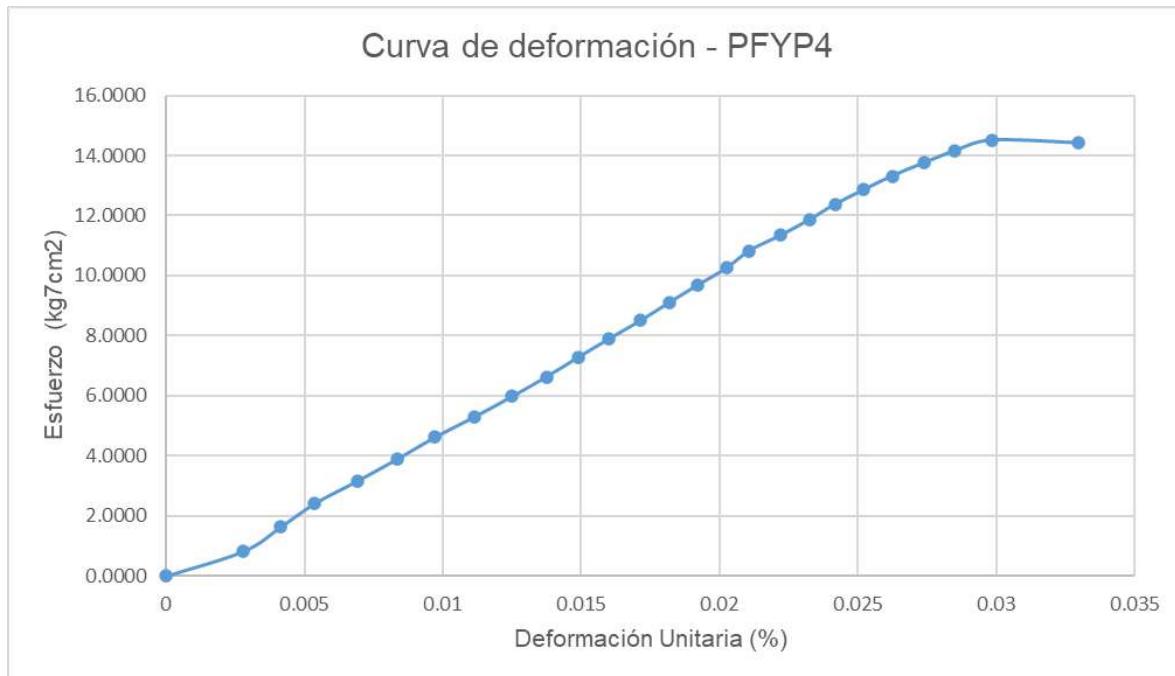


Figura 161. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de yute + palma PFYP4 (2024).

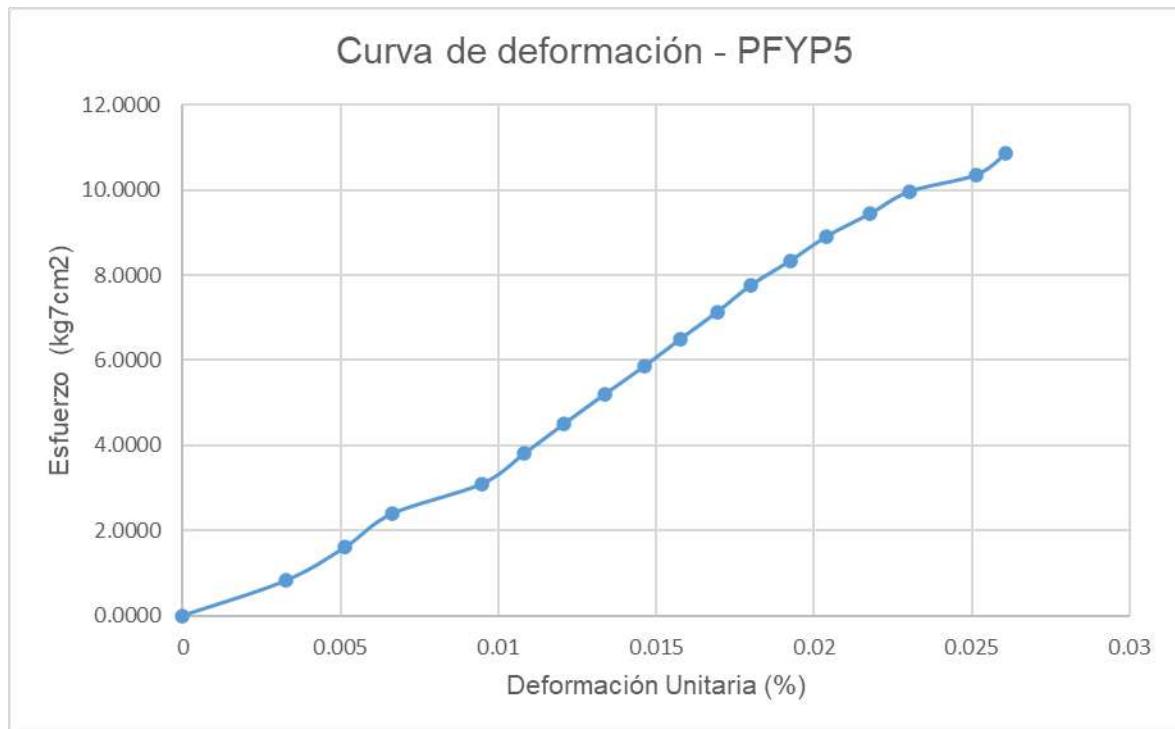


Figura 162. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de yute + palma PFYP5 (2024).

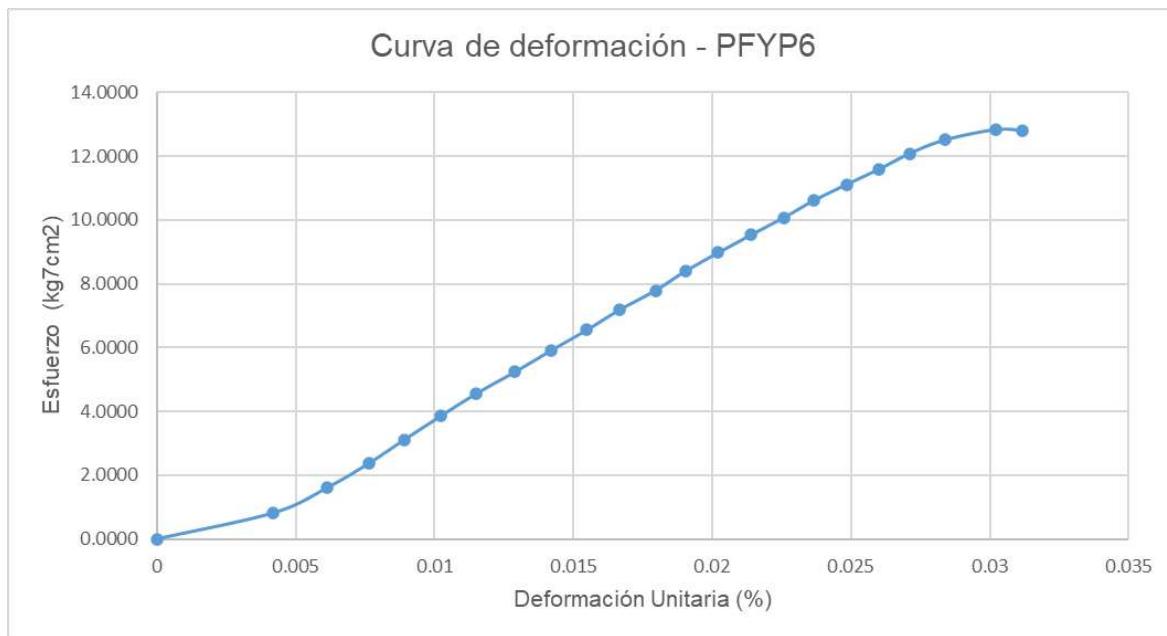


Figura 163. Curva de deformación de probeta reforzada con fibra de yute + palma PFYP6 (2024).

Tabla 65. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra yute + palma PFYP4

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFYP4							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformaci ón δ (mm)	Deformaci ón δ (cm)	$\epsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1-\delta/L)$ (cm²)	Esfuerzo (kg/cm²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	27	0.027	0.002789	0.818	8.18	9.8881	0.8273
20	40	0.04	0.004132	0.818	16.36	10.0220	1.6324
30	52	0.052	0.005372	0.818	24.54	10.1489	2.4180
40	67	0.067	0.006921	0.818	32.72	10.3121	3.1730
50	81	0.081	0.008368	0.818	40.9	10.4692	3.9067
60	94	0.094	0.009711	0.818	49.08	10.6194	4.6217
70	108	0.108	0.011157	0.818	57.26	10.7860	5.3087
80	121	0.121	0.0125	0.818	65.44	10.9456	5.9787
90	133	0.133	0.01374	0.818	73.62	11.0971	6.6342
100	144	0.144	0.014876	0.818	81.8	11.2397	7.2778
110	155	0.155	0.016012	0.818	89.98	11.3860	7.9027
120	166	0.166	0.017149	0.818	98.16	11.5362	8.5089
130	176	0.176	0.018182	0.818	106.34	11.6762	9.1075
140	186	0.186	0.019215	0.818	114.52	11.8196	9.6890
150	196	0.196	0.020248	0.818	122.7	11.9666	10.2535
160	204	0.204	0.021074	0.818	130.88	12.0869	10.8283
170	215	0.215	0.022211	0.818	139.06	12.2562	11.3461
180	225	0.225	0.023244	0.818	147.24	12.4144	11.8604
190	234	0.234	0.024174	0.818	155.42	12.5602	12.3740
200	244	0.244	0.025207	0.818	163.6	12.7264	12.8552
210	254	0.254	0.02624	0.818	171.78	12.8970	13.3194
220	265	0.265	0.027376	0.818	179.96	13.0900	13.7479
230	276	0.276	0.028512	0.818	188.14	13.2889	14.1577
240	289	0.289	0.029855	0.818	196.32	13.5319	14.5080
249	319	0.319	0.032955	0.818	203.682	14.1280	14.4169

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

Tabla 66. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra yute + palma PFYP5

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFYP5							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformaci ón δ (mm)	Deformaci ón δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1 - \delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	31	0.031	0.00326	0.818	8.18	9.9289	0.8239
20	49	0.049	0.005152	0.818	16.36	10.1169	1.6171
30	63	0.063	0.006625	0.818	24.54	10.2680	2.3899
40	90	0.09	0.009464	0.818	32.72	10.5727	3.0948
50	103	0.103	0.010831	0.818	40.9	10.7259	3.8132
60	115	0.115	0.012093	0.818	49.08	10.8714	4.5146
70	127	0.127	0.013354	0.818	57.26	11.0208	5.1956
80	139	0.139	0.014616	0.818	65.44	11.1744	5.8562
90	150	0.15	0.015773	0.818	73.62	11.3190	6.5041
100	161	0.161	0.01693	0.818	81.8	11.4674	7.1333
110	171	0.171	0.017981	0.818	89.98	11.6057	7.7531
120	183	0.183	0.019243	0.818	98.16	11.7762	8.3355
130	194	0.194	0.0204	0.818	106.34	11.9369	8.9085
140	207	0.207	0.021767	0.818	114.52	12.1326	9.4390
150	219	0.219	0.023028	0.818	122.7	12.3190	9.9602
160	239	0.239	0.025131	0.818	130.88	12.6428	10.3522
170	248	0.248	0.026078	0.818	139.06	12.7941	10.8691

Tabla 67. Esfuerzos a compresión simple de probeta de fibra yute + palma PFYP6

COMPRESIÓN SIMPLE DE STO - PFYP6							
DEFORMACIONES					ESFUERZOS		
Lectura del Micrómetro Divisiones	Deformaci ón δ (mm)	Deformaci ón δ (cm)	$\varepsilon = \delta/L$ (%)	Lectura del anillo	Carga	Área corr. $Ac = Ao/(1 - \delta/L)$ (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0.818	0	9.6212	0.0000
10	39	0.039	0.004194	0.818	8.18	10.0116	0.8171
20	57	0.057	0.006129	0.818	16.36	10.2027	1.6035
30	71	0.071	0.007634	0.818	24.54	10.3565	2.3695
40	83	0.083	0.008925	0.818	32.72	10.4920	3.1186
50	95	0.095	0.010215	0.818	40.9	10.6311	3.8472
60	107	0.107	0.011505	0.818	49.08	10.7740	4.5554
70	120	0.12	0.012903	0.818	57.26	10.9331	5.2373
80	132	0.132	0.014194	0.818	65.44	11.0843	5.9039
90	144	0.144	0.015484	0.818	73.62	11.2397	6.5500
100	155	0.155	0.016667	0.818	81.8	11.3860	7.1843
110	167	0.167	0.017957	0.818	89.98	11.5500	7.7905
120	177	0.177	0.019032	0.818	98.16	11.6903	8.3967
130	188	0.188	0.020215	0.818	106.34	11.8487	8.9748
140	199	0.199	0.021398	0.818	114.52	12.0114	9.5343
150	210	0.21	0.022581	0.818	122.7	12.1787	10.0750
160	220	0.22	0.023656	0.818	130.88	12.3348	10.6106
170	231	0.231	0.024839	0.818	139.06	12.5112	11.1148
180	242	0.242	0.026022	0.818	147.24	12.6928	11.6003
190	252	0.252	0.027097	0.818	155.42	12.8625	12.0832
200	264	0.264	0.028387	0.818	163.6	13.0722	12.5151
210	281	0.281	0.030215	0.818	171.78	13.3813	12.8373
212	290	0.29	0.031183	0.818	173.416	13.5509	12.7974

10.6 COMPARATIVA DE RESISTENCIAS EN REFERENCIAS DE LA INVESTIGACIÓN

Tabla 68. Resultados de referencias de investigación

COMPARATIVA DE RESULTADOS A COMPRESIÓN DE REFERENCIAS				
	TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	MUESTRA	ESFUERZO (kPa)	ALTURA
1	Suelo STO+18% agua+Fibra polipropileno	(PFSP)	1.57	Probeta de 9 cm
2	Suelo STO+18% agua+Fibra Malla	(PFM)	0.72	Probeta de 9 cm
3	Suelo STO+18% agua+Fibra Palma	(PFP)	1.19	Probeta de 9 cm
4	Suelo STO+18% agua+Fibra Yute	(PFY)	1.22	Probeta de 9 cm
5	Suelo STO+18% agua+Fibra Caña	(PFC)	0.91	Probeta de 9 cm
6	Suelo STO+18% agua+Fibra Yute + Palma	(PFYP)	1.24	Probeta de 9 cm
7	Contracción temprana y adherencia del refuerzo LC-TRM en tierra apisonada	EL-G8	37.64	Muestra de 40 cm
8		PEL-G2	44.33	Muestra de 40 cm
9	Estudio experimental sobre las pruebas de mesa vibratoria de una estructura moderna de tierra apisonada reforzada interiormente	M1	1.4	Probeta de 10 cm
10		M2	1.33	Probeta de 10 cm
11		BSE	2.41	Probeta de 9 cm
12		PSE	1.48	Probeta de 9 cm
13		PSE2	1.57	Probeta de 9 cm
14	Comportamiento compresivo y cortante de carteras de tierra apisonada estabilizadas con cemento y reforzadas con fibra de coco, tablillas de bambú y barras de acero.	CSCRRE	335.450	Pila de 60 cm
15		CSCRRE 1	393.000	Pila de 60 cm
16		CSCRRE 2	395.050	Pila de 60 cm
17	Tierra apisonada reforzados con tiras de tejido de poliéster	REW1	1.34	Probeta de 9 cm
18		REW2	2.2	Probeta de 9 cm
19		REW3	1.56	Probeta de 9 cm

10.7 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Resistencia de pilas de tapial a la compresión.
- Aplicaciones arquitectónicas y diseño de tapias reforzadas con fibra de yute+palma.
- Análisis de ciclo de vida de tapias reforzadas con fibra de yute+palma.
- Resistencia a la compresión y patrón de falla de las carteras cuadradas de tapial.

10.8 FICHA TÉCNICA DE CONSTRUCCIÓN DEL TAPIAL

Diseño de resistencia de tapias usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento

¿QUÉ ES?

SE DENOMINA TAPIAL AL MÉTODO CONSTRUCTIVO QUE CONSISTE EN LA ELABORACIÓN DE UN MURO CREADO POR VARIAS CAPAS DE UNA MEZCLA DE TIERRA ARCILLOSA HÚMEDA COMPACTADA A GOLPES CON UN PISÓN.



Fundación Tierra viva (2019)

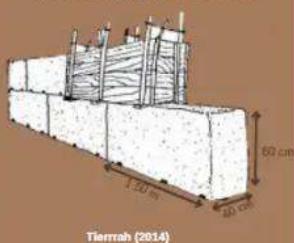


FORMAS Y DIMENSIONES

LOS TAPIALES CONSTAN DE UNA PLANTA RECTANGULAR

SUS DIMENSIONES SON :

- LARGO MÁXIMO DE 1.50 M
- ANCHO 40 CM
- ALTURA MÁXIMA 60 CM



MODO DE FABRICACIÓN



SISTEMA CONSTRUCTIVO - CONSTRUCCIÓN IN SITU

SE CONSTRUYE EN EL ÁREA DONDE SE ENCONTRARÁ LA EDIFICACIÓN, INICIANDO DESDE LOS CIMENTOS HASTA LAS CUBIERTAS.

ACABADOS



REVESTIMIENTO-PLACAS DE MADERA



REVESTIMIENTO-CEMENTO COLORIDO



PINTURAS Y LECHADAS ESTABILIZADAS



CARAVISTA



CALI-CASTRADO

TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

- TAPIAL PREFABRICADO



ELEMENTOS ESTRUCTURALES

CIMENTACIÓN

PUEDE SER DE HORMIGÓN O MAMPOSTERÍA Y SU PROFUNDIDAD DEBE SER DE 40 CM CON UN ANCHO SIMILAR A LOS MUROS.



Tierrah (2014)

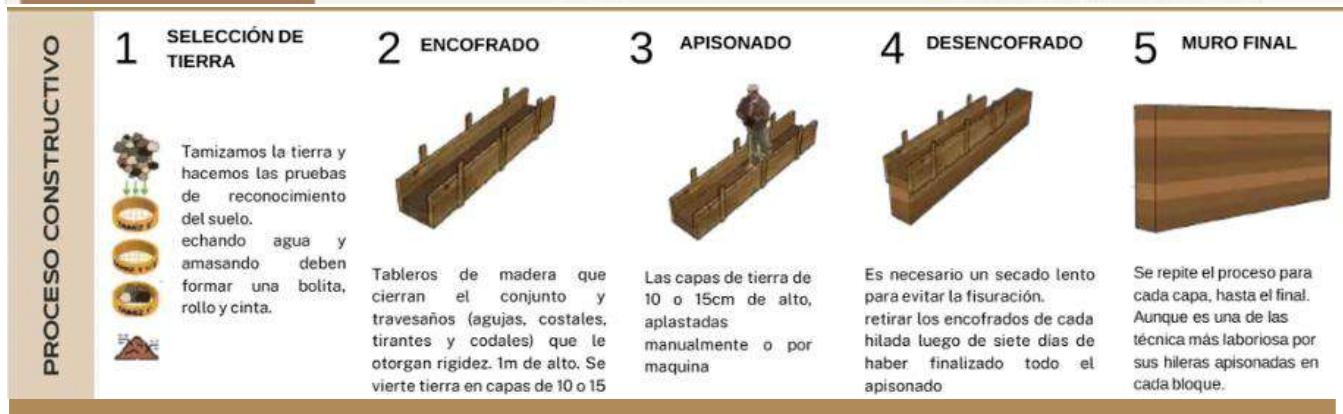
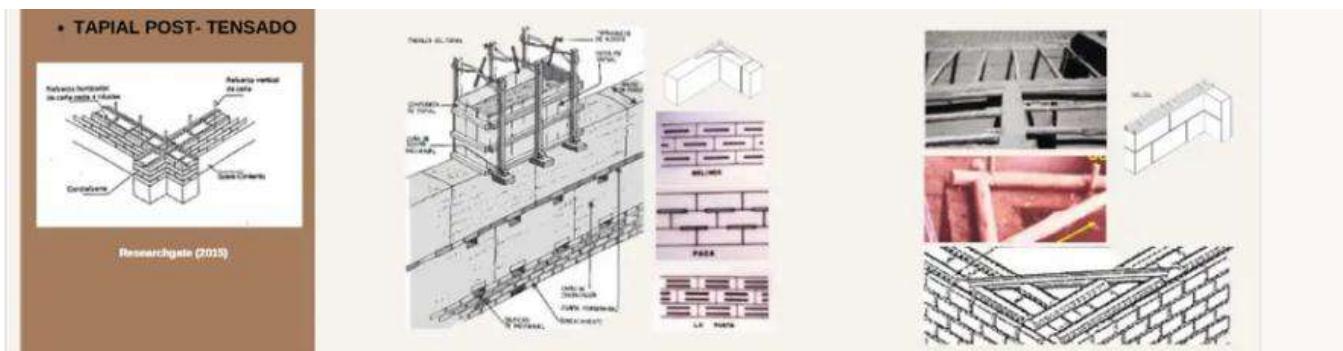
ARRIOSTRE

LOS ELEMENTOS DE ARRIOSTRE DEBEN SER VERTICALES.



Inssu (2022)

Diseño de resistencia de tapiales usando refuerzos y energías de compactación como prevención de agrietamiento



<p>DATOS GENERALES</p> <p>1 Tapial o tierra apisonada, es un método de construcción que consiste en elaborar muros con tierra arcillosa húmeda</p> <p>2 Es un ejemplo más de cómo las técnicas artesanales de nuestra historia, pueden ofrecernos grandes oportunidades en la actualidad</p>	<p>MATERIALES</p> <p>AGUA 10 % de agua para una mezcla homogénea</p> <p>TIERRA TAMIZADA 70-80% de arena, 30% de limo. 10% de arcilla</p> <p>AGREGADOS</p> <p>CEMENTO 1 de cemento por cada 10 de tierra para mayor resistencia</p> <p>OCRE Le da coloración</p> <p>PAJA Mayor resistencia</p>	<p>DIMENSIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> Según la norma E-080, las dimensiones de los tapiales deberán tener un de largo máximo de 1,50 m., ancho mayor a 40 cm y altura máxima de 60 cm. <p>IMAGENES EN PLANTA</p> <p>Los muros de tapial deberán tener una forma con la cual se logre incrementar la resistencia de la edificación</p> <p>Los muros de tapial de 40 cm tienen forma de L y U</p>
---	--	--

Referencia: Taller V (2024).