



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias

DESARROLLO DE TABIQUE DE CONCRETO LIGERO CON RESIDUOS DE PET.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Gerardo Valentin Soto Ramirez

Dirigido por:

Dr. José Luis Reyes Araiza

SINODALES

Dr. José Luis Reyes Araiza
Presidente

M. en I. Rubén Ramírez Jiménez
Secretario

Dr. Alejandro Manzano Ramírez
Vocal

Dr. José Jesús Pérez Bueno
Suplente

M. en C. Hilda Edith Jiménez Robles
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz

Director de la Facultad
de Ingeniería

Dr. Luis Hernández Sandoval

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Marzo de 2011
México

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

RESUMEN

Esta tesis presenta los resultados sobre la investigación de las propiedades mecánicas de tabiques de concreto ligero con residuos de PET. El objetivo principal del estudio nos definió las proporciones idóneas de mortero ligero y de residuo de PET para obtener buenas propiedades mecánicas. Se diseñaron 3 tipos de mezclas de mortero con cemento Pórtland y cal combinando con un tipo de agregado ligero (arenilla con granulometría mixta). Se utilizaron dos métodos de fabricación por compresión y vaciado. El residuo de PET se incorporó a la mezcla en forma de fibra con una proporción del 3%. Se determinó la resistencia a compresión y el módulo a la ruptura después de 7 y 28 días de curado con el fin de validar la calidad de los especímenes. Los resultados obtenidos muestran que la adición del residuo de PET mejora las características mecánicas de los tabiques, observándose mejor comportamiento para los tabique con agregado ligero con granulometría mixta. Particularmente se obtuvo un comportamiento dúctil bajo cargas de flexión esto debido a la influencia de las fibras de residuo de PET en la zona de falla. Tales resultados confirman el uso potencial de los residuos de PET para la fabricación de tabique de concreto ligero, con el beneficio adicional de reutilizar residuos industriales.

SUMMARY

This thesis presents results on the investigation of the mechanical properties of lightweight concrete walls of PET waste. The main objective of the study we defined the ideal proportions of mortar residue light and PET to obtain good mechanical properties. We designed 3 types of mixtures of Portland cement mortar and lime combined with a type of lightweight aggregate (sand mixed with grain.) Two methods were used to manufacture compression and discharge. The PET waste was incorporated into the mixture in a fiber with a ratio of 3%. We determined the compressive strength and modulus at break after 7 and 28 days curing in order to validate the quality of the specimens. The results show that the addition of waste PET improves the mechanical properties of the walls, showing better performance for the wall with lightweight aggregate with mixed grain. Particularly ductile behavior was obtained under bending loads this due to the influence of PET fiber residue in the fault zone. These results confirm the potential use of PET waste for the manufacture of lightweight concrete wall, with the added benefit of reusing industrial waste.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a los niños con diabetes, que luchan día a día contra una enfermedad crónica, sin embargo la afrontan con gran entereza, madurez y valor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco al Dr. José Luís Reyes Araiza por su dirección, dedicación y aportación al trabajo de tesis. Le agradezco por creer en mí para llevar a cabo este proyecto. Además de brindarme su apoyo, paciencia y amistad.

A mi madre que representa la moral y la virtud en el hogar, que fijo en mí los principios rectores de la conducta, mi maestra milagrosa, la verdadera educadora y cómplice de la vida. Gracias por tu ternura, sagacidad, intuición, solidaridad y sobre todo amor.

A mi padre que me enseñó a “no ceder, pelear, debatir, luchar, jugármela, invertir, avanzar, dormir despierto, trabajar dormido, pero jamás dejar de insistir en mis objetivos con cuantos medios tenga a mi alcance; sin dejar por lo que más quiera, una huella comprometedora”.

A mis hermanos que me brindado su apoyo, entusiasmo y motivación. Gracias a ustedes aprendí la sana competencia, la tenacidad y la “supervivencia”, pero sobre todo el cariño y el amor hacia los otros.

Le agradezco al CONACYT por el apoyo económico durante estos dos años, que hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE

	Página
Resumen	
Summary	
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Índice.....	vi
Índice de tablas.....	ix
Índice de figuras.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 El uso de Fibras en el Concreto	7
2.1.1 Ventajas y desventajas del uso de fibras.....	8
2.1.2 Tipos y propiedades de fibras y su efecto en el concreto	9
2.1.2.1 Fibras de Acero	9
2.1.2.2 Fibras de Vidrio.....	12
2.1.2.3 Fibras Sintéticas	14
2.1.2.4 Fibras Naturales	16
2.1.2.5 Fibras Naturales No Procesadas	17
2.1.2.6 Fibras de Madera.....	17
2.1.2.7 Sistema Múltiple de fibras.....	18
2.2 Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber	19
2.2.1 Preparación de la fibra de PET.....	19
2.2.2 Propiedades básicas de fibra de PET	21
2.2.3 Resistencia a los álcalis	21
2.2.4 Prueba de combustión al PET	22
2.2.5 Miscibilidad de fibra de PET	23
2.2.5.1 Mezclas desarrolladas para pruebas	23
2.2.6 Propiedades mecánicas de concreto con fibra de PET	25

2.2.6.1 Prueba de flexión	25
2.2.6.2 Prueba de compresión	29
2.2.6.3 Prueba de adherencia de la fibra al mortero	30
3. METODOLOGÍA.....	31
3.1 Materiales	32
3.1.1 Cemento Portland	32
3.1.2 Agregado Ligero.....	34
3.1.3 Hidróxido de Calcio (CAL, CaOH).....	35
3.1.4 Residuo de PET (Tereftalato de Polietileno)	35
3.2 Métodos.....	36
3.2.1 Caracterización física de los agregados	36
3.2.1.1 Porcentaje de desperdicios	37
3.2.1.2 Porcentaje de humedad.....	38
3.2.1.3 Peso volumétrico seco suelto	39
3.2.1.4 Peso volumétrico seco compacto	40
3.2.1.5 Granulometría.....	42
3.2.2 Propiedades mecánicas del residuo	44
3.2.2.1 Procedimiento para preparación del PET	45
3.2.2.2 Velocidad de Prueba	45
3.2.2.3 Procedimiento de prueba de tensión	46
3.2.3 Diseño de mezclas de mortero sin PET	46
3.2.3.1 Metodología de elaboración de mezclas	48
3.2.3.2 Compuestos químicos e hidratación del cemento	49
3.2.4 Diseño de mezclas con PET	51
3.2.5 Procedimiento para elaboración de tabiques	52
3.2.5.1 Elaboración por compresión	52
3.2.5.2 Elaboración por vaciado	53
3.2.6 Caracterización mecánica de tabiques	54
3.2.6.1 Determinación del peso volumétrico.....	54
3.2.6.2 Resistencia a flexión o módulo de ruptura.....	55
3.2.6.3 Prueba de absorción, absorción inicial y coeficiente de saturación.....	56

3.2.6.4 Absorción en 24 horas.....	56
3.2.6.5 Coeficiente de saturación	57
3.2.6.6 Tasa inicial de absorción	58
3.2.6.7 Prueba de resistencia a la compresión.....	58
4. Resultados y discusión.....	60
4.1 Granulometría de la Arenilla.....	60
4.2 Resultados de la prueba de tensión a la fibra de PET	62
4.3 Resultados de las pruebas mecánicas y físicas de los tabiques	62
5. Conclusión.....	71
6. Bibliografía	72

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proporcionamiento del concreto SIFCON.....	12
Tabla 2. Especificaciones de la fibra de PET	21
Tabla 3. Resultados para la resistencia a los álcalis	22
Tabla 4. Constituyentes para mezcla de concreto.....	23
Tabla 5. Numero de fibras expuestas en la sección transversal y el factor de orientación	24
Tabla 6. Resultados del ensayo a tensión.....	27
Tabla 7. Resultados de la Prueba a Compresión.	29
Tabla 8. Variables dependientes e independientes del experimento.....	31
Tabla 9. Composición química del cemento portland	33
Tabla 10. Fuentes de las Materias Primas Usadas en la Fabricación del Cemento Portland [Kosmatha et al., 2004].	33
Tabla 11. Clasificación de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE-2004)	34
Tabla 12. Propiedades físicas de la arena.....	34
Tabla 13. Granulometría de la arena.....	35
Tabla 14. Procedimientos para la caracterización física y granulométrica.	36
Tabla 15. Granulometría del Material 1	43
Tabla 16. Granulometría del Material 2	44
Tabla 17. Granulometría del Material 3	44
Tabla 18. Velocidades de prueba [ASTM D638].....	45
Tabla 19. Proporcionamiento por volumen propuestos por la British Sta.....	47
Tabla 20. Diseño de Mezcla 1	47
Tabla 21. Diseño de Mezcla 2	47
Tabla 22. Diseño de Mezcla 3	48
Tabla 23. Reacciones de Hidratación de los compuestos del Cemento Portland (Expresados en Óxidos).....	50
Tabla 24. Peso volumétrico neto mínimo de piezas, en estado seco. Según la NMX-C- 404-ONNCCE.....	54
Tabla 25. Granulometría del material seleccionado	61

Tabla 26. Nomenclatura de los tipos de pruebas 62

Tabla 27. Resultados de ensayos de propiedades mecánicas y físicas de los bloques sin pet..... 64

Tabla 28. Tabla de resistencias de diseño de los bloques sin PET 64

Tabla 29. Resultados de ensayos de propiedades mecánicas y físicas de los bloques con pet..... 66

Tabla 30. Tabla de resistencias de diseño de los bloques con PET..... 67

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Se pueden usar en concreto fibras de acero, de vidrio, sintéticas y naturales.	7
Fig. 2 Las fibras de acero con extremos conformados se pegan para formar haces que facilitan el manejo y el mezclado, los haces se separan en fibras individuales.	10
Fig. 3 Procedimiento para la fabricación de fibras de PET	20
Fig. 4 Cambio en la resistencia a la flexión con respecto al contenido de fibra para el concreto con	26
Fig. 5 Curva carga-deformación para el ensayo con relación agua-cemento del 60%..	28
Fig. 6 Aparato para medir la adherencia entre el concreto y la fibra	30
Fig. 7. Unidad de PET	36
Fig. 8 Cantidad de grava obtenida de una muestra de arenilla	37
Fig. 9 Muestra de arena en el horno para obtener peso seco	38
Fig. 10 Recipiente para el cálculo de peso volumétrico de la arena	39
Fig. 11 Cuarteo de la arena para elegir una muestra representativa de la misma	39
Fig. 12 Recipiente de peso volumétrico colocado en la báscula para obtener el peso..	40
Fig. 13 Muestra de arena cuarteada para llenar el recipiente metálico	41
Fig. 14 Recipiente utilizado para el peso volumétrico.....	41
Fig. 15 Tamices para la granulometría de la arena	42
Fig. 16 Prueba de tensión al PET	46
Fig. 17 Elaboración de las mezclas	48
Fig. 18 Incorporación del residuo a la mezcla	52
Fig. 19 Elaboración de tabiques por compresión.....	53
Fig. 20 Elaboración de tabiques por vaciado.....	53
Fig. 21 Pieza de tabique blanco o tabicón.	55
Fig. 22 Prueba de resistencia a la flexión.....	56
Fig. 23 Determinación de pesos después de 24 horas de inmersión.	57
Fig. 24 Prueba de absorción inicial.....	58
Fig. 25 Prueba de resistencia a la compresión.....	59
Fig. 26. Curva de Granulometría	61
Fig. 27. Tabiques de concreto comprimido.....	63
Fig. 28 Grafica carga – deflexión (prueba a flexión).....	69

Fig. 29 Grafica carga – deflexión (prueba de adherencia- tensión)..... 70

1. INTRODUCCIÓN

Como *objetivo general* se tiene el desarrollar un tabique de mezcla eco-eficiente con material reciclable utilizando PET (tereftalato de polietileno) y mortero en base de agregado ligero (fino).

Como *hipótesis* se planteo que el mortero con agregado ligero es un matriz aglutinante adecuada para las propiedades mecánicas y físicas de los tabiques de concreto enriquecidos con residuos de PET.

Como *meta principal* se tiene el contribuir para dar un destino útil a residuos que hasta el presente se entierran, queman o acumulan en basureros al aire libre. Con lo cual se reduce la contaminación ambiental es una tecnología “limpia y limpiadora”. Además de contribuir en aportar un producto de calidad que pueda competir con productos que actualmente se encuentran en el mercado para la elaboración de un tabique eco-eficiente que sirva para la autoconstrucción de viviendas.

La justificación de este trabajo de tesis se centra en obtener un tabique de concreto eco-eficiente mediante un proporcionamiento adecuado de los constituyentes. Esto debido a que en las normas no mencionan de manera específica proporcionamientos. Además, al involucrar material reciclable en la elaboración implica un estudio adicional del diseño de mezclas. Aunadamente, a nivel local se carecen de normas, por lo que este trabajo de tesis representa un aporte más en lograr estándares a nivel local. Se trata de crear tecnología que permita fabricar ladrillos a partir de plástico reciclado, los que permitan colaborar con el medio ambiente y bajar el déficit de viviendas que existe en la región. Se trata de que puedan utilizarse en construcciones de hasta dos niveles.

A nivel nacional se tiene una trayectoria en el empleo de la mampostería en la construcción. El uso de este material en la construcción data desde la época prehispánica, con un gran auge durante la colonia con la construcción de grandes

edificios religiosos y civiles los cuales en la actualidad aun están en uso. En la actualidad la mampostería se considera como un material estructural de secundaria importancia con respecto al acero y el concreto. Sin embargo sigue siendo el material por excelencia para la construcción de vivienda en México.

Existe en México una larga tradición en el estudio e investigación sobre la mampostería. Poco después del sismo de 1957, comenzó un programa de investigación analítica y experimental sobre el tema, y esta actividad ha continuado interrumpida desde entonces, con la participación cada vez de nuevas generaciones de especialistas. Las contribuciones de estos estudios al conocimiento del material y de su función estructural, sobre todo en cuanto al diseño sísmico, son reconocidas internacionalmente (Fundación ICA, 2003).

Las propiedades mecánicas de la mampostería son más variables y difíciles de predecir que las de otros materiales estructurales como el concreto reforzado o el acero. Esto es debido al poco control que se tiene sobre las propiedades de los materiales componentes y sobre los procedimientos de construcción empleados. Así, el comportamiento estructural de la mampostería y su construcción, han sido objeto de una amplia gama de estudios experimentales y analíticos, que han dado como resultado la elaboración de normas. Sin embargo, en tales normas no mencionan de manera específica el proporcionamiento de los constituyentes para obtener una mezcla adecuada para tabiques de concreto, además, al involucrar material reciclable en la elaboración implica un estudio adicional del diseño de mezclas. Aunadamente, a nivel local se carecen de normas, por lo que este trabajo de tesis representa un aporte más en lograr estándares a nivel local.

La metodología que se siguió en este proyecto fue la siguiente:

a. Búsqueda de información y revisión bibliográfica. La búsqueda de información se realizó en las bibliotecas de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), en artículos de investigación práctica y científica nacionales e internacionales, y en Internet.

b. Selección del tipo de residuo en base de PET. Se selecciono el tipo de residuo en base de PET a utilizar en la elaboración de los tabiques, como fue; tiras largas, tiras cortas.

c. Selección de materiales constituyentes para las mezclas. Se selecciono el tipo de agregado “arenilla” de los bancos de la zona de Saldarriaga en Querétaro. El costo, disponibilidad y la ligereza del agregado fue un criterio importante en la selección del agregado, lo anterior, en base a la norma ASTM-C125. Respecto a los cementantes, se eligió el cemento Pórtland CPO 30R, ya que es uno de los más comunes por la industria de la construcción, y se utilizó cal (hidróxido de calcio) de la región.

d. Caracterización física y granulométrica de los materiales. Los procedimientos para la caracterización física y granulométrica de los agregados se basaron en los procedimientos establecidos en las normas ASTM-C125, ASTM C 331, ASTM C 404.

e. Diseño de mezclas para el mortero ligero. Se efectuó un diseño experimental en base de la combinación de agregados y tipos de cementantes empleados (variables independientes), y la relación con las correspondientes propiedades mecánicas y físicas a medir (variables independientes). Además, las mezclas deberán de reunir el requisito de tener una adecuada fluidez, lo cual, se verificó de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C 1437.

f. Integración del residuo a la mezcla. El residuo se integró a la mezcla de mortero en dos presentaciones. Se hizo un diseño de experimento considerando las variables dependientes e independientes. Las partículas de PET se mezclan con cemento en una mezcladora, luego se agrega agua. Cuando esta mezcla adquiere consistencia uniforme, se le vierte en una máquina rodante para moldear mampuestos. Se realiza la compresión de la mezcla y la postura de los mampuestos. Se les deja en pista durante un día y luego se les moviliza hasta una pileta de curado con agua, en la cual permanecen siete días. Después de este tiempo se les retira y se almacena en pilas a cubierto hasta cumplir los 28 días desde su elaboración.

g. Obtención de las propiedades físicas y mecánicas de especímenes. Para verificar las propiedades mecánicas y físicas de las mezclas diseñadas, estas se moldearon como piezas de tabique y como cubos de mortero. Se obtendrá la absorción de agua, resistencia a compresión, módulo de ruptura, etc. Se procederá a aplicar los métodos

de prueba correspondientes a las normas ASTM C67, ASTM C109, NMX-C-036. Se realizó una descripción general del elemento, si se trata de un elemento constructivo portante para muros interiores y exteriores, eco-eficiente, prefabricados del tipo liviano y que se produzca en fábrica fija. Se obtuvieron sus dimensiones y diseño. Determinamos su composición: mezcla de mortero ligero, plástico polietileno - tereftalato. Se obtuvo un peso por unidad así como su densidad. Se obtuvieron sus propiedades mecánicas y físicas, como su resistencia a la compresión, absorción de agua y su módulo de ruptura.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Hay diversas investigaciones, sobre el uso del tereftalato de polietileno (PET) en el concreto, se puede encontrar en la literatura, y principalmente en diversos artículos que el PET se puede utilizar, como agregado (triturado), como refuerzo (tiras), como aglutinante (resina). Por lo tanto fue necesario revisar los trabajos hasta hoy presentados y tomar los más representativos que aporten a esta investigación.

Un aspecto importante es el agregado ligero el cual es un material que se utiliza para reducir el peso unitario del concreto; con esta disminución de peso se pueden producir estructuras resistentes a los terremotos y a las fuerzas sísmicas que son linealmente dependientes de la masa de la estructura (Kilic et al., 2003).

Los agregados ligeros, se utilizan generalmente para reducir el peso unitario del concreto, en sustitución de los agregados convencionales. Hoy en día, hay muchas aplicaciones del concreto ligero hecho con agregados ligeros; artificiales o naturales (TOPCU y Uygunoglu, 2007; Babu et al., 2005; Yasar et al., 2003; Demirboga y Gul, 2003; Malloy et al., 2001). Sin embargo, el costo de producción de los agregados ligeros artificiales es alta, debido a la exigencia de altas temperaturas para el proceso de incineración o tratamiento térmico (TOPCU, 2006). Por lo tanto, en comparación con las materias comunes, los gránulos de plástico reciclado son utilizados como agregado ligero en la producción del concreto ligero, estos han atraído la atención de los investigadores. Este método proporciona el reciclado de los residuos plásticos y la producción de un concreto ligero en una forma económica (Koide et al., 2002).

El polipropileno (PP), polietileno (PE), polietileno tereftalato (PET) y poliestireno (PS) son algunos de los plásticos utilizados en el concreto ligero. Las botellas de PET están teniendo cada vez mayor consumo que el resto de los residuos plásticos. A principios de 1980, las botellas de PET se comenzaron a producir en Turquía por primera vez. En un principio las botellas de PET se utilizan para embotellar el agua, sin

embargo, más tarde fueron utilizados comúnmente para el embalaje de diversos alimentos líquidos (Pagev, 2008).

Debido al rápido aumento en el uso de botellas de PET, el problema de los residuos sólidos se debe plantear. Se sabe que para degradarse el plástico en la naturaleza tiene que pasar mucho tiempo (más de cien años) (Silva et al., 2005). Por lo tanto, la incineración es uno de los métodos más utilizados para la eliminación de los residuos de PET, lo que provoca la contaminación ambiental y que estos residuos sean utilizados en las zonas industriales. La industria de la ingeniería y principalmente el área de la construcción parece ser una adecuada opción para la utilización de los desechos de residuos de PET, con una alta capacidad de consumo.

En los últimos años, varios de los estudios experimentales que se llevaron a cabo sobre el uso del PET en el concreto, fueron para desarrollar técnicas para añadir el PET en forma de resina. Este material es conocido como concreto polimérico (Landis et al., 1991). El concreto polimérico se produce mediante la sustitución del cemento por polímero, formando una matriz aglutinante polímero - agregado. En comparación con materiales a base de cemento, el costo de producción de concreto polimérico es muy alto debido al alto costo de las resinas vírgenes. El uso de botellas de PET de desecho en la producción de resina de poliéster disminuye el costo de fabricación de la resina en comparación a la producción de la resina convencional (Landis et al., 1991).

Otro método para el reciclado de botellas de PET en el concreto, es el uso de residuos de botellas de PET triturado directamente como agregado en la producción de hormigón o mortero. Por lo tanto, la utilización del PET de residuos como agregado en el concreto proporciona beneficios en la eliminación de desechos y reducción de los daños ambientales provocados por el uso de agregados naturales y de recursos minerales. La investigación se ha llevado a cabo sobre el uso de gránulos de PET de desecho como agregado en hormigón o mortero. En estos estudios, el PET y otros desechos (PE y PP) se usaron unidos con agregados minerales, haciendo un reemplazo parcial del agregado (et al Shehata., 1996; Marzouk et al. ,2007). Llegaron

a la conclusión de que las botellas de plástico PET, triturado en partículas pequeñas puede ser utilizado con éxito como sustitución de la arena en el concreto.

El otro método es utilizar los residuos de botellas de PET como fibra, para producir concreto reforzado con fibras (Silva et al., 2005; Ochi et al., 2007). La cantidad volumétrica del contenido de fibra en el hormigón reforzado con fibras está entre 0,3% y 1,5%. De esta manera se recicla una cantidad de residuos plásticos. El objetivo principal de este estudio es investigar la influencia del uso de fibras de PET en las propiedades del mortero. Esto se logra mediante el control de las propiedades físicas y mecánicas del mortero con fibras de PET.

2.1 El uso de Fibras en el Concreto

Las fibras fueron usadas como material de construcción por muchos siglos. En las últimas tres décadas hubo un crecimiento por el interés en el uso de fibras en concreto premezclado, concreto prefabricado y concreto lanzado. Las fibras de acero, plástico, vidrio y materiales naturales (celulosa de madera) están disponibles en una amplia variedad de formas, tamaños y espesor; pueden ser cilíndricas, llanas, onduladas (rizadas) y deformadas, con longitud típica de 60 mm a 150 mm (0.25 pulg. a 6 pulg.) y espesor variado de 0.005 mm a 0.75 mm (.0002 pulg. a 0.03 pulg.) (Figura 1). Las fibras se añaden al concreto durante el mezclado.



Fig. 1 Se pueden usar en concreto fibras de acero, de vidrio, sintéticas y naturales.

Los factores principales que controlan el desempeño del material compuesto son:

- Propiedades físicas de las fibras y de la matriz.
- Resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz.

A pesar de que los principios básicos gobernantes en los refuerzos convencionales y en los sistemas con fibras son los mismos, hay varias características que los diferencian:

- Las fibras se distribuyen aleatoriamente por toda la sección transversal, mientras que las barras de refuerzo o armadura se ponen sólo donde son necesarias.
- La mayoría de las fibras son relativamente cortas y poco espaciadas si son comparadas a las barras continuas de refuerzo.
- Generalmente no es posible lograrse la misma relación de área de refuerzo- área de concreto con el uso de fibras si es comparado a la red de refuerzo con barras.

Las fibras se adicionan al concreto normalmente en bajos volúmenes (frecuentemente menos del 1 %) y han mostrado eficiencia en el control de la fisuración por contracción (retracción). En general, las fibras no alteran considerablemente la contracción libre del concreto, pero, si son empleadas en cantidades adecuadas, pueden aumentar la resistencia al agrietamiento (fisuración) y disminuir la abertura de las fisuras (Shan, Weiss e Yang 1998).

2.1.1 Ventajas y desventajas del uso de fibras

Las fibras se distribuyen aleatoriamente por la sección transversal del concreto. Por lo tanto, muchas fibras se localizan inadecuadamente con relación a la resistencia a los esfuerzos de tensión (tensión de tracción) resultantes de las cargas aplicadas. Dependiendo del método de fabricación, la orientación aleatoria puede ser bi-dimensional (2-D) o tridimensional (3-D). Normalmente el método de rociado promueve una orientación 2-D de las fibras, mientras que los métodos de producción con mezcladoras promueven una orientación 3-D. Además, se pueden observar que

muchas fibras cruzan las fisuras con ángulos diferentes de 90° o pueden tener una longitud embebida (anclaje) menor que la necesaria para el desarrollo de una unión fibra-matriz adecuada. Así, apenas un pequeño porcentaje del contenido de fibras puede resistir eficientemente a las tensiones de tracción (esfuerzo de tensión) o flexión. Los “factores de eficiencia” pueden ser tan bajos cuanto 0.4 para la orientación 2-D y 0.25 para la orientación 3-D. El factor de eficiencia depende de la longitud de la fibra y de la longitud crítica embebida. Del punto de vista conceptual, el refuerzo con fibras no es un método altamente eficiente para la obtención de la resistencia del compuesto.

Los concretos con fibras son más adecuados para el uso en secciones muy delgadas, donde la correcta colocación de la armadura (refuerzo) convencional sería extremadamente difícil. Además, el concreto con fibras rociado es ideal para la fabricación de productos con formas irregulares. Se puede disminuir considerablemente el peso con el uso de secciones relativamente delgadas de concreto con fibras, las cuales poseen resistencia equivalente a secciones mucho más gruesas de concreto reforzado (armado) convencional.

2.1.2 Tipos y propiedades de fibras y su efecto en el concreto

2.1.2.1 Fibras de Acero

Las fibras de acero cortas son pequeños pedazos discontinuos de acero con un aspecto o esbeltez (relación entre longitud y diámetro) que varía entre 20 y 100 y con muchas secciones transversales. Algunas fibras de acero tienen extremos conformados para mejorar la resistencia al arrancamiento de la matriz a base de cemento (Figura 2).



Fig. 2 Las fibras de acero con extremos conformados se pegan para formar haces que facilitan el manejo y el mezclado, los haces se separan en fibras individuales.

La norma ASTM A 820 clasifica las fibras de acero en cuanto a su manufactura en cuatro tipos: Tipo 1 – las fibras de alambre conformadas en frío son las más fácilmente encontradas en el mercado, fabricadas de alambre de acero conformado. Tipo II – las fibras cortadas de chapas se fabrican como el propio nombre dice: las fibras de acero se cortan de las chapas de acero. Tipo III – las fibras extraídas de fundición, las cuales se fabrican por técnicas relativamente complicadas donde una rueda en rotación se usa para levantar el metal liquido de una superficie de metal fundido, a través de la acción de la capilaridad. El metal fundido extraído se congela rápidamente en forma de fibras y se quita de la rueda por la fuerza centrífuga. Las fibras resultantes tienen una sección transversal en forma de media luna. Tipo IV – otras fibras. Para las tolerancias de longitud, diámetro y esbeltez, bien como las resistencias a tracción (tensión) mínimas y los requisitos a flexión, consulte la ASTM A 820.

Los volúmenes de fibras de acero usados en concreto normalmente varían del 0.25% al 2%. Volúmenes mayores que 2% generalmente reducen la trabajabilidad y la dispersión de las fibras y requieren un diseño especial de las mezclas o técnicas especiales de colado. La presencia de las fibras afecta ligeramente la resistencia a compresión. La adición del 1.5% (en volumen) de fibras de acero puede aumentar la resistencia a tracción directa hasta 40% y la resistencia a la flexión hasta 150%. Las

fibras de acero no afectan la contracción (retracción) libre. Las fibras de acero retardan la fractura del concreto restringido durante la contracción y mejoran la relajación de tensiones por el mecanismo de fluencia (Altoubat y Lange 2001).

La durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero depende de los mismos factores que el concreto convencional. No se disminuye la resistencia a la congelación deshielo con la adición de fibras de acero, siempre que haya incorporación de aire, se consolide correctamente el concreto y haya un ajuste de la mezcla para que pueda acomodar las fibras. Si se proporciona y coloca el concreto correctamente, va ocurrir poca o ninguna corrosión de las fibras. Cualquier corrosión de las fibras en la superficie del concreto es sencillamente un problema de apariencia y no una condición estructural. Las fibras de acero presentan módulo de elasticidad relativamente alto. Se puede aumentar su adherencia o unión con la matriz de cemento a través del anclaje mecánico o de la rugosidad superficial. Las fibras están protegidas de la corrosión por la alta alcalinidad del ambiente en la matriz de cemento (ACI 544.1R-96).

Las fibras de acero se usan comúnmente en pavimentos de aeropuertos y en las capas de revestimiento de las pistas. También se usan en los tableros de puentes (cubiertas para puentes), pisos industriales y pavimentos de autopistas. El concreto con fibras de acero en estructuras sometidas al agua en alta velocidad han mostrado que pueden durar hasta tres veces más que las alternativas en concreto convencional. El concreto reforzado con fibras de acero se emplea en muchas aplicaciones de concreto prefabricado donde sea necesario un aumento de la resistencia al impacto o de la tenacidad. En los tanques sépticos, las fibras de acero sustituyen el refuerzo convencional.

Las fibras de acero también se usan ampliamente en el concreto lanzado (proyectado) en aplicaciones de capas delgadas, especialmente en la estabilización de la inclinación de rocas y revestimiento de túneles. El humo de sílice y los acelerantes han permitido que se coloque el concreto lanzado en capas más espesas. El humo de

sílice reduce la permeabilidad del concreto lanzado (Morgan 1987). El concreto lanzado con fibras de acero se ha empleado con altos volúmenes de fibras (hasta 2%) con éxito.

El concreto con fibras impregnadas por lechada (SIFCON) con volúmenes de hasta 20% de fibras se ha usado desde finales de los años 70. El concreto impregnado por lechada se puede emplear para producir un componente o una estructura con resistencia y ductilidad mucho mayores que las encontradas en el concreto convencional y en el concreto lanzado. El concreto con fibras impregnadas por lechada (SIFCON) no es barato y necesita de ajuste minucioso, pero aún mantiene su potencial para las aplicaciones expuestas a condiciones severas y que requieran alta resistencia y tenacidad. Estas aplicaciones incluyen estructuras resistentes al impacto y a la explosión, refractarios, muros de protección (contención, atraque) y reparaciones de pavimentos y pistas. La Tabla 1 presenta las proporciones de las mezclas de este material.

Tabla 1. Proporcionamiento del concreto SIFCON

Cemento	1000 kg/m ³
Agua	330 kg/m ³
Arena siliciosa ≤ 0.7 mm (≤ 0.028 pulg.)	860 kg/m ³
Lechada de sílice	13 kg/m ³
Reductor de agua de alto rango	35 kg/m ³
Fibras de acero (cerca de 10% vol.)	800 kg/m ³

2.1.2.2 Fibras de Vidrio

La primera investigación sobre fibras de vidrio a principio de los años 60 usó vidrio convencional de borosilicato (fibras de vidrio-E) y fibras de vidrio de sílice-cal-soda (fibra de vidrio- A). Los resultados de las pruebas mostraron que la reactividad entre las fibras de vidrio-E y la pasta de cemento reduce la resistencia del concreto. El avance de las investigaciones ha resultado en la creación de las fibras de vidrio resistentes a álcalis (Fibras de vidrio RA), las cuales aumentaron la durabilidad a largo

plazo, pero fueron observadas otras fuentes de pérdida de resistencia. Una fuente conocida es la rigidización de los filamentos por la infiltración de partículas de hidróxido de calcio (producto de la hidratación del cemento) entre los haces de fibras. La reactividad con los álcalis y la hidratación del cemento son la base para las dos teorías más aceptadas sobre la pérdida de la resistencia y de la ductilidad, principalmente en concreto reforzado con fibras de vidrio en áreas externas:

- El ataque de las fibras de vidrio por álcalis reduce la resistencia a tensión (tracción) de las fibras y, consecuentemente, baja la resistencia a compresión.
- El proceso de hidratación del cemento promueve la penetración de partículas de hidróxido de calcio en los haces de fibras, aumentando la resistencia de adherencia entre fibra y matriz y la rigidez, siendo que está última disminuye la resistencia a tensión por inhibir el arrancamiento de la fibra.

Las modificaciones de las fibras con intención de aumentar la durabilidad comprende: (1) revestimientos químicos especialmente formulados para ayudar en el combate de la rigidización inducida por la hidratación, y (2) uso de una lechada con humo de sílice dispersa para rellenar los vacíos entre las fibras, reduciendo la capacidad de infiltración del hidróxido de calcio.

Japón ha desarrollado un cemento con bajo contenido de álcalis, que no produce hidróxido de calcio durante su hidratación. Ensayos acelerados del concreto producido con este cemento y reforzado con fibras de vidrio resistentes a álcalis han logrado mucho más durabilidad que otros tipos de cemento.

Se puede usar la metacaolinita en concretos reforzados con fibras de vidrio sin afectar considerablemente la resistencia a flexión, la deformación, el módulo de elasticidad y la tenacidad (Marikunte, Aldea, Shah 1997). La mayor aplicación del concreto reforzado con fibras de vidrio es la producción de paneles de fachada.

2.1.2.3 Fibras Sintéticas

Las fibras sintéticas son las fibras que se fabrican por el hombre y son resultado de la investigación y el desarrollo de las industrias petroquímicas y textiles. Los tipos de fibras usadas en concreto son: acrílicas, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno. La tabla 3 resume la variación en las propiedades físicas de estas fibras.

Las fibras sintéticas pueden reducir la contracción (retracción) plástica y consecuentemente la fisuración y pueden ayudar al concreto después que se fisura. La capa ultra delgada de concreto normalmente usa fibras sintéticas para la contención potencial de las propiedades para retardar el desarrollo de baches. Los problemas asociados con fibras sintéticas incluyen: (1) baja adherencia fibra-matriz; (2) pruebas de desempeño no concluyentes para volúmenes bajos de fibras de polipropileno, polietileno, poliéster y nylon; (3) de alta resistencia y del concreto de baja permeabilidad expuesto al fuego en un ambiente con humedad.

Los nuevos desarrollos muestran que las fibras monofiladas son capaces de fibrillar durante el mezclado si son producidas con ambas resinas de polipropileno y polietileno. Los dos polímeros son incompatibles y tienden a separarse cuando son manipulados. Por lo tanto, durante el proceso de mezclado, cada fibra se convierte en una unidad con varias fibrillas en su extremo. Las fibrillas proporcionan una adherencia mecánica mejor que los monofilamentos convencionales. El gran número de finas fibrillas también reduce la fisuración por contracción (retracción) plástica y puede aumentar la ductilidad y la tenacidad del concreto (Trottier y Mahoney 2001).

Las fibras acrílicas se han mostrado como el sustituto más prometedor para las fibras de asbesto. Se usan en tabloncillos de cemento y en la producción de tejas, donde el volumen de fibras de hasta 3% puede producir un compuesto con propiedades mecánicas similares a aquéllas de los compuestos de asbesto-cemento. Los compuestos de concreto con fibras acrílicas exhiben alta tenacidad pos-fisuración y alta

ductilidad. A pesar de que la resistencia a flexión de los concretos reforzados con fibras acrílicas sea menor que la de los compuestos de cemento-asbesto, aún es más que suficiente para muchas aplicaciones en construcción.

Las fibras de aramida tienen alta resistencia a tensión (tracción) y alto módulo de tensión (tracción). Las fibras de aramida son dos veces y media más resistentes que las fibras de vidrio E y cinco veces más resistentes que las fibras de acero. Además de las excelentes características de resistencia, las fibras de aramida también tienen excelente retención de resistencia hasta 160°C (320°F), estabilidad dimensional hasta 200°C (392°F), resistencia a fatiga estática y dinámica y resistencia a fluencia. La hebra de aramida está disponible con gran variedad de diámetros.

Las fibras de carbón se desarrollaron principalmente por sus propiedades de alta resistencia y módulo de elasticidad y propiedades de rigidez para la aplicación en la industria aeroespacial. Comparadas con la mayoría de las otras fibras sintéticas, la producción de las fibras de carbón es costosa y tiene desarrollo comercial limitado. Las fibras de carbón tienen alta resistencia a tensión y alto módulo de elasticidad. También son inertes a la mayoría de los productos químicos. Las fibras de carbón se producen normalmente en hebras que deben contener hasta 12000 filamentos individuales. Las hebras comúnmente se dispersan antes de su incorporación en el concreto para facilitar la penetración de la matriz de cemento y maximizar la efectividad de la fibra.

Hay varios tipos de fibras de nylon en el mercado para uso en vestuario, muebles domésticos y aplicaciones industriales y textiles, pero hay sólo dos tipos de fibras de nylon para uso en concreto, el nylon 6 y el nylon 66. Las fibras de nylon se tejen de los polímeros de nylon y se transforman a través de extrusión, estiramiento y calentamiento para formar una estructura de fibras orientada y cristalina. En aplicaciones en concreto, se tejen hilos de alta tenacidad (alta resistencia a tensión) y estables a altas temperaturas y a la luz y, posteriormente, se cortan en pequeñas longitudes. Las fibras de nylon presentan tenacidad, ductilidad y recuperación de elasticidad buenas. El nylon es hidrófilo, con retención de humedad del 4.5% que

aumenta la demanda de agua en el concreto. Sin embargo, esto no afecta la hidratación y la trabajabilidad del concreto con bajo contenido de fibras (del 0.1% al 0.2% en volumen), pero se le debe considerar si se usan volúmenes más altos de fibras. Esta cantidad relativamente pequeña de fibras tiene potencialmente mayor capacidad de refuerzo que bajos volúmenes de fibras de polipropileno y poliéster. El nylon es relativamente inerte y resistente a una amplia variedad de materiales orgánicos e inorgánicos, incluyendo álcalis fuertes.

Las fibras sintéticas se usan también en estuco y mortero. Para estas aplicaciones, las fibras son más cortas que las fibras sintéticas para concreto. Normalmente se emplean pequeñas cantidades de fibras de 13mm (1/2 pulg.) de longitud, resistentes a álcalis para basar mezclas de revoque (pañete) de revestimiento. Se las puede usar en pequeñas hileras de estuco y bombas de mortero y pistola spray. Se las debe añadir a la mezcla de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Para más detalles sobre las propiedades físicas y químicas de las fibras sintéticas y sobre las propiedades del concreto con fibras sintéticas, consulte el ACI 544.1R. La ASTM C 1116 clasifica los concretos y concretos lanzados (proyectados) reforzados con fibras sintéticas, de acero y de vidrio.

La tecnología de molienda conjunta de cementos con fibras tiene la ventaja de que algunas fibras sintéticas no se destruyen o pulverizan en el molino de cemento. Las fibras se mezclan con el cemento anhídrido durante su molienda para que sean uniformemente distribuidas. Además, durante la molienda, la superficie de las fibras se vuelve áspera, mejorando su adherencia mecánica con la pasta de cemento (Vondran 1995).

2.1.2.4 Fibras Naturales

Las fibras naturales se han usado como una forma de refuerzo desde mucho tiempo antes de la llegada de la armadura convencional de concreto. Los ladrillos de barro reforzados con paja y morteros reforzados con crin de caballo son unos pocos

ejemplos de cómo las fibras naturales se usaron como una forma de refuerzo. Muchos materiales de refuerzo natural se pueden obtener con bajos niveles de costos y energía, usando la mano de obra y la pericia disponibles en la región. Estas fibras se usan en la producción de concretos con bajo contenido de fibras y, ocasionalmente, se han usado en placas delgadas de concreto con alto contenido de fibras.

2.1.2.5 Fibras Naturales No Procesadas

A final de los años 60, se hicieron investigaciones sobre las propiedades de ingeniería de las fibras naturales y de los concretos producidos con ellas. El resultado fue que se puede usar estas fibras con éxito para la producción de planchas finas para muros y techos. Se produjeron elementos compuestos de cemento portland y fibras naturales no procesadas, tales como fibras de coco, sisal, bambú, yute, madera y fibras vegetales. A pesar de que los concretos producidos con fibras naturales presentan propiedades mecánicas buenas, tienen algunos problemas de durabilidad. Muchas de estas fibras son altamente susceptibles a los cambios de volumen debido a variaciones de la humedad que contienen. Los cambios de volumen de las fibras que acompañan los de humedad pueden afectar drásticamente la resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz.

2.1.2.6 Fibras de Madera (Fibras Naturales Procesadas)

El método por el cual las fibras se extraen y los procesos de refinamiento influyen grandemente las propiedades de las fibras de celulosa. El proceso por el cual la madera se reduce a una masa de fibras se llama reducción a pulpa. El proceso kraft es uno de los más empleados en la producción de fibras de celulosa. Este proceso consiste en cocinar la viruta de madera en una solución de hidróxido de sodio, carbonato de sodio y sulfuro de sodio. Las fibras de celulosa tienen relativamente buenas propiedades mecánicas si son comparadas con muchas fibras producidas industrialmente, tales como polipropileno, polietileno, poliéster y acrílicas. Fibras de celulosa sin lignina se pueden producir con resistencia a tensión de hasta 20000 kg/cm²

o 2000 Mpa con especies seleccionadas de madera y proceso de reducción a pulpa. La resistencia a tensión de las fibras de 5100 kg/cm² o 500 MPa se puede producir habitualmente usando un proceso químico de reducción a pulpa y madera más comunes y menos caras.

2.1.2.7 Sistemas Múltiples de Fibras

Es un sistema múltiplo (mixto) de fibras se mezclan dos o más tipos de fibras. El concreto con fibras híbridas combina macro y micro fibras de acero. El uso de una mezcla de macro fibras y las recientemente desarrolladas micro fibras de acero, las cuales tienen menos de 10 mm (0.4 pulg.) de longitud y menos de 100 micrómetros (0.004 pulg.) de diámetro, conduce a un menor espaciamiento entre las fibras, lo que puede reducir la microfisuración y aumentar la resistencia a tensión del concreto.

Las aplicaciones indicadas para este material son reparaciones y remiendos delgados (Banthia y Bindiganavile 2001). Se supone que el sistema la tenacidad y la resistencia al impacto del concreto reforzado con fibras de acero con la reducción de la fisuración por contracción (retracción) plástica de los concretos con fibras de polipropileno. Se ha empleado una mezcla de 30 kg/m³ de fibras de acero con 0.9 kg/m³ de fibras de polipropileno fibrilado en las losas sobre el terreno de un proyecto en el área de Chicago (Wojtysiak y otros 2001). El concreto con una mezcla de fibras tenía un revenimiento (asentamiento) menor si es comparado con el concreto convencional, pero ha alcanzado resistencia elástica y pos-elástica.

2.2 Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber (T. Ochi, S. Okubo, K. Fukui)

En la Universidad de Tokio, Japón en febrero de 2007 se desarrollo un trabajo donde se describe un método que es utilizado para producir concreto reforzado con fibras de PET. La característica principal de la fibra de PET es que es fácil de manejar. El trabajo consiste en el desarrollo de un método para la fabricación de la fibra de PET. Donde las fibras fueron fabricadas a partir de botellas de PET que se fundieron industrialmente y posteriormente se marcaron para producir monofilamentos; durante ese proceso, se le aplicaban una fuerza suficiente en los monofilamentos, para ser cortadas y producir las fibras de PET.

2.2.1 Preparación de la fibra de PET

El artículo nos explica que para minimizar los costos y contribuir al reciclado de los materiales, usaron pellets reciclados de botellas de PET como materia prima para la producción de la fibra de PET. Las propiedades de la fibra de plástico varían ampliamente dependiendo del método de producción. En el proceso normal; los pellets se funden, extruidos con una boquilla y elaborando la fibra en caliente. Cuando el plástico derretido se dibuja de esta forma, el polímero forma cadenas que se alinean a lo largo de la dirección longitudinal de la fibra. Como resultado, la fuerza de la fibra se incrementa en más de un orden de magnitud. Después decidieron que las fibras presentaran monofilamentos, como se muestra en la Figura 3, de 20 -100 fibras fueron extruidas de la boquilla de la extrusora. La boquilla fue en forma de disco y tenía numerosos agujeros pequeños.

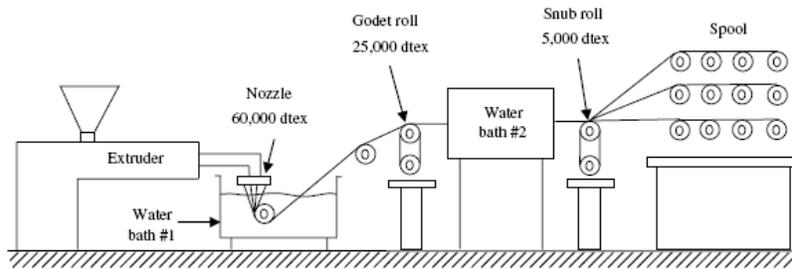


Fig. 1. Extrusion apparatus for monofilaments.

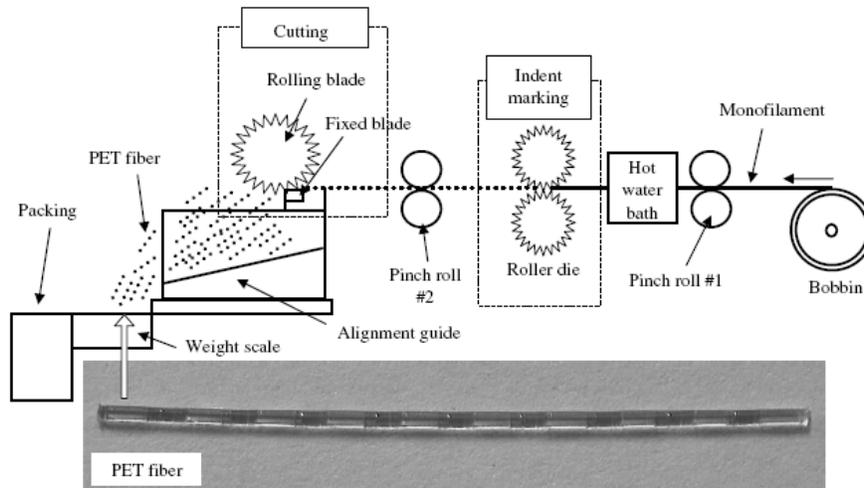


Fig. 3 Procedimiento para la fabricación de fibras de PET

La resultante fue un monofilamento de fibra lisa con una sección circular. Al igual que el refuerzo de acero, se concluye que la fibra se puede sacar con facilidad del concreto si no hubiera guiones sobre la fibra. Por lo tanto desarrollaron un proceso para producir guiones y lo incorporaron en el aparato de corte de la fibra, como se muestra en la figura del procedimiento. Después de marcar guiones, la fibra de PET se redujo a una longitud de 30 mm o 40 mm, estas longitudes se seleccionaron con base en la experiencia pasada, los cálculos simples y los experimentos preliminares. Las especificaciones de la fibra de PET, incluyendo los errores de longitud permitida, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de la fibra de PET

Material	PET
Specific gravity	1.34 ± 0.02
Diameter (mm)	0.7
Length (mm)	30 ± 1 or 40 ± 2
Mass (mg)	$15.2 \pm 15\%$ (30 mm length) or $20.3 \pm 15\%$ (40 mm length)
Surface	Indented
Tensile strength (MPa)	Above 450

2.2.2 Propiedades Básicas de fibra de PET

El estudio proporciona las propiedades básicas de la fibra de PET, incluyendo la tensión, lo cual es importante en términos de adherencia entre las fibras y el concreto; resistencia a los álcalis, lo cual es importante en términos de durabilidad; y la toxicidad de los gases de combustión, lo cual es importante en términos de la seguridad durante la exposición del fuego. El Polipropileno (PP) y el alcohol polivinílico (PVA), que se han utilizado en el pasado como fibras plásticas de refuerzo de concreto, se utilizaron para la comparación con el tereftalato de polietileno (PET). Las especificaciones de las fibras se muestran en la Tabla 3.

En la prueba de tensión por humectación entre el concreto y la fibra, se utilizaron mezclas de ensayo con el objetivo de mejorar los valores de tensión en el rango de 30-45 mN/m. Las tensiones mejoradas obtenidas fueron 40 mN/m para el PET, 35 mN/m para el PP, y más de 45 mN/m para el PVA. Por lo tanto, la tensión de humectación del PET es menor que la de PVA, pero superior a la de PP.

2.2.3 Resistencia a los álcalis

Una prueba de inmersión se realizó en una solución alcalina que se prepara disolviendo 10 g de hidróxido de sodio en 1 dm³ de agua destilada. El periodo de inmersión es de 120 horas y una temperatura de inmersión de 60 ± 2 °C. Aunque las temperaturas de inmersión pueden ser de 40 a 80 °C, se decidió utilizar 60 °C, ya que

en la práctica es el más utilizado en Japón. Los resultados medidos de la resistencia a la tracción antes y después de la inmersión se muestran en la Tabla 3. La resistencia a la tracción del PET después de la inmersión fue de 1 % menor que antes de la inmersión, por lo que el deterioro fue mínimo. Para el PP, la fuerza de tracción después de la inmersión fue de 14% menor que antes de la inmersión. En el caso de PVA, la fuerza de tracción después de la inmersión fue de 46 % menor que antes de la inmersión. Por lo que se produjo un deterioro significativo. A juzgar por estos resultados, el PET tiene suficiente resistencia a los álcalis.

Tabla 3. Resultados para la resistencia a los álcalis

Fiber	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)		Strength ratio ^a (%)
			Before exposure	After exposure for 120 h	
PET	0.75	30	352	348	99
PP	1.21	30	170	147	86
PVA	0.71	30	360	202	56

^a Strength after exposure/Strength before exposure.

2.2.4 Prueba de Combustión al PET

La prueba de combustión de la fibra de PET se llevó a cabo para responder a las dos siguientes preguntas. ¿Si la fibra está expuesta a altas temperaturas durante un incendio, se generan gases tóxicos? y ¿En qué rango es perjudicial para los seres humanos?; El análisis de los gases reveló que el dióxido de carbono fue el componente principal. Aunque una cantidad pequeña de monóxido de carbono se ha generado, se detectó sin gases tóxicos. La fibra de PET consta de los elementos C, H y O, por lo que no se generan gases tóxicos.

2.2.5 Miscibilidad de fibra de PET

Desde un punto de vista práctico, la miscibilidad del concreto reforzado con fibra es un factor importante. Por ejemplo, es necesario que la fibra esté uniformemente dispersa en el concreto sin que se formen bolas de fibra. Por lo tanto, la miscibilidad fue investigada mediante ensayos a mano ya que se presentan más variables críticas que en ensayos elaborados a máquina.

2.2.5.1 Mezclas desarrolladas para pruebas.

La mezcla de ensayo que se realizó a mano se muestra en la Tabla 4. Los volúmenes medidos de cemento y agregados finos se mezclan bien en un cubo, la mezcla se revuelve con una pala durante 8 minutos, mientras que el agua se añade de forma gradual hasta una cantidad predeterminada. La fibra de PET, se añade de 3 a 4 veces en el mortero hasta que el contenido de fibra es de 0.76 %, la mezcla se revuelve para una segunda fase de 8 minutos. El estado de la mezcla se observa cuidadosamente, hasta que no haya bolas de fibra o alguna anomalía.

Tabla 4. Constituyentes para mezcla de concreto

		W/C (%)	Mixtures (kg/m ³)				Volumetric content of fiber (%)	Fiber length (mm)	Max. size of aggregate (mm)	Slump (cm)
			Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate				
Mixing test	Hand mixing	50	681	341	1129	0	0.76	30	–	–
	Concrete mixer	69	325	225	992	789	0, 0.5, 1.0, 1.5	30	15	18.5 ^a
Bending test		65	334	217	973	743	0	30	15	16.5
							0.5			16.0
							1.0			3.5
							1.5			4.0
		60	358	215	947	754	0	30	15	9.5
							0.5			
						1.0				
						1.5				
	55	389	214	918	761	0	30	15	7.0	
						0.5				
						1.0				
						1.5				
Hishikari mine		40	538	215	973	585	0.3	30	10	18.0
Bush road pavement		64	285	182	890	898	0.75	40	20	8.0

^a Plain concrete.

Para estudiar la orientación de las fibras se elaboraron pruebas de control, la matriz aglutinante más la fibra de PET fue mezclada y posteriormente vaciada con una pala en dos moldes con un diámetro de 75 mm y una altura de 200 mm. La fluidez era buena y la elevación de la fibra de PET no se observó incluso cuando el molde fue golpeado con un martillo de madera para realizar la compactación.

Las tres muestras de análisis de la mezcla reforzada con fibras de PET fueron retiradas de los moldes después de endurecer. Los especímenes se cortaron en siete rodajas, para que las fibras de PET fueran visibles en el mortero y así se pudieran observar en la sección transversal. Las secciones transversales de las tres muestras se observaron, y las fibras se consideraron uniformemente distribuidas. El número de fibras expuestas en las seis secciones y los factores de la orientación de las probetas en la dirección de la altura del molde se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Numero de fibras expuestas en la sección transversal y el factor de orientación

Samples		#1	#2	#3
Cross-sectional area (cm ²)		44	44	79
Number of fibers counted on a cross-section	Cross-section 6	31	52	73
	Cross-section 5	20	52	78
	Cross-section 4	31	60	73
	Cross-section 3	43	42	91
	Cross-section 2	51	44	75
	Cross-section 1	37	14	67
	Average	36	44	76
Average fiber density ^a (1/cm ²)		0.81	1.00	0.96
Orientation factor ^b		0.47	0.58	0.56

^a Average number of fibers per unit cross-sectional area.

^b (Average fiber density)(Cross-sectional area of a fiber)/(Volumetric content of fibers) [8,9].

Las fibras se distribuyeron de manera uniforme a excepción de la sección transversal 1 de la probeta # 2. Los factores de orientación para todas las muestras

fueron inferiores a 0.64, que es el valor teórico de dimensiones orientadas aleatoriamente y cerca de 0.5 que es el valor teórico de dimensionar al azar.

2.2.6 Propiedades mecánicas de concreto con fibra de PET.

Se realizó la prueba de flexión y de compresión, así como la prueba esfuerzo - deformación para determinar el comportamiento del material.

2.2.6.1 Prueba de flexión

Para esta prueba se seleccionaron tres relaciones de agua cemento (65%, 60% y 55%), y cuatro porcentajes de contenido volumétrico de fibra de PET (0%, 0.5%, 1.0% y 1.5%). Así, el punto de ensayo de flexión se llevo a cabo por un total de 12 condiciones. Cinco muestras fueron analizadas para cada valor del parámetro. Las dimensiones de las probetas fueron de 100 x 100 x 400 mm.

Los puntos fuertes de flexión para el caso en el que la relación agua-cemento fue de 60% se muestran en la figura 4. La línea vertical en la figura 4 indica la desviación estándar, según la desviación estándar, la variación en la resistencia a la flexión es grande. Como se ve en esta figura, la resistencia a la flexión varía poco, hasta un contenido de fibra de 1% sin embargo, la flexión aumenta la fuerza de manera significativa con un contenido de fibra de 1.5%.

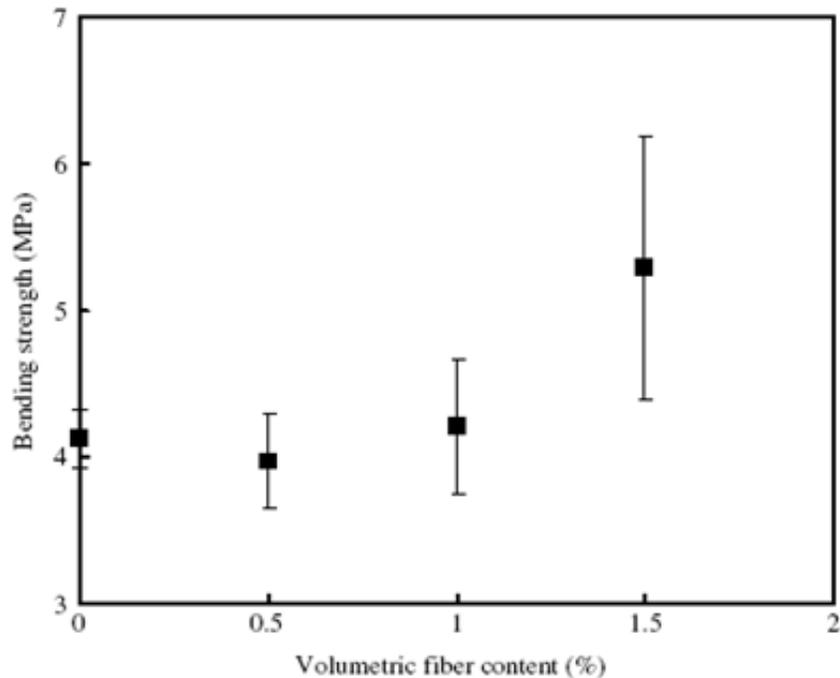


Fig. 4 Cambio en la resistencia a la flexión con respecto al contenido de fibra para el concreto con una relación agua-cemento de 60 %. La línea vertical indica la desviación estándar.

Esta tendencia es la misma que la observada para la fibra de acero en el concreto reforzado, en donde la longitud y el área de la sección transversal de las fibras de acero son de 25 mm y 0.3 mm², respectivamente, y la relación agua cemento es de 0.6. Los puntos fuertes de flexión para todas las condiciones se muestran en la Tabla 6. La tendencia de variación de resistencia a la flexión con el contenido de fibra de PET fue cualitativamente similar para todos los casos de relación agua-cemento.

Tabla 6. Resultados del ensayo a tensión

Results of the bending test

W/C	Volumetric content of fibers (%)	Bending strength (MPa)	Absorbed energy ^a (Nm)	Toughness index ^b (MPa)
65%	0.0	3.82	4.3	0.62
	0.5	3.72	13.7	2.01
	1.0	4.12	22.1	3.24
	1.5	4.80	32.8	4.82
60%	0.0	4.12	4.4	0.64
	0.5	3.97	17.9	2.63
	1.0	4.21	25.1	3.68
	1.5	5.29	33.0	4.86
55%	0.0	4.21	4.3	0.67
	0.5	4.41	16.5	2.42
	1.0	4.85	25.6	3.76
	1.5	5.73	35.7	5.24

^a Energy absorbed at the mid-span deflection of 2 mm.

^b (Absorbed energy)(Span) divided by (Deflection)(Width)(Height)².

La curva de carga – deformación para el ensayo con una relación agua-cemento de 60% se muestra en la Figura 5. Cuando el contenido de fibra es del 0%, la carga máxima se encuentra entre 0.2-0.3 mm (deformación en el punto de carga); después de esto la carga disminuye repentinamente. Cuando el contenido de fibra es de 1.5%, se forman grietas en el mismo punto de deflexión en el que la carga llegó a un máximo en el concreto sin fibra, sin embargo, ya que la carga es absorbida por la fibra de PET, el material se recupera y se produce un aumento en la carga. Posteriormente, la carga en varias ocasiones mostro aumentos y disminuciones. La carga es de 14 kN, incluso cuando la deformación es de 5 mm, lo que indica una alta tenacidad.

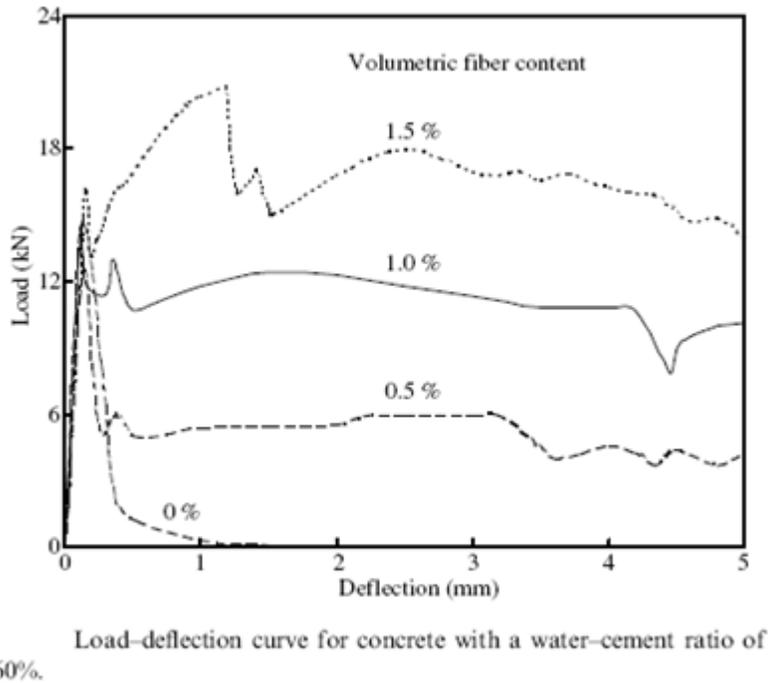


Fig. 5 Curva carga-deformación para el ensayo con relación agua-cemento del 60%.

Independientemente del contenido de fibra, la deflexión de las curva de carga muestra un comportamiento similar hasta que las grietas se forman. A partir de entonces, la carga sostenida es aproximadamente proporcional al contenido de fibra, como se muestra en la figura 5. Este comportamiento es el mismo que el de fibra de acero en el concreto. La resistencia a la flexión de todas las muestras fue 5.4 MPa, que es comparable a la de fibra de acero en el concreto. Aun cuando la relación agua-cemento fue variada se observó la misma tendencia en los diferentes contenidos de fibra.

Al realizar la prueba de flexión, es importante saber cuánta energía se absorbe en el punto de destrucción. La tabla 6 muestra la energía necesaria para llegar a un lapso de deflexión media de 2 mm y la dureza de la JCI que se calcula utilizando la cantidad de energía. En todos los casos, la energía absorbida y la dureza de la JCI aumentaron notablemente por la mezcla de cemento con la fibra de PET.

2.2.6.2 Prueba de Compresión

El número de muestras para la prueba de compresión fue de 12, como fue el caso para la prueba de flexión. El tamaño de la prueba fue un cilindro con un diámetro de 100 mm y una altura de 200 mm, con cuatro medidores de presión. Se obtuvieron los resultados experimentales de la resistencia a la compresión uniaxial, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, estos resultados se muestran en la Tabla 7. Aunque existe una variación, para la relación agua-cemento no hay variación significativa en la compresión, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, para estos valores asociados con distintos contenidos de fibra de PET. Para todas las muestras, la deformación a la carga máxima apenas cambio con diferentes proporciones de cemento-agua y diferentes contenidos de fibra de PET. La tensión vertical y horizontal se calcula en 0.4% y 0.2%, respectivamente.

Tabla 7. Resultados de la Prueba a Compresión.

W/C	Volumetric content of fibers (%)	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (10^4 MPa)	Poisson's ratio	Specific gravity
65%	0.0	32.1	2.13	0.20	2.35
	0.5	31.4	2.13	0.20	2.27
	1.0	34.8	2.22	0.21	2.28
	1.5	34.1	2.23	0.20	2.27
60%	0.0	34.8	2.65	0.16	2.28
	0.5	38.8	2.63	0.28	2.28
	1.0	39.6	2.15	0.20	2.27
	1.5	38.8	2.15	0.20	2.26
55%	0.0	45.1	2.16	0.16	2.30
	0.5	45.6	2.09	0.20	2.31
	1.0	47.8	2.33	0.20	2.28
	1.5	43.7	2.25	0.20	2.28

2.2.6.3 Prueba de adherencia de la fibra al mortero.

La prueba de resistencia a la adherencia se realizó cuando la edad del concreto fue de 7 días, para cada fibra se llevaron a cabo 10 pruebas. Los puntos fuertes de adherencia por unidad de área del PET y del PP fueron 2.8 y 2.9 MPa, respectivamente. A juzgar por estos resultados, la fibra de PET tiene una fuerza de adherencia comparable con el PP.

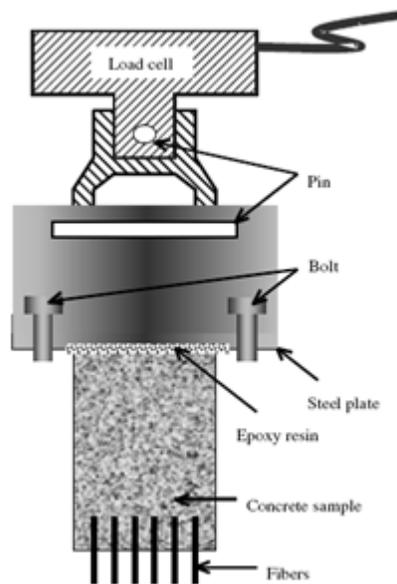


Fig. 6 Aparato para medir la adherencia entre el concreto y la fibra

3. METODOLOGÍA

La investigación se realizó en la Universidad Autónoma de Querétaro, dentro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería ubicada en el Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n C.P. 76010, Santiago de Querétaro, Qro. México. Además se contó con el apoyo del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), ubicado en el Libramiento Norponiente No. 2000, Real de Juriquilla C.P. 76239, Santiago de Querétaro, Qro. México.

El primer paso para la elaboración de este trabajo, consistió en la selección del residuo, posteriormente se realizó la caracterización de los materiales constituyentes para las mezclas. El segundo paso consistió en la elaboración de las mezclas y la integración del residuo a la mezcla. Como tercer paso se elaboraron piezas del tamaño del block con las mezclas obtenidas. Por último se realizaron las pruebas físicas y mecánicas de los especímenes.

El residuo se integró a la mezcla de mortero en diferentes proporciones y presentaciones. Se hizo un diseño de experimento considerando las variables dependientes e independientes.

Tabla 8. Variables dependientes e independientes del experimento

Variables Dependientes	Variables Independientes
Resistencia.	1 Tipos de Agregado
Modulo a la ruptura	2 Tipos de Forma del pet
Coefficiente de saturación	3 Cementantes
Absorción Inicial	
Absorción 24 horas	

Las partículas de PET se revolvieron con la mezcla seleccionada en una mezcladora, luego se agregó agua. Cuando esta mezcla adquiere consistencia uniforme, se le vierte en una máquina rodante para moldear mampuestos o en una gaveta para el caso de los bloques por vaciado. Se realiza la compresión de la mezcla y la postura de los mampuestos. Se les deja en pista durante un día y luego se les moviliza hasta una pileta de curado con agua, en la cual permanecen siete días.

Después de este tiempo se les retira y se almacena en pilas a cubierto hasta cumplir los 28 días desde su elaboración.

Para verificar las propiedades mecánicas y físicas de las mezclas diseñadas, estas se moldaron como piezas de block. Se obtuvo la absorción de agua, la resistencia a compresión, el módulo de ruptura, etc. Los métodos de prueba corresponden a las normas ASTM C67, ASTM C109, NMX-C-036.

Se realiza una descripción general del elemento, si se trata de un elemento constructivo portante para muros interiores y exteriores, eco-eficiente, prefabricados del tipo liviano y que se produzca en fábrica fija.

Se obtuvo sus dimensiones y diseño, si es un tabique convencional prismático. Determinamos su composición: mortero ligero, plástico polietileno - tereftalato. Se obtiene un peso por unidad así como su densidad. Además, de obtener sus propiedades mecánicas y físicas, como su resistencia a la compresión, absorción de agua y su módulo de ruptura.

3.1 Materiales

3.1.1 Cemento Portland

El cemento empleado en esta investigación para la dosificación de mezclas de concreto ligero, es un Cemento Portland Ordinario (CPO) marca Tolteca Tipo I, que está compuesto principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada, piedra machacada, arenilla u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto.

Tabla 9. Composición química del cemento portland

Análisis químico del cemento portland (%)	
CaO	61.94
SiO₂	18.08
Al₂O₃	5.58
Fe₂O₃	2.43
MgO	2.43
SO₃	2.54
K₂O	0.99
Na₂O	0.18

El cemento portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final. La Tabla 3-3 muestra las materias primas más utilizadas para la Fabricación del Cemento Portland.

Tabla 10. Fuentes de las Materias Primas Usadas en la Fabricación del Cemento Portland [Kosmatha et al., 2004].

Cal, CaO	Hierro Fe₂O₃	Sílice SiO₂	Alúmina AL₂O₃	Yeso o Sulfato CaSO₄ · 2H₂O
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de Calcio	Mineral de Aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	Arcilla*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita*	Mineral de hierro*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del horno de cemento	Costras de laminado*	Ceniza Volante	Arcilla*	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Escoria de cobre	
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Ceniza volante*	
Arcilla	Esquisto	Loes	Greda	
Greda		Marga*	Granodiorita	
Caliza*		Lavaduras de mineral	Caliza	
Mármol		Cuarcita	Loes	
Marga*		Ceniza de arroz	Lavaduras de mineral	
Coquilla		Arena*	Esquisto*	
Esquisto*		Arenisca	Escoria	
Escoria		Esquisto*	Estauroлита	
		Escoria		
		Basalto		

*Las fuentes más comunes

Los cementos mexicanos se especifican según la norma NMX-C-414-ONNCCE. De acuerdo con esta norma hay seis tipos de cementos; CPO, CPP, CPEG, CPC, CPS, CEG. El CPO es un cemento portland ordinario, el cual puede tener hasta 5% de adición de materiales tales como escoria, puzolanas, humo de sílice o caliza.

Tabla 11. Clasificación de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE-2004)

Tipo	Denominación	Clase resistente	Características especiales
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	RS Resistente a los Sulfatos
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30	BRA Baja Reactividad Álcali agregado
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R	BCH Bajo Calor de Hidratación
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	40 R	---
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	---	---

3.1.2 Agregado Ligero

Para este estudio se utilizó arena disponible a nivel local, del banco de Saldarriaga ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro. La arenilla se caracterizó bajo las normas ASTM para obtener las propiedades del agregado fino llegando a los resultados mostrados en la Tabla 3-5:

Tabla 12. Propiedades físicas de la arena

Variable	Unidad	Valor
Desperdicios	%	7.05
Humedad	%	6.01
Peso volumétrico seco suelto	Kg/m ³	1163.91
Peso volumétrico seco compacto	Kg/m ³	1301.06
Granulometría	Kg	Tabla 3-6
Absorción	%	8.49
Densidad Relativa	Adim.	2.61
Equivalente de arena	%	55.65%
Cont. Materia orgánica	Colorimetría	M.O < 3

Tabla 13. Granulometría de la arena

# malla	Peso retenido parcial	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% que pasa
16	0.49	0.12	0	100
20	71.04	18.1	18	82
30	104.06	26.52	45	56
50	78.15	19.92	65	36
60	65.71	16.75	81	19
100	45.04	11.48	93	8
200	30.01	7.65	101	
Suma	394.5	100		
Charola	3.42			
Suma	397.92			

3.1.3 Hidróxido de Calcio (CAL, CaOH)

Se utilizó cal Los Arcos está es elaborada en el Estado de Querétaro, debe ser hidratada y normalizada; la razón por la cual la cal debe ser normalizada se debe a que pueden existir partículas muy finas, que en vez de funcionar como aglomerante lo hacen como residuos inertes. La densidad de la cal es del orden de 640 kg/m³. Cuando se emplea en el mortero, ésta (a diferencia del cemento) endurece muy lentamente al reaccionar con el anhídrido carbónico del ambiente, en un proceso llamado carbonatación, el cual es beneficioso para el mortero por dos razones: 1) las fisuras se sellan a lo largo del tiempo al formarse cristales de carbonato de calcio, que proveen una resistencia adicional a la del cemento y, 2) al endurecer lentamente favorecen la retentividad de la mezcla.

3.1.4 Residuo de PET (Tereftalato de Polietileno)

Se selecciono como tipo de residuo el Tereftalato de Polietileno (PET) para utilizarlo en la elaboración de los tabiques, en tres presentaciones; tiras largas y cortas, molido y botellas completas.

El Tereftalato de polietileno, (más conocido por sus siglas en inglés PET, *Polyethylene Terephthalate*) es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles. Algunas compañías manufacturan el PET y otros poliésteres bajo diferentes nombres como Mylar y Melinex, químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

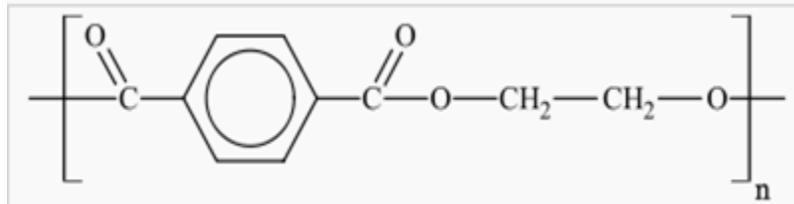


Fig. 7. Unidad de PET

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterización física de los Agregados

Es de gran importancia el caracterizar el agregado fino debido a que es necesario conocer las propiedades físicas de este para el diseño de las mezclas a elaborar y el estado en que se encuentra.

Los procedimientos para la caracterización física y granulométrica de los agregados se basarán en los procedimientos establecidos en las normas ASTM-C125, ASTM C 331, ASTM C 404, los cuales, se resumen en la tabla siguiente.

Tabla 14. Procedimientos para la caracterización física y granulométrica.

Para material fino:	Para material grueso:
a. Porcentaje de humedad (%)	a. Porcentaje de humedad (%)
b. Peso volumétrico seco y suelto (kg/cm ³)	b. Peso volumétrico seco y suelto (kg/cm ³)
c. Peso volumétrico compacto (kg/cm ³)	c. Peso volumétrico compacto (kg/cm ³)
d. Absorción de la arena (%)	d. Absorción de la grava (%)
e. Granulometría (%)	e. Granulometría (%)
f. Densidad relativa (adimensional)	f. Densidad relativa (adimensional)
g. Equivalente de arena (%)	g. Desgaste a la abrasión (%)
h. Contenido de materia orgánica	h. Porcentaje de finos (%)

3.2.1.1 Porcentaje de desperdicios

El porcentaje de desperdicios en la arena se define como el porcentaje de grava contenido en una muestra de arenilla de peso conocido, es decir, el material que no pase el tamiz #4 (4.75mm).

El objetivo de esta prueba es determinar la cantidad de grava presente en la muestra de arenilla. Esto nos sirve para conocer en qué grado (porcentaje) la arena está contaminada por grava.



Fig. 8 Cantidad de grava obtenida de una muestra de arenilla

Al inicio se determina el peso total de la muestra. Después, esta se criba a través de la malla #4 (4.75mm) y se pesa el material retenido en dicha malla. Se obtiene la relación entre el peso retenido en la malla y el peso total de la muestra, esto nos dará un porcentaje del retenido en la malla #4, que corresponde al contenido de grava en la arena.

$$\%G = \frac{\text{Ret.}\#4}{P_{tm}} \times 100;$$

donde:

%G = porcentaje de grava en la muestra de arena;

Ret. #4 = Peso retenido en la malla #4 de la muestra de arena;

P_{tm} = Peso total de la muestra de arena.

3.2.1.2 Porcentaje de humedad

Porcentaje de humedad está definido como la cantidad de agua que tiene la arena *in situ*, para que sea considerada en los cálculos de las mezclas.

Esta prueba tiene como objetivo el obtener el contenido de humedad en la muestra de arena, para considerarlo al momento de la preparación de los morteros.



Fig. 9 Muestra de arena en el horno para obtener peso seco

Para esta prueba se pesa aproximadamente de 200 a 300g de arena, se ponen a secar al horno por no menos 24 hrs a 100°C.

La muestra se saca del horno y después de 24 hrs se pesa para obtener la diferencia de pesos. El porcentaje de humedad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\%W = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100 ;$$

donde:

%W= porcentaje de humedad (%);

P_w= Peso húmedo del material (g);

P_s= Peso secado al horno del material (g);

P_w-P_s= Peso del agua contenida en el material (g).

3.2.1.3 Peso volumétrico seco suelto

Peso volumétrico seco suelto se define como la cantidad en peso de un material sin compactar por metro cubico. El fin de esta prueba es obtener el peso volumétrico de la arena en estado suelto. Esto se realiza en un recipiente metálico con peso y volumen conocidos.

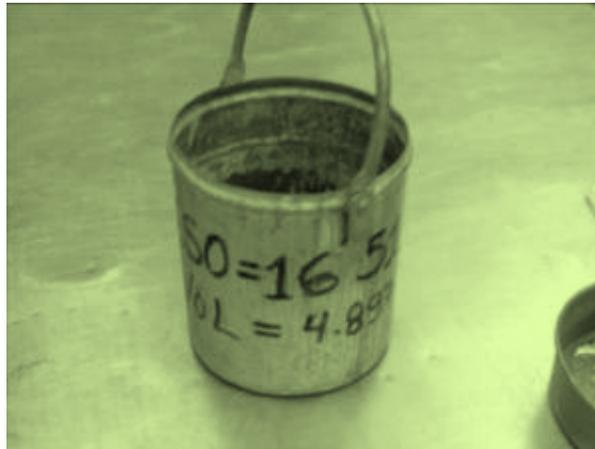


Fig. 10 Recipiente para el cálculo de peso volumétrico de la arena

Comenzamos por cuartear la arena para tener una muestra lo más homogénea posible, con el cucharón se toma el material en forma representativa y con una brocha se asegura de recoger todos las partículas finas.



Fig. 11 Cuarteo de la arena para elegir una muestra representativa de la misma

Las muestras se depositan con cuidado en el recipiente metálico, procurando que no se compacte al momento de la caída. Esto se alcanza interceptando el material con la mano evitando que este caiga directo del cucharón, ya que esto nos daría un resultado erróneo. El recipiente se llena hasta nivel de derrame. Se enrasa la arena con una regla metálica para asegurarnos que está ocupe el volumen del recipiente. El recipiente la arena se pesa, se resta el peso del recipiente del peso total para obtener el peso del material contenido en el recipiente.



Fig. 12 Recipiente de peso volumétrico colocado en la báscula para obtener el peso

La prueba se realiza tres veces con el objeto de obtener al menos tres datos por repetición, tomando el resultado como correcto si entre las tres pruebas no existe una variación mayor de 30 Kg/m^3 . El peso volumétrico de la arena se toma como la media de los tres pesos volumétricos respectivos.

3.2.1.4 Peso volumétrico seco compacto

Peso volumétrico seco suelto se define como la cantidad en peso de un material compactado por metro cubico. Esta prueba se realiza con el objeto de encontrar el peso volumétrico seco compacto de la arena (Kg/m^3), utilizando un recipiente metálico con peso y volumen conocido.



Fig. 13 Muestra de arena cuarteada para llenar el recipiente metálico

Al igual que en la técnica anterior primeramente el material se cuartea para obtener una muestra representativa de arena y se toma una muestra compuesta con el cucharón tomando el material hasta llenar el recipiente. El material se deposita con cuidado en el recipiente evitando su compactación al momento de la caída, para esto nos ayudamos con la mano al interceptar el material y lo cual aseguro que este no caiga directo del cucharón. El llenado se hará en tres capas con aproximadamente la misma cantidad de arena. A cada capa se le aplican 25 golpes con una varilla punta de bala de 5/16", teniendo cuidado que las capas anteriores no penetre a la segunda y tercer capa. En la tercera capa se llena el recipiente hasta nivel de derrame y después de los 25 golpes la arena se enrasa con la regla metálica.



Fig. 14 Recipiente utilizado para el peso volumétrico

El recipiente con el material se pesa, se resta el peso del recipiente para obtener el peso del material sin recipiente; este se divide entre el volumen conocido del recipiente, obteniendo así el peso volumétrico seco compacto de la muestra (Kg/m^3). El peso volumétrico seco suelto y seco compacto se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$PVSS(PVSC) = \frac{Pm}{Vr} \times 1000,$$

donde:

PVSS= Peso volumétrico seco suelto (Kg/m^3);

PVSC= Peso volumétrico seco compacto (Kg/m^3);

Pm= Peso del material contenido en el recipiente (Kg);

Vr= Volumen del recipiente (l).

3.2.1.5 Granulometría

Granulometría se define como la obtención de tamaños y cantidades de partículas contenidas en una muestra de arena. El objeto de esta prueba es obtener la distribución de las partículas de arena por el tamaño y cantidad. Para esto se utilizan mallas con distintas aberturas desde la malla #4 hasta la #200.



Fig. 15 Tamices para la granulometría de la arena

Al inicio se toman aproximadamente 200g de arena para corregir la distribución de interés por humedad, es decir, se obtiene el porcentaje de humedad (según el inciso 3.2.1.2) al momento de realizar la prueba de granulometría.

Posteriormente, se toman 500g de muestra para realizar la prueba de granulometría, que se colocan en un vaso de aluminio, dejándola saturar durante 24hrs.

Después de saturar el material, lo lavamos agitando con una varilla en forma de ocho durante 15s, lo dejamos reposar durante 30s y decantamos el agua a través de la malla #200.

Agregamos agua y repetimos el proceso anterior hasta que el agua que pase por la malla salga lo más limpia posible. El material que se retuvo en la malla #200 se lava y se regresa al vaso, con el fin de no perder partículas durante el lavado.

Posteriormente el agua sobrante del vaso se decanta, con el cuidado de no tirar arena, para ponerlo después a secar a la parrilla, ya sea en el mismo vaso o en una charola redonda. El secado se hará a fuego lento o bien en el horno durante 24hrs a 100°C. El peso de la muestra seca y lavada se determina, se vacía el material en las mallas previamente colocadas en columna empezando por la de abertura mayor.

Se procede con el cribado agitando la columna ya sea en forma manual o con vibrador automático, para terminar con un cribado manual en cada malla por separado. Las fracciones obtenidas se pesan y se elabora una tabla para determinar los tamaños y los porcentajes de los retenidos de material. Al estar cribando se procura tener cuidado de no tirar las partículas de la muestra para evitar errores en los pesos retenidos.

Tabla 15. Granulometría del Material 1

MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA 4		MATERIAL QUE PASA LA MALLA 4	
# malla	Peso retenido	# malla	Peso retenido
1 1/2	0gr.	8	40.7gr.
1	0gr.	16	53.3gr.
3/4	56.2gr.	30	31.1gr.
1/2	133.8gr.	50	20.0gr.
3/8	181.4gr.	100	11.4gr.
No 4	710.5gr.	200	6.1gr.
Cantidad de material utilizado para la prueba 5.866 Kg.			

Tabla 16. Granulometría del Material 2

MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA 4		MATERIAL QUE PASA LA MALLA 4	
# malla	Peso retenido	# malla	Peso retenido
1 1/2	0gr.	8	16.45gr.
1	0gr.	16	51.14gr.
3/4	17.8gr.	30	40.13gr.
1/2	65gr.	50	25.89gr.
3/8	84.2gr.	100	12.63gr.
No 4	539.gr.	200	7.64gr.
Cantidad de material utilizado para la prueba 4.961 Kg.			

Tabla 17. Granulometría del Material 3

MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA 4		MATERIAL QUE PASA LA MALLA 4	
# malla	Peso retenido	# malla	Peso retenido
1 1/2	0gr.	8	26.1gr
1	0gr.	16	56.9gr
3/4	8.2gr	30	45.2gr
1/2	42.1gr	50	29gr.
3/8	82.9gr	100	10.1gr.
No 4	251.gr.	200	2.4gr
Cantidad de material utilizado para la prueba 4.582 Kg.			

3.2.2 Propiedades Mecánicas del Residuo

Se determino la propiedad de resistencia a la tensión del Tereftalato de Polietileno (PET). Las propiedades de tensión pueden variar con la preparación de la muestra, la velocidad y desarrollo de la prueba. Consecuentemente se requieren resultados comparativos precisos, estos factores deben ser controlados cuidadosamente.

Cuando se realice una prueba comparativa se debe asegurar que todas las muestras fueron preparadas exactamente de la misma manera.

Las propiedades de tensión pueden proveer datos importantes para propósito de diseño de plásticos en ingeniería.

Preparación para la obtención de las propiedades mecánicas (resistencia a la tensión) del Tereftalato de Polietileno (PET):

1. Para la obtención de probetas de tereftalato de polietileno se utilizó botellas de refresco de 600 ml. de la marca Coca - Cola.
2. Se utilizó la Máquina Universal de Ensayos con capacidad de 150 Ton.
3. Se diseñaron mordazas de acero para realizar las pruebas a tensión.
4. Utilización del Vernier.

3.2.2.1 Procedimiento para preparación del PET

- a) Se cortaron tiras de 165 x 19 mm., para realizar los ensayos a tracción [ASTM D647].
- b) Todas las superficies de las probetas deberán encontrarse libres visualmente de ralladuras, cortes e imperfecciones. Si la probeta fue cortada, deberá encontrarse libre de restos de material (rebabas) el cual se podrá eliminar con una lija o papel abrasivo.
- c) Si es necesario marcar las probetas, esto debe hacerse de manera que no se dañe el material. Estas marcas no deben ser impresas o en relieve en la probeta.

3.2.2.2 Velocidad de Prueba

La velocidad de la prueba será conforme a la de la Tabla 3-5. Si la velocidad no está especificada, o existen varias opciones, la muestra debe romperse en un lapso de tiempo de 0.5 a 5 minutos. La determinación de módulos, deberá hacerse a la velocidad que ha sido seleccionada para las otras propiedades de tensión, con la cual la respuesta y resolución son adecuadas.

Tabla 18. Velocidades de prueba [ASTM D638]

CLASIFICACIÓN	TIPO DE PRUEBA	VELOCIDAD DE PRUEBA	NOMINAL (Rango de Inicio de Prueba) mm/mm-min (in/in-min)
Rígido y semirígido	I	5(0.2) ± 25%	0.1
	II	50(2) ± 10%	1
	III	500(20) ± 10%	10

3.2.2.3 Procedimiento de prueba a tensión

- a) Calibración de la maquina universal y el equipo.
- b) Seleccionar el tipo de prueba del material plástico semirígido (PET).
- c) Medir el espesor y ancho de la probeta con un micrómetro o vernier con resolución mínima de 0.025 mm (0.001 in).
- d) Colocar la probeta en la mordaza superior, y una vez que quede bien alineada longitudinalmente, colocar la carga en cero.
- e) Cerrar la mordaza inferior y comenzar la prueba.
- f) Al romperse la probeta, la prueba termina y se deberá retirar la probeta de las mordazas.



Fig. 16 Prueba de tensión al PET

3.2.3 Diseño de mezclas de mortero sin PET

Se efectuara un diseño experimental en base de la combinación de agregados y tipos de cementantes empleados (variables independientes), y la relación con las correspondientes propiedades mecánicas y físicas a medir (variables dependientes).

Además, las mezclas deberán de reunir el requisito de tener una adecuada fluidez, lo cual, se verificará de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C 1437.

Se realizaron 3 mezclas tomando como referencia el proporcionamiento por volumen propuestos por la British Sta.

Tabla 19. Proporcionamiento por volumen propuestos por la British Sta.

DESIGNACIÓN	CEMENTO:CAL:ARENA
I	1:0 A ¼ :3
II	1: 2: 8 A 9
III	1: 3 : 10 A 12

Los tabique fueron elaborados con los materiales descritos anteriormente, elaborando tres presentaciones con tres diferentes proporciones.

La primera serie contiene; es decir, un mortero común con proporción (1:1/4:3) elaborado según la norma ASTM C1329-04. Este mortero será la mezcla control, la cual se toma como base para la comparación con otras mezclas.

Tabla 20. Diseño de Mezcla 1

Materiales	Proporción Volumétrica	Porcentaje (%)
Cemento	1	19.5
Cal	0.25	4.8
Arena	3	58.5
Agua	0.88	17.2
	5.13	100

La segunda serie contiene cemento portland, cal, arena. La proporción es (1:2:8).

Tabla 21. Diseño de Mezcla 2

Materiales	Proporción Volumétrica	Porcentaje (%)
Cemento	1	7.5
Cal	2	15
Arena	8	60
Agua	2.35	17.6
	13.35	100

La tercera serie al igual que la anterior contiene cemento portland, cal, arena pero en proporción (1:3:11).

Tabla 22. Diseño de Mezcla 3

Materiales	Proporción Volumétrica	Porcentaje (%)
Cemento	1	5.6
Cal	3	16.6
Arena	11	60.9
Agua	3.056	16.9
	18.056	100

3.2.3.1 Metodología de elaboración de mezclas

La arena es cribada por la malla #4 para eliminar las gravas. Una vez cribada se pesan los materiales (cemento-cal-arena y pet) para llegar a la proporción deseada. Los materiales se incorporan en una charola humedecida para que esta no absorba agua de la mezcla, alterando así el contenido de agua en ella.

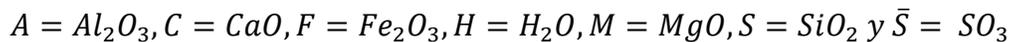
Se mezclan los materiales, con espátulas de acero inoxidable, en seco para homogeneizarlos y posteriormente agregar el agua requerida para obtener una buena trabajabilidad. Una vez agregada el agua los materiales se mezclan por un tiempo que varía de 1.5 a 3 min, ya que si se mezcla durante más tiempo se pierde el agua en por evaporación afectando así la relación agua/cemento.



Fig. 17 Elaboración de las mezclas

3.2.3.2 Compuestos químicos e hidratación del cemento

En la fabricación del clinker de cemento portland, durante la calcinación, el calcio combina con otros componentes de la mezcla cruda para formar cuatro compuestos principales que corresponden al 90% de la masa del cemento. Durante la molienda, se añade yeso (4% hasta 6%) u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliares de molienda. Los químicos del cemento usan las siguientes abreviaturas químicas para describir los compuestos:



Se usa el término “fase” preferiblemente al término compuesto para describirse los componentes del clinker. Siguen los cuatro compuestos principales en el cemento portland, sus formulas químicas aproximadas y abreviaturas:

SILICATO TRICÁLCICO	$3CaO \cdot SiO_2 = C_3S$
SILICATO DICÁLCICO	$2CaO \cdot SiO_2 = C_2S$
ALUMINATO TRICÁLCICO	$3CaO \cdot Al_2O_3 = C_3A$
FERROALUMINATO TETRACÁLCICO	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 = C_4AF$

Siguen las formas de sulfato de calcio, sus formulas químicas y abreviaturas:

SULFATO DE CALCIO ANHIDRO (ANHIDRITA)	$CaSO_4 = CaO \cdot SO_3 = \bar{C}\bar{S}$
SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO (YESO)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O = CaO \cdot SO_3 \cdot 2H_2O = \bar{C}\bar{S}H_2$
HEMIDRATO DE SULFATO DE CALCIO	$CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O = CaO \cdot SO_3 \cdot 1/2 H_2O = \bar{C}\bar{S}H_{1/2}$

El yeso, sulfato de calcio dihidratado, es la fuente de sulfato más empleada en el cemento. El C_3S y el C_2S en el clinker se conocen como alita y belita, respectivamente. La alita constituye del 50% al 70% del clinker, mientras que la belita es responsable por solo 15% al 30%. Los compuestos de aluminato constituyen aproximadamente del 5% al 10% del clinker y los compuestos de ferrita del 5% al 15%.

En presencia de agua, estos compuestos se hidratan (se combinan químicamente con el agua) para formar nuevos compuestos, los cuales son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto. En la Tabla 3-15 se muestran las reacciones de hidratación de los compuestos del cemento portland expresados en óxidos.

Tabla 23. Reacciones de Hidratación de los compuestos del Cemento Portland (Expresados en Óxidos)

$2(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ Silicato tricálcico	+ 11 H ₂ O agua	= $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ $3(\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O})$ Hidróxido de Calcio
$2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ Silicato dicálcico	+ 9 H ₂ O agua	= $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ Hidróxido de calcio
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminato tricálcico	$3(\text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ Yeso	+ 26 H ₂ O agua	= $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ Etringita
$2(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ Aluminato tricálcico	+ $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ Etringita	+ 4 H ₂ O agua	= $3(4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$ Monosulfoaluminato de calcio
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminato tricálcico	+ $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ Hidróxido de calcio	+ 12 H ₂ O agua	= $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ Aluminato tetracálcico hidratado
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ Ferroaluminato tetracálcico	+ 10 H ₂ O agua	+ $2(\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O})$ Hidróxido de calcio	= $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Ferroaluminato de calcio hidratado

El conocimiento actual de la química del cemento indica que los compuestos principales del cemento tienen las siguientes propiedades:

Silicato Tricálcico, C_3S , se hidrata y se endurece rápidamente y es responsable, en gran parte, por el inicio del fraguado y la resistencia temprana. En general, la resistencia temprana del concreto de cemento portland es mayor, cuando el porcentaje de C_3S aumenta.

Silicato Dicálcico, C_2S , se hidrata y se endurece lentamente y contribuye grandemente para el aumento de resistencia en edades más allá de una semana.

Aluminato Tricálcico, C_3A , libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye un poco para el

desarrollo de las resistencias tempranas. Los cementos con bajos porcentajes de C_3A resisten mejor a suelos y aguas con sulfatos.

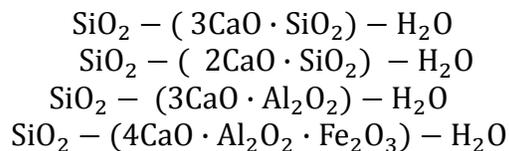
Ferroaluminato Tetracálcico, C_4AF , es el producto resultante del uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización (clinquerización o cocción) durante la fabricación del cemento.

Este producto contribuye muy poco para la resistencia.

La mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se deben al C_4AF y sus hidratos.

Sulfato de Calcio, como anhidrita (sulfato de calcio anhídrido), yeso (sulfato de calcio dihidratado) o hemidrato, comúnmente llamado de yeso de París (sulfato de calcio hemidrato), se adiciona al cemento durante la molienda final, ofreciendo sulfato para la reacción con el C_3A y la formación de etringita (trisulfoaluminato de calcio). Esto controla la hidratación del C_3A . Sin sulfato, el fraguado del cemento sería rápido. Además del control del fraguado y del desarrollo de resistencia, el sulfato también ayuda a controlar la contracción (retracción) por secado y puede influenciar la resistencia hasta 28 días.

El sistema químico arena – cemento portland – agua se puede esquematizar con la siguiente ecuación:



La reacción de hidratación en este sistema son muy complejas sin embargo los productos de estas reacciones son los anteriores [Kosmatha et al., 2004].

3.2.4 Diseño de Mezclas con PET

En el sistema a base de arena – cemento portland – agua – residuo, el residuo no tiene reacción con la pasta debido al recubrimiento.



Fig. 18 Incorporación del residuo a la mezcla

3.2.5 Procedimiento para elaboración de tabiques

Se elaboraron los tabiques por dos métodos el primero consistió en elaborarlos en una maquina de compresión y el segundo método fue por vaciado en un molde. A continuación se describen ambos métodos.

3.2.5.1 *Por compresión*

Se elaboraron con una maquina que está elaborada con placa de acero y consiste en una base rectangular con cinco lados fijos y una tapa superior movable, por donde se requiere introducir la mezcla. Además, cuenta con un brazo de palanca que proporciona la fuerza de compresión manual.

El procedimiento es muy sencillo, después de tener preparada la mezcla se ingresa al molde con medidas de 15.2 X 29 X 9 (ancho-largo-altura), se apisona con una punta de bala con 25 golpes en capas de 3 cm. posteriormente se coloca la tapa y se le aplica la fuerza de compresión. Por último se retira la tapa y el bloque está listo.



Fig. 19 Elaboración de tabiques por compresión

3.2.5.2 *Por vaciado*

Se elaboró un molde con placa de acero de 10 X 14 X 28 (altura-ancho-largo). El procedimiento consiste en agregar desmoldante al molde y posteriormente colocar la mezcla dentro del molde en capas de 3 cm. para compactar con una punta de bala. Además, al otro día se debe descimbrar el molde para obtener la pieza.



Fig. 20 Elaboración de tabiques por vaciado

3.2.6 Caracterización mecánica de tabiques

La caracterización mecánica de los tabiques consistió en realizar pruebas para verificar las propiedades mecánicas significativas de las piezas del tabique eco-eficiente; resistencia a compresión y módulo de ruptura, se procedió a aplicar los métodos de prueba correspondientes a la norma NMX-C-404-ONNCCE.

Para la fabricación de los especímenes de prueba se utilizó mortero ligero (cemento-cal-arenilla) como base aglutinante y se le agrego un residuo (PET), el bloque se diseño de forma rectangular; cuyas dimensiones usuales fueron 15.2 cm. de ancho, 7.6 cm. de alto, y 29 cm. de largo. Las propiedades mecánicas y físicas así como las características geométricas de las piezas, se verificaron de acuerdo con lo establecido en la norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE y sus normas complementarias.

Como ya se mencionó anteriormente, fue necesario aplicar pruebas de laboratorio a piezas de manera individual. En cada ensayo se tomaron 6 muestras de cada tipo de tabique y de sus diferentes presentaciones; consideramos que el valor característico de la prueba efectuada fue el promedio de los resultados.

3.2.6.1 Determinación del peso volumétrico

El peso volumétrico neto mínimo de las piezas, en estado seco, será el indicado en la tabla 3.

Tabla 24. Peso volumétrico neto mínimo de piezas, en estado seco. Según la NMX-C-404-ONNCCE.

Tipo de pieza	Valores en kN/m ³ (kg/m ³)
Tabique de barro recocido	13 (1300)
Tabique de barro con huecos verticales	17 (1700)
Bloque de concreto	17 (1700)
Tabique de concreto (tabicón)	15 (1500)

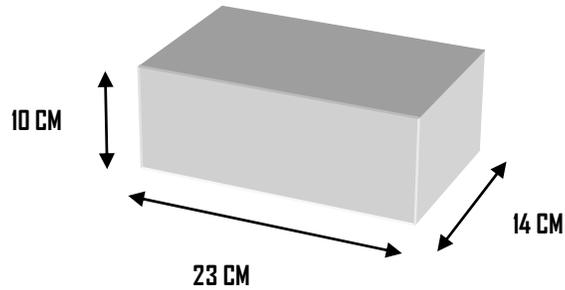


Fig. 21 Pieza de tabique blanco o tabicón.

$$\gamma = \frac{W_s}{V} \approx 1.6 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} \text{ a } 1.7 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$$

Donde;

γ = Peso Volumétrico

W_s = Peso Seco

V = Volumen

3.2.6.2 Resistencia a flexión o módulo de ruptura

Esta prueba se efectúa en especímenes enteros, los cuales son colocados sobre 2 apoyos fijos. Los apoyos tienen de claro el 70% de la longitud total del espécimen; se aplica la carga en el centro obteniéndose la carga de ruptura para posteriormente calcular el módulo de ruptura (la Norma NOM-000-SCFI-1994 exige un valor mínimo de 8 kg/cm²); según la fórmula:

$$M_r = M_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde;

P = Carga en kg.

L = Claro

b = Promedio de ancho

d = Altura



Fig. 22 Prueba de resistencia a la flexión.

3.2.6.3 Prueba de absorción, absorción inicial y coeficiente de saturación

Consideramos que la prueba de absorción inicial y el coeficiente de saturación de las piezas, son las propiedades más importantes de las unidades y tienen un efecto significativo sobre la reacción de los mampuestos a la hora de su colocación y por ende en las características de la mampostería.

La capacidad de la unidad para absorber agua se mide por dos parámetros: la absorción total y la tasa inicial de absorción (Initial Rate Absorption, IRA). El primer parámetro representa la cantidad de agua requerida para saturar la unidad de mampostería, mientras que la IRA, o succión, es la masa de agua absorbida por unidad de área y tiempo.

3.2.6.4 Absorción en 24 horas

La prueba de absorción consiste en determinar la cantidad de agua absorbida por el espécimen en 24 hrs. Del peso de la inmersión total de la pieza, según se especifica en la norma NOM-000-SCFI-1994, restando el peso inicial seco, se obtiene el

peso del agua absorbida cuyo porcentaje se da en función del peso seco; limitado entre el 9% y el 20%.

$$\text{absorción} = \frac{W_{24h} - W_s}{W_s} \times 100 \geq 9\% \leq 20\%$$

Donde;

W_{24h} = Peso de agua absorbida después de 24 horas de inmersión en agua fría

W_s = Peso Seco de la Pieza



Fig. 23 Determinación de pesos después de 24 horas de inmersión.

3.2.6.5 Coeficiente de saturación

Con este ensayo se puede conocer el coeficiente de saturación de una pieza de mampostería, propiedad con la cual se observa si la pieza puede formar una buena unión con el mortero.

$$CS = \frac{C}{B} = \frac{W_{24h} - W_s}{W_{5h} - W_s} \leq 1.0$$

Donde;

CS = Coeficiente de saturación

C = Peso de agua absorbida después de 24 horas de inmersión en agua fría

B = Peso de Agua Absorbida después de 5 horas de inmersión en agua hirviendo.

3.2.6.6 Tasa inicial de absorción

El intercambio de agua determina en gran parte la adherencia mortero, parámetro fundamental en la resistencia final de la mampostería, especialmente en tensión y cortante.

$$Ta = \frac{(P_s - P_h)}{A} \times (193.5 \frac{cm^2}{min})$$

Donde;

Ta = Tasa de absorción inicial corregida con base en 193.5 cm² (gr/min).

P_s = Peso seco de la muestra (gr).

P_h = Peso humedecido después de la inmersión (gr).

A = Área de la carga del ladrillo que va a quedar en contacto con el agua.



Fig. 24 Prueba de absorción inicial.

3.2.6.7 Prueba de resistencia a la compresión.

Uno de los parámetros más importantes de una pieza desde el punto de vista estructural es su resistencia a compresión, determinada mediante el ensaye directo a compresión de la pieza entera o de la mitad de ella. La resistencia a compresión así determinada no es un parámetro uniforme de calidad, ya que los resultados obtenidos en piezas de materiales o geometrías distintos no son comparables y no se relacionan

en la misma forma con la resistencia que puedan tener las piezas en un elemento estructural.

Por lo anterior, los resultados del ensaye de compresión son estrictamente comparables solo para piezas del mismo tipo, y la relación entre la resistencia a la compresión de la pieza y el comportamiento estructural del muro puede ser distinto para materiales diferentes (la Norma NOM-000-SCFI-1994 exige un valor mínimo de 100 Kg/cm²).

- 1) Las piezas o unidades fueron cabeceadas con ligeras capas de arena en ambos lados para eliminar así las imperfecciones de las superficies.
- 2) La carga fue aplicada sobre medios tabiques y en la dimensión menor promedio.
- 3) La carga aplicada fue de 200 kg/seg aproximadamente e interrumpida cuando se observaban agrietamientos.

$$RC = \frac{P}{A}$$

RC = Resistencia a la compresión (Kg/cm²)

P = Carga máxima antes de la falla

A= Área Transversal (cm²)



Fig. 25 Prueba de resistencia a la compresión.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de la investigación de las propiedades mecánicas de tabiques de concreto ligero con residuos de PET. El objetivo principal del estudio es definir las proporciones idóneas de mortero ligero y residuo de PET para obtener buenas propiedades mecánicas. Se diseñaron 3 tipos de mezclas de mortero combinando agregado ligero (arenilla con granos finos y gruesos) con 3 diferentes proporcionamientos de cemento Portland y cal, y la cantidad de agua adicionada a la mezcla se obtuvo en base de la prueba de fluidez del mortero hasta obtener una mezcla semi-húmeda. Para fines de este proyecto se consideró incorporar las fibras o tiras de residuo de PET a la mezcla en una proporción volumétrica del 3% del volumen total del tabique, esto para observar el efecto de la fibra sobre las propiedades mecánicas del tabique. Los tabiques o unidades de mampostería se obtuvieron en base de la mezcla semi-húmeda por medio de un proceso de compactación en una máquina de compresión manual CINVA-RAM. También se elaboraron tabiques por medio de vaciado en una gaveta de producción de 28 tabiques. Posteriormente se obtuvieron la resistencia a compresión y el módulo a la ruptura a 7 y a 28 días de curado en base a métodos de prueba estandarizados con el fin de validar la calidad de los especímenes. Los resultados obtenidos muestran que la adición del residuo de PET mejora las características mecánicas de los tabiques, observándose una mejoría en el módulo a la ruptura de los tabiques (resistencia bajo cargas de flexión).

4.1 Granulometría de la arenilla

Se caracterizó el agregado ligero para conocer sus propiedades físicas para el diseño de las mezclas que se utilizaron. Los procedimientos para la caracterización física y granulométrica de los agregados se basaron en los procedimientos establecidos en las normas ASTM-C125, ASTM C 331, ASTM C 404.

Tabla 25. Granulometría del material seleccionado

Malla no. (In/mm)	Retenido (g)	Retenido (%)	Material que pasa (%)
3"(76.2)		0.00	100.00
2" (50.8)		0.00	100.00
1 ½"(36.10)	0.00	0.00	100.00
1" (25.4)	0.00	0.00	100.00
¾"(19.1)	8.20	1.48	98.52
½" (12.7)	42.10	7.60	90.92
3/8" (9.52)	82.90	14.97	75.95
No. 4 (4.76)	140.80	25.42	50.53
8 (2.38)	76.10	13.74	36.79
16 (1.19)	66.90	12.08	24.72
30 (0.5)	55.20	9.97	14.75
50 (0.298)	39.00	7.04	7.71
100 (0.149)	20.10	3.63	4.08
200 (0.074)	10.40	1.88	2.20
	553.90	97.80	

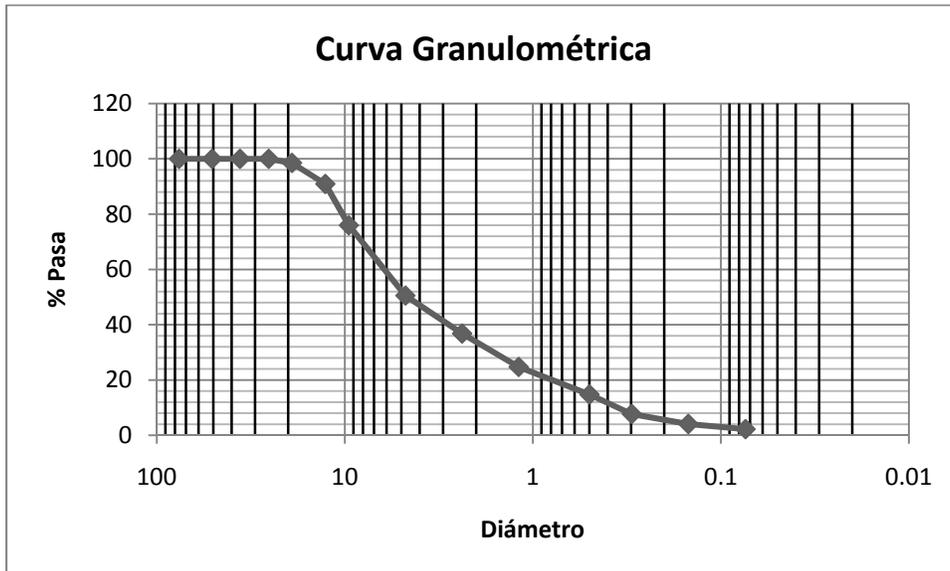


Fig. 26. Curva de Granulometría

4.2 Resultado de la prueba de tensión a la fibra de PET

Las fibras de PET en forma de listón se obtuvieron a partir de seccionar envases de refresco recolectados en la vía pública. A partir de las tiras largas obtenidas previamente, se obtuvieron en tiras de 3 mm. de ancho y 80 mm. de largo. La resistencia a la tensión de estas tiras se obtuvo en base de un ensaye de tensión en una maquina universal. Tal característica mecánica se calculo al dividir la carga máxima entre el área transversal de cada espécimen, y resultado ser de 32.66 Mpa.

4.3 Resultados de las pruebas mecánicas y físicas de los tabiques.

A continuación se presenta la Nomenclatura para las distintas pruebas realizadas, En la tabla 26 se puede determinar que la letra V representa por vaciado y la letra C por compresión. Identificamos a TSP como tabique sin pet y TCP como tabique con pet, el número consecutivo es el tipo de mezcla y los números finales representan el número de días de curado.

Tabla 26. Nomenclatura de los tipos de pruebas

NOMENCLATURA	
C-TSP-1-28d	Tabique de Mezcla 1 sin pet compactados a 28 días.
C-TSP-2-28d	Tabique de Mezcla 2 sin pet compactados a 28 días.
C-TSP-3-28d	Tabique de Mezcla 3 sin pet compactados a 28 días.
V-TSP-1-7d	Tabique de Mezcla 1 sin pet por vaciado a 7 días.
V-TSP-2-7d	Tabique de Mezcla 2 sin pet por vaciado a 7 días.
V-TSP-3-7d	Tabique de Mezcla 3 sin pet por vaciado a 7 días.
V-TSP-1-28d	Tabique de Mezcla 1 sin pet por vaciado a 28 días.
V-TSP-2-28d	Tabique de Mezcla 2 sin pet por vaciado a 28 días.
V-TSP-3-28d	Tabique de Mezcla 3 sin pet por vaciado a 28 días.
C-TCP-1-28d	Tabique de Mezcla 1 con pet compactados a 28 días.
C-TCP-2-28d	Tabique de Mezcla 2 con pet compactados a 28 días.
C-TCP-3-28d	Tabique de Mezcla 3 con pet compactados a 28 días.
V-TCP-1-7d	Tabique de Mezcla 1 con pet por vaciado a 7 días de fibra delgada
V-TCP-2-7d	Tabique de Mezcla 2 con pet por vaciado a 7 días de fibra delgada
V-TCP-3-7d	Tabique de Mezcla 3 con pet por vaciado a 7 días de fibra delgada

V-TCP-1-28d	Tabique de Mezcla 1 con pet por vaciado a 28 días de fibra delgada
V-TCP-2-28d	Tabique de Mezcla 2 con pet por vaciado a 28 días de fibra delgada
V-TCP-3-28d	Tabique de Mezcla 3 con pet por vaciado a 28 días de fibra delgada
V-TCPG-1-7d	Tabique de Mezcla 1 con pet por vaciado a 7 días de fibra de 3mm x 3 cm.
V-TCPG-2-7d	Tabique de Mezcla 2 con pet por vaciado a 7 días de fibra de 3mm x 3 cm.
V-TCPG-3-7d	Tabique de Mezcla 3 con pet por vaciado a 7 días de fibra de 3mm x 3 cm.
V-TCPG-1-28d	Tabique de Mezcla 1 con pet por vaciado a 28 días de fibra de 3mm x 3 cm.
V-TCPG-2-28d	Tabique de Mezcla 2 con pet por vaciado a 28 días de fibra de 3mm x 3 cm.
V-TCPG-3-28d	Tabique de Mezcla 3 con pet por vaciado a 28 días de fibra de 3mm x 3 cm.

En la Figura 27. se muestra el tabique de concreto ya compactado, se observa que el proceso de compactación y la mezcla obtenida es correcta, debido a que el tabique no se disgregó y no presenta oquedades.



Fig. 27. Tabiques de concreto comprimido

En las tablas 27 y 29 se presentan los promedios y las desviaciones estándar de los ensayos de propiedades mecánicas (esfuerzo a la flexión, esfuerzo a compresión a la primera grieta y el esfuerzo a compresión último) y físicas (absorción inicial y absorción a 24 hrs.). Se presenta el promedio de 10 ensayos de tabiques, así como su desviación estándar de cada prueba. En las tablas 28 y 30 se presentan las resistencias de diseño de los bloques: su resistencia a la flexión, su resistencia a la compresión a la primera grieta (condiciones de servicio) y su resistencia a la compresión última (condición de diseño al límite).

Tabla 27. Resultados de ensayos de propiedades mecánicas y físicas de los bloques sin pet

TIPO	Esfuerzo a flexión, MOR (Kg/cm ²)		Esfuerzo a compresión 1ra grieta (Kg/cm ²)		Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)		Absorción Inicial (%)		Absorción a 24 hrs (%)	
	Promedio	D. Estandar	Promedio	D. Estandar	Promedio	D. Estandar	Promedio	D. Estandar	Promedio	D. Estandar
	Esfuerzo a Flexión (kg/cm ²)	Esfuerzo a Flexión (kg/cm ²)	Esfuerzo a la grieta Compresión (Kg/cm ²)	Esfuerzo a la grieta Compresión (Kg/cm ²)	Esfuerzo de Compresión (kg/cm ²)	Esfuerzo de Compresión (kg/cm ²)	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
C-TSP-1-28d	11.03	2.39	29.06	9.23	38.94	11.38	9.82	3.79	34.27	1.8
C-TSP-2-28d	6.7	0.92	12.8	4.7	18.67	3.61	12.62	4.32	41.45	2.19
C-TSP-3-28d	8.28	2.22	20.44	11.52	31.64	9.56	13.47	5.7	46.05	2.79
V-TSP-1-7d	8.47	2.05	20.44	3.69	73.96	8.57	2.69	0.54	24.49	1.19
V-TSP-2-7d	4.82	0.49	6.84	1.95	25.88	5.67	1.36	0.22	27.49	1.25
V-TSP-3-7d	2.11	0.41	2.10	0.34	17.39	2.43	4.87	1.10	27.74	1.06
V-TSP-1-28d	17.34	2.93	38.41	5.95	126.76	22.46	3.43	1.11	25.98	1.72
V-TSP-2-28d	12.47	2.31	33.59	2.27	89.84	10.73	2.49	1.14	28.17	0.31
V-TSP-3-28d	7.68	0.57	16.77	1.69	47.88	11.65	5.26	2.24	29.37	1.52

Tabla 28. Tabla de resistencias de diseño de los bloques sin PET

TIPO	Resistencia a la flexión, MOR (Kg/cm ²)		Resistencia a compresión a la 1ra grieta (Kg/cm ²)		Resistencia a compresión última (Kg/cm ²)	
	coeficiente de variación (σ_v)	Resistencias de diseño (fm*)	coeficiente de variación (σ_v)	Resistencia de diseño (fa*)	coeficiente de variación (σ_v)	Resistencia de diseño (fk*)
C-TSP-1-28d	0.22	7.15	0.32	16.20	0.29	22.50
C-TSP-2-28d	0.15	4.87	0.37	6.67	0.19	12.59
C-TSP-3-28d	0.27	4.96	0.56	8.48	0.30	18.02
V-TSP-1-7d	0.24	5.28	0.18	14.08	0.15	53.79
V-TSP-2-7d	0.15	3.51	0.29	3.99	0.22	16.73
V-TSP-3-7d	0.19	1.42	0.16	1.50	0.15	12.65
V-TSP-1-28d	0.17	12.19	0.15	27.69	0.18	87.85
V-TSP-2-28d	0.19	8.53	0.15	24.43	0.15	65.34
V-TSP-3-28d	0.15	5.59	0.15	12.20	0.24	29.77

Comparación de resultados de muestras sin PET

De la Tabla 27 se puede observar que el módulo a la ruptura para la mezcla C-TSP-1-28d (11.03 Kg/cm²) tiene una ganancia del 65% comparada con la mezcla C-TSP-2-28d (6.7 Kg/cm²). En contraste, al comparar la resistencia de diseño a flexión de ambas mezclas (Tabla 28), se puede observar que la mezcla C-TSP-2-28d es solamente el 46.8% menor, debido a que la desviación estándar es menor (0.92 kg/cm²) que la correspondiente a la mezcla C-TSP-1-28d (2.39 kg/cm²).

En relación a los tabiques elaborados por vaciado y curados a 7 días, se puede apreciar que tanto para el módulo a la ruptura como para la resistencia de diseño a flexión, los especímenes V-TSP-1-7d tienen un valor 2 veces mayor que para la mezcla V-TSP-2-7d y aproximadamente 4 veces mayor que el V-TSP-3-7d.

Con respecto al módulo de la ruptura de la mezcla V-TSP-1-28d (17.34 kg/cm²), se tiene que es un 39% mayor que la mezcla V-TSP-2-28d (12.43 kg/cm²). Además de que si la comparamos con la mezcla V-TSP-3-28d es dos veces superior. En tanto para la resistencia de diseño a la flexión, la mezcla V-TSP-1-28d es superior respecto a las mezclas V-TSP-2-28d y la V-TSP-3-28d, por un 42% para la primera y dos veces mayor que la última. Con lo que podemos afirmar que los tabiques elaborados por medio del procedimiento de vaciado no presentan una desviación estándar alta, que pueda alterar el patrón entre el modulo de ruptura y la resistencia de diseño a la flexión.

Se puede apreciar que tanto para el módulo a la ruptura como para la resistencia de diseño a flexión el tabique más beneficiado es el de la muestra V-TSP-1-28d con 17.34 kg/cm². Además se presentan los máximos esfuerzos a compresión para resistencias de servicio y estados límite de falla.

La mezcla V-TSP-3-7d es la que resulto menos beneficiada respecto a la resistencia a compresión (12.65 kg/cm²) y resistencia a la flexión (1.42 kg/cm²). En esta

mezcla se pudo observar que el material era muy poroso lo que lo hacía tener un porcentaje de absorción inicial de 4.87% y una absorción a 24 hrs. de 27.74 %, las más altas para tabiques elaborados por el método de vaciado.

Referenciado a la Norma NMX-C-404-0NNCCE-2005 nos solicita una resistencia nominal mínima a compresión de 60 kg/cm². Por lo tanto las pruebas que cumplirían con esta disposición son la: V-TSP-1-28d y V-TSP-2-28d, con resistencias de 87.85 kg/cm² y 65.34 kg/cm², respectivamente.

Tabla 29. Resultados de ensayos de propiedades mecánicas y físicas de los bloques con pet

TIPO	Esfuerzo a flexión, MOR (Kg/cm2)		Esfuerzo a compresión 1ra grieta (Kg/cm2)		Esfuerzo a compresión (Kg/cm2)		Absorción Inicial (%)		Absorción a 24 hrs (%)	
	Promedio	D. Estandar	Promedio	D. Estandar	Promedio	D. Estandar	Promedio	D. Estandar	Promedio	D. Estandar
	Esfuerzo a Flexión (kg/cm2)	Esfuerzo a Flexión (kg/cm2)	Esfuerzo a la grieta Compresión (Kg/cm2)	Esfuerzo a la grieta Compresión (Kg/cm2)	Esfuerzo de Compresión (kg/cm2)	Esfuerzo de Compresión (kg/cm2)	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
C-TCP-1-28d	12.79	5.33	31.1	10.68	36.98	10.92	14.51	3.69	38.45	2.85
C-TCP-2-28d	16.07	3.28	25.06	7.73	36.83	4.42	20.01	10.04	44.8	5.34
C-TCP-3-28d	9.45	2.32	16.8	5.73	24.5	8.98	15.59	6.76	43.16	2
V-TCP-1-7d	13.84	0.53	30.85	3.22	109.65	4.93	2.95	0.20	23.89	1.60
V-TCP-2-7d	5.10	0.24	8.26	0.64	24.47	3.97	1.44	0.20	26.04	1.07
V-TCP-3-7d	2.80	0.15	4.59	0.48	17.41	1.32	2.37	0.44	23.51	0.55
V-TCP-1-28d	22.34	0.81	42.50	3.62	136.88	10.54	2.15	0.46	25.66	1.65
V-TCP-2-28d	16.75	1.20	38.04	2.30	95.24	8.35	2.05	0.22	26.01	2.23
V-TCP-3-28d	10.19	0.34	13.97	1.54	43.61	3.16	7.08	1.39	27.48	4.32
V-TCPG-1-7d	10.88	0.36	27.11	2.16	93.67	4.08	3.15	0.20	24.01	1.60
V-TCPG-2-7d	3.19	0.34	8.64	0.54	23.15	1.46	1.64	0.20	26.16	1.07
V-TCPG-3-7d	1.95	0.08	4.95	0.75	16.18	0.65	2.57	0.44	23.63	1.60
V-TCPG-1-28d	18.98	0.48	36.75	4.22	115.69	8.09	2.35	0.46	25.78	1.65
V-TCPG-2-28d	12.60	0.76	35.84	1.78	83.79	14.52	2.24	0.22	26.14	2.24
V-TCPG-3-28d	5.97	0.23	11.85	0.31	37.78	3.43	7.28	1.40	27.61	4.32

Tabla 30. Tabla de resistencias de diseño de los bloques con PET

TIPO	Resistencia a la flexión, MOR (Kg/cm ²)		Resistencia a compresión a la 1ra grieta (Kg/cm ²)		Resistencia a compresión última (Kg/cm ²)	
	coeficiente de variación (σ_v)	Resistencias de diseño (fm*)	coeficiente de variación (σ_v)	TIPO	coeficiente de variación (σ_v)	Resistencias de diseño (fm*)
C-TCP-1-28d	0.42	6.26	0.34	16.73	0.30	21.27
C-TCP-2-28d	0.20	10.64	0.31	14.15	0.15	26.79
C-TCP-3-28d	0.25	5.86	0.34	9.07	0.37	12.78
V-TCP-1-7d	0.15	10.07	0.15	22.44	0.15	79.74
V-TCP-2-7d	0.15	3.71	0.08	6.92	0.16	17.41
V-TCP-3-7d	0.15	2.04	0.11	3.63	0.15	12.67
V-TCP-1-28d	0.15	16.25	0.09	35.04	0.15	99.55
V-TCP-2-28d	0.15	12.18	0.06	33.04	0.15	69.27
V-TCP-3-28d	0.15	7.41	0.11	10.95	0.15	31.71
V-TCPG-1-7d	0.15	7.92	0.08	22.61	0.15	68.13
V-TCPG-2-7d	0.15	2.32	0.06	7.46	0.15	16.84
V-TCPG-3-7d	0.15	1.42	0.15	3.59	0.15	11.76
V-TCPG-1-28d	0.15	13.80	0.15	26.73	0.15	84.14
V-TCPG-2-28d	0.15	9.16	0.15	26.07	0.17	58.46
V-TCPG-3-28d	0.15	4.34	0.15	8.62	0.15	27.48

Comparación de resultados de muestras con y sin PET

Compararemos a continuación el esfuerzo de flexión, la compresión simple y la compresión a la primera grieta de diseño, de los tabiques elaborados con los distintos tipos de mezclas.

Para los tabiques comprimidos a 28 días tiene relevancia el hecho de que la mezcla C-TCP-1-28d presenta una disminución en su resistencia a la flexión de 12% comparada con su prueba base C-TSP-1-28d. La mezcla más beneficiada respecto al modulo a la flexión es la mezcla C-TCP-2-28d con el doble de resistencia comparada con su prueba base la C-TSP-2-28d. Respecto a la resistencia a compresión a la primera grieta, así como a la resistencia a la compresión última, se tiene que la prueba C-TCP-2-28d tiene un esfuerzo dos veces mayor que su prueba base la C-TSP-2-28d. Por lo tanto se ve que el uso de fibras mejora las propiedades mecánicas en tabiques comprimidos, aunque se pudo observar que no tienen la dispersión deseada y genera

que en los ensayos haya una desviación estándar grande y su resistencia de diseño se ve disminuida en algunos casos.

Para los tabiques por vaciado a 7 días la mezcla V-TCP-1-7d presenta un aumento en su resistencia a la flexión del 90% comparada con su prueba base V-TSP-1-7d. También resulta ser la mejor para el esfuerzo a compresión última con 48%. Respecto a la resistencia a compresión a la primera grieta, es la V-TCP-3-7d con respecto a su prueba base la V-TSP-3-7d es 2.5 veces mayor.

Se presenta la mayor resistencia de diseño de flexión en la mezcla V-TCP-1-28d con 27.34 kg/cm^2 , que es un 22.38% mayor que su prueba base la V-TSP-1-28d con 17.34 kg/cm^2 .

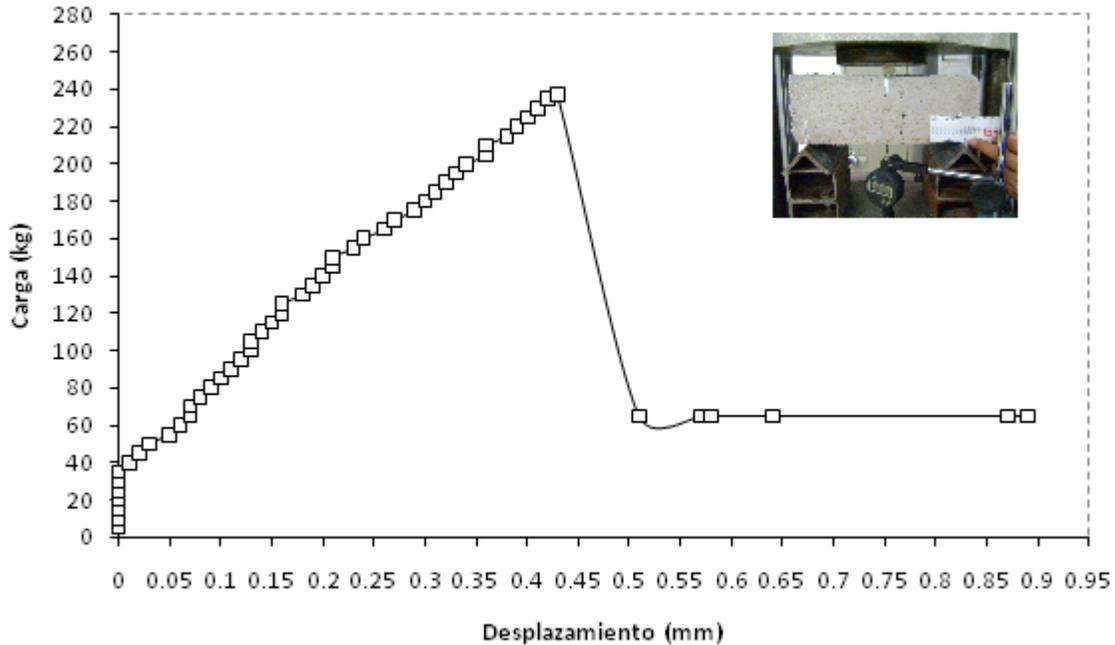
El curado por 28 días es una variable importante en los tabiques ya que se puede observar que los tabiques que son curados a 7 días presentan en un 100 % o más, un menor modulo de ruptura.

El tamaño de la fibra nos permite verificar que entre más pequeña sea la fibra, tiene mayor dispersión, por lo tanto ayuda a el módulo de ruptura entre un 15-50%, por ejemplo V-TCP-5 (5.10 kg/cm^2) contra el V-TCP-11 (3.19 kg/cm^2), es de un 37.45%. En todos los casos es mayor el módulo de ruptura de los tabiques enriquecidos con pet, comparado con su prueba base.

La propiedad del esfuerzo a compresión se ve beneficiada en menor porcentaje, que el módulo a la ruptura, ya que la resistencia de un concreto o un mortero, se debe principalmente a la relación a/c, y no a un refuerzo (fibra), muchas veces se confunde que el agregado te proporciona mayor resistencia, sin embargo a través de las investigaciones se ha demostrado que el agregado es material de relleno, para hacer más económico un concreto.

Resultado de Prueba de Modulo de Ruptura (Flexión Inducida)

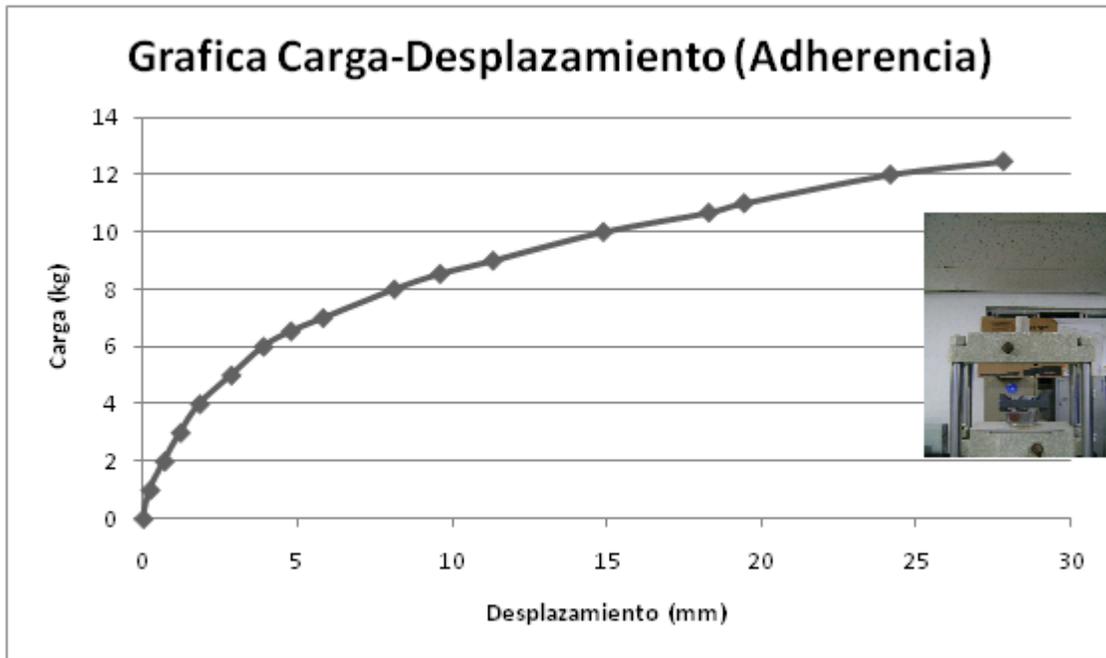
Fig. 28 Grafica carga – deflexión (prueba a flexión)



En la Fig. 28 se aprecia que el material fue sometido a cargas, se aprecia que al aplicar una carga de 38 kg, se comienza a originar la primera grieta de aproximadamente 1 mm, posteriormente el material pasa a un estado de sedencia del material, donde sigue incrementado el ancho de grieta, pero sin llegar a la falla del material. Posteriormente se puede observar como el material tiene una caída cuando llega a una carga de 240 kg/cm², sin embargo el material se recupera y continúa trabajando para una carga de 60 kg/cm². Debemos de tener en cuenta que esta es una prueba donde la tensión la inducimos indirectamente a las fibras, por lo tanto es difícil relacionarlo con la prueba de adherencia ya que en esta se está aplicando tensión directa, sobre la fibra.

Resultado de Prueba de Adherencia (Flexión Pura)

Fig. 29 Grafica carga – deflexión (prueba de adherencia- tensión)



El objetivo de esta prueba es el observar que cuando al material plástico le inducimos una carga de tensión para separarlo del concreto se tienen fuerzas mecánicas que no permiten la separación de estos materiales, aunado que se presentan fuerzas friccionantes entre los materiales, teniendo en cuenta que el plástico no es un material rugoso, sin embargo tiene una propiedad elástica que le permite elongarse, permitiendo que el material cerámico no falle donde se presentan los esfuerzos principales.

5. Conclusión

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que la incorporación de tiras mejora las propiedades mecánicas de los tabiques de concreto ligero, la propiedad más beneficiada es el modulo a la ruptura o esfuerzo a la flexión.

Se puede observar que la mezcla más beneficiada es la V-TCP-1-28d, y con esto se puede concluir que el periodo de curado a 28 días es una variable a considerar y por lo tanto es necesario llevar a cabo un buen curado. También se puede observar que el tamaño de fibra es una variable a considerar ya que dependiendo del tamaño de la fibra existe un mejor acomodo en la unidad de mampostería y una mejor distribución, por lo tanto logra incrementar la resistencia a flexión y compresión considerablemente.

Es relevante resaltar que la mezcla V-TCP-1-28d, es la que presenta mejor resistencia a la compresión para condiciones de servicio (esfuerzo de compresión a al primer grieta) y para estados limites de servicio (esfuerzo de compresión último).

Estos resultados son prometedores debido a que podemos obtener materiales ecológico-eficientes que reúnen a la vez los requerimientos de diseño para elementos estructurales para muros de mampostería con tabiques. Esto con el beneficio adicional que se debe de tener actualmente en cuidar el medio ambiente.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] González W. – Mancini H., 2003. Ciencia de los Materiales, Ariel Ciencia y Tecnología. España, Barcelona.
- [2] Fundación ICA., 2003. Edificaciones de mampostería para vivienda, ISBN-968 5520 00-3. México, D.F.
- [3] ElGawady, M., Lestuzzi, P., and Badoux, M., 2004, A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM. Proc., 13th Int. Brick and Block Masonry Conf. Netherlands, Amsterdam. Paper No. 89.
- [4] INEGI, XV Censo Industrial., 2000. Censos Económicos 1999; Industrias Manufactureras: Producción de Alimentos, Bebidas y Tabaco. Subsector 31. México, D.F.
- [5] Hodge J.C. and M. Thorpe (2006). “Brickwork for Apprentices”, Fifth edition, Published by Elsevier Ltd., ISBN–13: 978-0-7506-6752-4, ISBN–10: 0-7506-6752-4.
- [6] Kiliç, A., Atis_, C.D., Yas_ar, E., Özcan, F., 2003. High strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. Cement and Concrete Research 33 (10), 1595–1599.
- [7] Topcu, I.B., Uygunoglu, T., 2007. Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete. Building and Environment 42 (12), 4108–4116.
- [8] Babu, D.S., Babu, G.K., Wee, T.H., 2005. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. Cement and Concrete Research 35, 1218–1223.
- [9] Yasar, E., Atis, C.D., Kilic, A., Gulsen, H., 2003. Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. Materials Letters 57, 2267–2270.
- [10] Demirboga, R., Gul, R., 2003. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. Cement and Concrete Research 33, 723–727.
- [11] Malloy, R., Desai, N., Wilson, C., Swan, C., Jansen, D., Kashi, M., 2001. High carbon fly ash/mixed thermoplastic aggregate for use in lightweight concrete. In: Society of Plastics Engineering, Annual Technical Conference, Dallas, TX, vol. 47, 2743–2751.
- [12] Topcu, I.B., 2006. Concrete Technology. Ugur Press, Eskisehir, Turkey (in Turkish).

- [13] Pagev, 2008. Turkey Plastic Industry. Plastic consumption in Turkey and in the world. <<http://www.pagev.org.tr>> (in Turkish).
- [14] Silva, D.A., Betioli, A.M., Gleize, P.J.P., Roman, H.R., Gomez, L.A., Ribeiro, J.L.D., 2005. Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research* 35, 1741–1746.
- [15] Ochi, T., Okubo, S., Fukui, K., 2007. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites* 29, 448–455.
- [16] Roberto Meli., 2003, “Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos”, Fundación ICA, 1ra edición, México DF.
- [17] Vasconcelos, G, Laurenco P.B., 2009, Experimental characterization of stone masonry in shear and compression, Págs. 1-9.
- [18] Christine Beall and Rochelle Jaffe, 2003, “Concrete and Masonry Databook”, McGraw-Hill books, ISBN 0-07-136154-5.
- NTCM-2004, “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre (2004).
- NMX-C-404-ONNCCE, Industria de la construcción-bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural-especificaciones y métodos de prueba, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, pág. 9.
- NMX-C-036, Industria de la construcción–bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines–resistencia a la compresión–método de prueba.
- NMX-C-061-ONNCCE, Industria de la construcción–cementos–determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos.
- ONNCCE (2002), “Anteproyecto de Norma Mexicana para la determinación de la resistencia a compresión diagonal y de la rigidez a cortante de muretes de mampostería de barro y de concreto”, Organismo Nacional
- ASTM E 519, “Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages”.
- ASTM C 331, “Standard specification for lightweight aggregate for concrete masonry units”.

ASTM C 404, "Standard specification for aggregate for masonry grout".

ASTM C 67, "Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile".

ASTM C 140, "Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units".

ASTM C 1437, "Standard test method for flow of hydraulic cement mortar".

ASTM C 109, "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)".

ASTM C 642-97, "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".

ASTM C270, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry.

ANEXOS

	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Long. (cm)	Long. % apoyos (cm)	Area transv. Compresión (cm2)	Carga max. Flexión (kg)	Carga1a grieta Compresión (Kg)	Carga máx Compresión (kg)	Esfuerzo a flexión, MOR (Kg/cm2)	Esfuerzo a compresión 1ra grieta (Kg/cm2)	Esfuerzo a compresión (Kg/cm2)	Peso seco (kg)	Peso absorción inicial (kg)	% de agua abs. Inicial	Peso absorción 24 hrs (kg)	% de agua 24 hrs
P-I-1	7.7	15.2	29	24	223.44	193.58	4020	5957	7.73282084	17.9914071	26.660401	1.8794	2.2503	19.73502	2.6836	42.790252
P-I-2	7.9	15.2	29	24	215.73	191.26	5120	5216.8	7.25819918	23.7333704	24.1820795	1.8864	2.1392	13.40119	2.579	36.715437
P-I-3	7.6	15.2	29	24	228	309.89	7100	9439	12.7068906	31.1403509	41.3991228	1.7472	2.0408	16.80403	2.4441	39.886676
P-I-4	7.6	15.2	29	24	240.24	454.98	10700	11726	18.6562363	44.5387945	48.8095238	1.7043	1.8983	11.38297	2.3163	35.909171
P-I-5	8	15.2	29	24	220.4	475	8400	9667.8	17.578125	38.1125227	43.8647913	1.7008	1.8915	11.21237	2.3296	36.970837
P-II-1	7.8	15.2	29	24	235.6	159.61	4200	5576	6.21340704	17.8268251	23.6672326	1.6484	1.8451	11.93278	2.3293	41.306722
P-II-2	7.9	15.2	29	24	217.36	194.98	2427	3638	7.39937088	11.1658079	16.7372102	1.6625	1.9895	19.66917	2.4087	44.884211
P-II-3	7.6	15.2	29	24	218.88	176.13	1300	3150	7.22212604	5.93932749	14.3914474	1.759	1.9499	10.85276	2.4942	41.796475
P-II-4	7.9	15.2	29	24	214.06	139.85	2700	3804.2	5.30722135	12.613286	17.7716528	1.823	2.0541	12.67691	2.5558	40.197477
P-II-5	7.6	15.2	29	24	202.16	179.31	3324	4196.4	7.35252041	16.4424218	20.7578156	2.0028	2.1628	7.988816	2.7853	39.070302
P-III-1	7.8	15.2	29	24	238.64	302.87	4553	8575.4	11.7903301	19.0789474	35.934462	1.5398	1.6815	9.202494	2.1728	41.109235
P-III-2	7.7	15.2	29	24	235.6	195.45	3700	4586	7.80752057	15.704584	19.4651952	1.449	1.6045	10.73154	2.0547	41.801242
P-III-3	7.7	15.2	29	24	238.64	287.32	5500	7772	11.4773948	23.0472679	32.5678847	1.7484	1.9448	11.23313	2.4719	41.380691
P-III-4	7.7	15.2	29	24	202.16	235.72	4550	5680	9.41616142	22.5069252	28.0965572	1.8172	2.0765	14.26921	2.6173	44.029276
P-III-5	7.9	15.2	29	24	197.6	274.88	2015	2734.6	10.4315267	10.1973684	13.8390688	0.9622	1.1906	23.73727	1.4041	45.926003
P-III-6	8	15.2	29	24	223.44	155.4	2300	3815.4	5.75082237	10.2935911	17.075725	1.5505	1.9282	24.35988	2.2438	44.714608
S-I-1	7.9	15.2	29	24	184.93	259.63	4256	6331.2	9.85279856	23.0141134	34.2356567	1.9921	2.2387	12.3789	2.6822	34.641835
S-I-2	7.7	15.2	29	24	212.2	359.53	6525	10520.6	14.3619231	30.7492931	49.5786993	2.393	2.5602	6.987046	3.1929	33.426661
S-I-3	7.8	15.2	29	24	223.44	208.22	4300	5676.4	8.1057303	19.2445399	25.4045829	1.7961	2.0389	13.51818	2.4423	35.977952
S-I-4	7.6	15.2	29	24	214.32	299.7	6200	7183.6	12.2890545	28.9287047	33.5181038	1.9418	2.1653	11.50994	2.6351	35.703986
S-I-5	8	15.2	29	24	205.2	285.5	8900	10666	10.5653783	43.3723197	51.9785575	2.0827	2.1802	4.681423	2.7406	31.588803
S-II-1	7.7	15.2	29	24	243.2	387.96	8130	10368	15.4975988	33.4292763	42.6315789	1.4387	1.9217	33.57197	2.1971	52.714256
S-II-2	7.7	15.2	29	24	205.2	274.88	3700	5996.2	10.9804618	18.0311891	29.2212476	2.0243	2.2768	12.47345	2.8264	39.623574
S-II-3	7.6	15.2	29	24	228	391.43	8103	8114.8	16.0503991	35.5394737	35.5912281	1.6834	2.1944	30.35523	2.5262	50.065344
S-II-4	7.5	15.2	29	24	215.84	505.61	4170	7983.8	21.2888421	19.3198666	36.9894366	1.838	1.9957	8.579978	2.5866	40.729053
S-II-5	7.8	15.2	29	24	220.4	423.94	4192	8314.2	16.5034257	19.0199637	37.7232305	1.7436	2.0035	14.90594	2.4769	42.056664
S-II-6	7.7	15.2	29	24	235.6	402.72	5900	9139.7	16.0872074	25.0424448	38.7932937	1.472	1.7688	20.16304	2.1136	43.586957

S-III-1	7.6	15.2	29	24	243.2	263.41	8900	10498	10.8010005	36.5953947	43.1661184	1.412	1.6119	14.15722	2.1129	49.63881
S-III-2	7.9	15.2	29	24	190	145.6	2250	5250	5.5254303	11.8421053	27.6315789	1.9936	2.0914	4.905698	2.8343	42.169944
S-III-3	7.6	15.2	29	24	202.66	251	5680	8199.9	10.2921344	28.0272377	40.4613639	1.754	1.9557	11.49943	2.5403	44.828962
S-III-4	7.5	15.2	29	24	220.4	171.32	2080	4828.9	7.21347368	9.43738657	21.9097096	1.585	1.8979	19.74132	2.3351	47.324921
S-III-5	8	15.2	29	24	221.76	203.95	3612	5547.6	7.54749178	16.2878788	25.0162338	1.6818	1.9688	17.06505	2.4605	46.301582

MEZCLA I CON VACIADO 7 DIAS

VS-I-7-1	5.8	15.5	25	20	217	122.83	5600	18820	7.06704768	25.8064516	86.7281106	1.2591	1.2911	2.541498	1.5484	22.976729
VS-I-7-2	6	14.7	25	20	167.58	207.06	3470	11294	11.7380952	20.7065282	67.3946772	1.4718	1.5191	3.213752	1.8465	25.458622
VS-I-7-3	5.9	14.7	25	20	194.04	124.84	3423	14095	7.31903218	17.6406926	72.6396619	1.2514	1.2927	3.300304	1.5473	23.645517
VS-I-7-4	6	15	25	20	205.5	125.82	3657	13448	6.99	17.7956204	65.4403893	1.2816	1.3113	2.317416	1.5966	24.578652
VS-I-7-5	6	15	25	20	205.5	166.26	3456	15949	9.23666667	16.8175182	77.6107056	1.2105	1.2357	2.081784	1.5227	25.790995

MEZCLA II CON VACIADO 7 DIAS

VS-II-7-1	6	15	25	20	172.5	73.37	1415	3152	4.07611111	8.20289855	18.2724638	1.5284	1.5476	1.256216	1.9812	29.625752
VS-II-7-2	5.8	15	25	20	187.5	89.76	1009	4386	5.33650416	5.38133333	23.392	1.3926	1.4142	1.551056	1.7695	27.064484
VS-II-7-3	5.8	15	25	20	198	83.55	896	6576	4.96730083	4.52525253	33.2121212	1.3346	1.3563	1.625955	1.69	26.629702
VS-II-7-4	6	15	25	20	180	83.13	1230	4578	4.61833333	6.83333333	25.4333333	1.4868	1.5041	1.163573	1.8962	27.535647
VS-II-7-5	6	14.8	25	20	187.2	90.63	1735	5447	5.10304054	9.26816239	29.0972222	1.3711	1.3873	1.181533	1.7358	26.599081

MEZCLA III CON VACIADO 7 DIAS

VS-III-7-1	6	15	25	20	213	43.91	423	3015	2.43944444	1.98591549	14.1549296	1.2056	1.2616	4.64499	1.5315	27.032183
VS-III-7-2	6	15.9	25	20	187.5	41.1	390	3450	2.15408805	2.08	18.4	1.4464	1.5361	6.201604	1.8455	27.592644
VS-III-7-3	6	15	25	20	186.1	34.32	380	3426	1.90666667	2.04191295	18.4094573	1.3477	1.3915	3.249981	1.719	27.550642
VS-III-7-4	5.8	15	25	20	232.5	42.69	405	3652	2.53804994	1.74193548	15.7075269	1.1072	1.1678	5.473266	1.4345	29.561055
VS-III-7-5	6	14.9	25	20	182	27.38	485	3691	1.53131991	2.66483516	20.2802198	1.0968	1.1495	4.804887	1.3923	26.942013

MEZCLA I CON VACIADO 28 DIAS

VS-I-28-1	6	15	25	20	229.5	291.41	7230	21786	16.1894444	31.503268	94.9281046	1.0563	1.0928	3.455458	1.3458	27.406987
VS-I-28-2	6	15	25	20	213	373.2	7542	26960	20.73333333	35.4084507	126.57277	1.2794	1.3043	1.946225	1.6106	25.887135
VS-I-28-3	6	15	25	20	195	333.13	6986	22703	18.5072222	35.825641	116.425641	1.3226	1.363	3.054589	1.6919	27.922274

VS-I-28-4	6	15	25	20	186	329.89	8254	27572	18.3272222	44.3763441	148.236559	1.3869	1.4566	5.025597	1.7166	23.772442
VS-I-28-5	6	15	25	20	195	233.22	8765	28790	12.9566667	44.9487179	147.641026	1.2899	1.3372	3.666951	1.6112	24.908908

MEZCLA II CON VACIADO 28 DIAS

VS-II-28-1	6	15	25	20	190.5	245.79	6787	14224	13.655	35.6272966	74.6666667	1.498	1.5432	3.017356	1.9255	28.538051
VS-II-28-2	6	15	25	20	205.5	267.5	6987	19019	14.8611111	34	92.5498783	1.3283	1.3454	1.28736	1.6945	27.569073
VS-II-28-3	6.2	15	25	20	184.5	266.16	5587	16295	13.8480749	30.2818428	88.3197832	1.4179	1.4358	1.26243	1.8196	28.33063
VS-II-28-4	6	15	25	20	180	175.59	5840	16021	9.755	32.4444444	89.0055556	1.3646	1.4149	3.686062	1.7525	28.425912
VS-II-28-5	6	15	25	20	214.5	184.54	7634	22449	10.2522222	35.5897436	104.657343	1.2124	1.2511	3.192016	1.5515	27.969317

MEZCLA III CON VACIADO 28 DIAS

VS-III-28-1	6	15	25	20	187.5	152.59	2696	6112.4	8.47722222	14.3786667	32.5994667	1.5305	1.6301	6.507677	1.9758	29.095067
VS-III-28-2	6	15	25	20	150	136.92	2456	9541	7.60666667	16.3733333	63.6066667	1.2895	1.3996	8.538193	1.6954	31.477317
VS-III-28-3	6	15	25	20	165	125.98	3129	6847	6.99888889	18.9636364	41.4969697	1.459	1.5159	3.899931	1.8988	30.143934
VS-III-28-4	6	15	25	20	151	132.45	2657	7890	7.35833333	17.5960265	52.2516556	1.4986	1.544	3.029494	1.928	28.65341
VS-III-28-5	6	15	25	20	148.5	143.56	2456	7345	7.97555556	16.5387205	49.4612795	1.567	1.6347	4.320357	1.9976	27.47926

MEZCLA I CON VACIADO A 7 DIAS Y CON FIBRA DELGADA

VP-I-7-1	6	15	25	20	180.5	260.55	6275	18780	14.475	34.7645429	104.044321	1.2605	1.2975	2.935343	1.5824	25.537485
VP-I-7-2	6	15	25	20	160.5	239.5	4569	18620	13.3055556	28.4672897	116.012461	1.4818	1.5291	3.192064	1.8384	24.065326
VP-I-7-3	6	15	25	20	175	253.47	4896	19235	14.0816667	27.9771429	109.914286	1.2653	1.3027	2.955821	1.5399	21.702363
VP-I-7-4	6	15	25	20	162.5	243.29	5234	17650	13.5161111	32.2092308	108.615385	1.2598	1.294	2.714717	1.5654	24.257819

MEZCLA II CON VACIADO A 7 DIAS Y CON FIBRA DELGADA

VP-II-7-1	6	15	25	20	176.5	91.668	1515	3338	5.09266667	8.58356941	18.9121813	1.5634	1.5876	1.547908	1.9712	26.084176
VP-II-7-2	6	15	25	20	178.5	85.69	1349	4356	4.76055556	7.55742297	24.4033613	1.4926	1.5142	1.447139	1.8695	25.251239
VP-II-7-3	6	15	25	20	163.4	94.28	1466	4542	5.23777778	8.97184823	27.7968176	1.3446	1.3663	1.613863	1.6845	25.278893
VP-II-7-4	6	15	25	20	175.5	95.45	1389	4698	5.30277778	7.91452991	26.7692308	1.4868	1.5041	1.163573	1.8962	27.535647

MEZCLA III CON VACIADO A 7 DIAS Y CON FIBRA DELGADA

VP-III-7-1	6	15	25	20	193	54.32	874	3015	3.01777778	4.52849741	15.6217617	1.2366	1.2616	2.021672	1.5214	23.030891
VP-III-7-2	6	15	25	20	187.5	50.1	990	3450	2.78333333	5.28	18.4	1.4564	1.498	2.856358	1.7999	23.585553
VP-III-7-3	6	15	25	20	186.1	49.32	778	3426	2.74	4.18054809	18.4094573	1.3666	1.4023	2.612323	1.698	24.249963

VP-III-7-4 6 15 25 20 212 48.07 924 3652 2.67055556 4.35849057 17.2264151 1.1372 1.1597 1.978544 1.4006 23.162153

MEZCLA I CON VACIADO A 28 DIAS Y CON FIBRA DELGADA

VP-I-28-1 6 15 25 20 189.5 382.14 7354 23786 21.23 38.8073879 125.519789 1.2345 1.2536 1.547185 1.5338 24.244633
 VP-I-28-2 6 15 25 20 188.5 415.2 7834 24576 23.0666667 41.5596817 130.376658 1.2743 1.3026 2.220827 1.6095 26.304638
 VP-I-28-3 6 15 25 20 183 401.43 8686 26879 22.3016667 47.4644809 146.879781 1.3234 1.352 2.1611 1.6899 27.693819
 VP-I-28-4 6 15 25 20 192.5 409.87 8114 27865 22.7705556 42.1506494 144.753247 1.3799 1.4166 2.659613 1.7166 24.400319

MEZCLA II CON VACIADO A 28 DIAS Y CON FIBRA DELGADA

VP-II-28-1 6 15 25 20 172.5 305.89 7145 15624 16.9938889 41.4202899 90.573913 1.2356 1.2612 2.071868 1.5778 27.695047
 VP-II-28-2 6 15 25 20 187 327.74 6879 19678 18.2077778 36.7860963 105.229947 1.3876 1.4201 2.342174 1.7045 22.837994
 VP-II-28-3 6 15 25 20 186.5 296.47 7006 16135 16.4705556 37.5656836 86.5147453 1.4098 1.4358 1.844233 1.7967 27.443609
 VP-II-28-4 6 15 25 20 168.5 275.59 6134 16621 15.3105556 36.4035608 98.6409496 1.4693 1.4976 1.926087 1.8525 26.080446

MEZCLA III CON VACIADO A 28 DIAS Y CON FIBRA DELGADA

VP-III-28-1 6 15 25 20 182.5 182.9 2897 8332 10.1611111 15.8739726 45.6547945 1.7608 1.9098 8.462063 2.2458 27.544298
 VP-III-28-2 6 15 25 20 191.5 175.29 2345 8987 9.73833333 12.2454308 46.9295039 1.4678 1.5496 5.572966 1.9354 31.857201
 VP-III-28-3 6 15 25 20 190 185.54 2730 7847 10.3077778 14.3684211 41.3 1.6438 1.7759 8.036257 1.9988 21.596301
 VP-III-28-4 6 15 25 20 201 190.09 2691 8150 10.5605556 13.3880597 40.5472637 1.7829 1.894 6.231421 2.2987 28.930394

TABIQUES ELABORADOS POR COMPRESIÓN

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: P-I-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
12.79	5.33	31.10	10.68	36.98	10.92	14.51	3.69	38.45	2.85

Promedios-desviación estandar Mezcla 2 + PET; **NOMENCLATURA: P-II-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
6.70	0.92	12.80	4.70	18.67	3.61	12.62	4.32	41.45	2.19

Promedios-desviación estandar Mezcla 3 + PET; **NOMENCLATURA: P-III-n...**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
9.45	2.32	16.80	5.73	24.50	8.98	15.59	6.76	43.16	2.00

Promedios-desviación estandar Mezcla 1 sin PET; **NOMENCLATURA: S-I-n...**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
11.03	2.39	29.06	9.23	38.94	11.38	9.82	3.79	34.27	1.80

Promedios-desviación estandar Mezcla 2; **NOMENCLATURA: S-II-n...**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
16.07	3.28	25.06	7.73	36.83	4.42	20.01	10.04	44.80	5.34

Promedios-desviación estandar Mezcla 3; **NOMENCLATURA: S-III-n...**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
8.28	2.22	20.44	11.52	31.64	9.56	13.47	5.70	46.05	2.79

TABIQUES ELABORADOS POR VACIADO

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VS-I-7-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
8.47	2.05	20.44	3.69	73.96	8.57	2.69	0.54	24.49	1.19

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VS-II-7-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs

4.82	0.49	6.84	1.95	25.88	5.67	1.36	0.22	27.49	1.25
------	------	------	------	-------	------	------	------	-------	------

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VS-III-7-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
2.11	0.41	2.10	0.34	17.39	2.43	4.87	1.10	27.74	1.06

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VS-I-28-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
17.34	2.93	38.41	5.95	126.76	22.46	3.43	1.11	25.98	1.72

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VS-II-28-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
12.47	2.31	33.59	2.27	89.84	10.73	2.49	1.14	28.17	0.31

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VS-III-28-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
7.68	0.57	16.77	1.69	47.88	11.65	5.26	2.24	29.37	1.52

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VP-I-7-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
13.84	0.53	30.85	3.22	109.65	4.93	2.95	0.20	23.89	1.60

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VP-II-7-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs

5.10	0.24	8.26	0.64	24.47	3.97	1.44	0.20	26.04	1.07
------	------	------	------	-------	------	------	------	-------	------

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VP-III-7-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
2.80	0.15	4.59	0.48	17.41	1.32	2.37	0.44	23.51	0.55

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VP-I-28-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
22.34	0.81	42.50	3.62	136.88	10.54	2.15	0.46	25.66	1.65

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VP-II-28-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
16.75	1.20	38.04	2.30	95.24	8.35	2.05	0.22	26.01	2.23

Promedios-desviación estandar de Mezcla 1 + PET; **NOMENCLATURA: VP-III-28-n....**

Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Stress Comp la grieta	Stress Comp la grieta	Stress Comp Max	Stress Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
10.19	0.34	13.97	1.54	43.61	3.16	7.08	1.39	27.48	4.32

