



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Construcción

## Caracterización, desarrollo y aplicaciones de un ferrocemento celular ecológico

### Tesis

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

### Presenta:

Ing. Ángel Rolando Ramírez Ortega

### Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

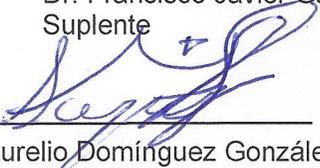
Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Presidente

Dra. Teresa López Lara  
Secretario

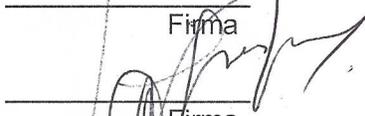
Dr. Jaime Horta Rangel  
Vocal

Dr. José Luis Reyes Araiza  
Suplente

Dr. Francisco Javier García Rodríguez  
Suplente

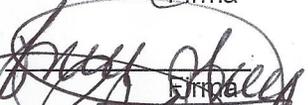
  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

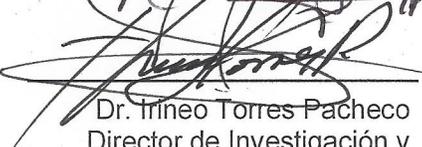
  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado

## RESUMEN

El ferrocemento es un elemento de construcción que ha pasado desapercibido a través del tiempo siendo un elemento constructivo versátil y fácil de utilizar. Por otra parte, los aditivos aligerantes en el mortero bajan la densidad de la mezcla y al combinarlos en los paneles de ferrocemento creamos una estructura de mayor espesor, ligero y con mejores resistencias térmica y acústica sin demeritar la resistencia mecánica. Aunado a estas características la adición de Poliestireno Expandido (EPS: Expanded polystyrene) reciclado reduce la contaminación al reusar este producto que normalmente se ocupa para embalaje y después se desecha para acumularse en los vertederos. Se elaboraron paneles de ferrocemento mortero-EPS reciclado termo-acústico que pueda ser montado como prefabricado ligero de muros divisorios para desarrollar confort en espacios de viviendas y oficinas. Por medio de un mortero ligero constituido por cemento agua y poliestireno expandido como agregado ligero y un marco y malla de acero se constituye un panel de ferrocemento ligero. Los resultados de pruebas de mortero arrojaron la disminución de resistencia a la compresión a medida del aumento del porcentaje de EPS. Mientras que los resultados de pruebas de compresión en paneles de ferrocemento el mejor resultado fue de 40% de agregado de EPS en volumen. Los paneles de ferrocemento con agregado de EPS pueden ser estructurales con resistencia mayor a los  $70\text{kg/cm}^2$  para adición de 40% y pueden ser no estructurales con una disminución de peso de más del 50% y sustitución de cemento de 60% con respecto al convencional (0% de EPS) con una resistencia a la compresión entre 20 y  $30\text{kg/cm}^2$  y un aislamiento acústico de rango similar a los paneles sin agregado de EPS.

Palabras clave: Ferrocemento, poliestireno expandido EPS, ligero, no toxico.

## SUMMARY

Ferrocement is a constructive element that has gone unknown over time although is a versatile and easy to use as a constructive element. On the other hand, the lightening additives in the mortar lower the density of the mixture and combining to create panels of ferrocement structure thicker, lighter and better thermal and acoustic resistance without detracting from the mechanical strength. In addition to these features the addition of expanded polystyrene (EPS) recycling, reduces pollution by reusing product that normally handles packing and then discarded to accumulate in landfills. Ferrocement panels were prepared with mortar and EPS recycling, thermo-acoustic that can be mounted as a lightweight prefabricated dividing wall to develop comfort in home and office spaces. By a light mortar done with cement, water and expanded polystyrene as a lightweight aggregate and a steel mesh frame constitutes a panel of light ferrocement. The mortar test results showed decreased compressive strength as the increased rate of EPS. While the results of compression tests on panels of ferrocemento, the best result was 40% of added EPS in volume. The ferrocement panels may be structural with more of 70kg/cm<sup>2</sup> strength for the addition of 40% and can be non-structural with a decreased weight of more than 50% and 60% of cement substitution compared to conventional ferrocement panel (0% of EPS) with a resistance compression between 20 and 30kg/cm<sup>2</sup> and comparable with conventional (0% cement substitution) panel in acoustic insulation.

Keywords: Ferrocement, expanded polystyrene EPS, lightweight, non-toxic.

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermanos quienes me apoyaron todo el tiempo.

A mi novia Fanny quien me apoyo y alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir.

Dedico esta tesis a mis amigos y compañeros Gilberto, Héctor, David, Alejandro, José Luis, Christian y otros quienes fueron un gran apoyo durante el tiempo en que escribía esta tesis.

A mis maestros quienes nunca desistieron al enseñarme, aun sin importar la situación, a ellos que continuaron depositando su esperanza en mí.

A los sinodales quienes estudiaron mi tesis y la aprobaron.

A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

La tesis de maestría es el fruto de trabajo de horas, días, meses y años y en este recorrido han participado muchas personas a las que quiero agradecer su colaboración.

Mi más sincera gratitud a mi director de tesis el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza de la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo a lo largo de esta investigación. A CONACYT por su apoyo económico durante mis estudios, asimismo, a la Universidad Autónoma de Querétaro por desarrollar mi conocimiento. A mis sinodales por su tiempo en revisar y analizar la presente investigación. A mis compañeros de la maestría por apoyarme en los momentos de flaqueza y animarme a continuar.

Gracias a todos.

ÍNDICE Contenido	Pagina
<b>RESUMEN.....</b>	<b>II</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
I.1 ANTECEDENTES.....	12
I.2 HIPÓTESIS.....	13
I.3 OBJETIVOS.....	13
I.4 DESARROLLO DE TESIS.....	14
<b>II. REVISION DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
II.1 ANTECEDENTES.....	15
II.2 FERROCEMENTO.....	17
II.3 CONCRETO ALIGERADO .....	18
II.4 ALIGERANTES Y PROPIEDADES EN CONCRETO .....	19
II.5 CONCRETO LIGERO CON AGREGADOS DE PLÁSTICO RECICLADO .....	20
II.6 LA SITUACIÓN DEL PLÁSTICO .....	21
II.7 POLIESTIRENO EXPANDIDO .....	23
II.8 FERROCEMENTO Y EPS.....	24
<b>III. METODOLOGÍA.....</b>	<b>27</b>
III.1 MORTERO.....	28
.....	28
III.1.2 Materiales .....	29
CEMENTO PORTLAND TIPO II COMPUESTO (CPC 30R RS).....	29

Agua .....	30
Agregado aligerante .....	31
III.1.3 Triturado.....	34
III.1.4 Equipos.....	36
Máquina universal.....	36
III.1.5 Desarrollo experimental .....	37
III.1.6 Elaboración de mortero.....	37
III.1.7 Elaboración de especímenes.....	40
Conjunto de pruebas .....	42
III.2 PANELES.....	45
.....	45
III.2.1 Materiales .....	46
III.2.2 Equipos.....	47
Máquina universal.....	47
III.2.3 Elaboración del mortero.....	47
III.2.4 Elaboración de paneles.....	48
III.3 BANCO DE PRUEBAS .....	53
III.3.1 Fuente de sonido .....	54
III.3.2 Instrumento de medición.....	55
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>57</b>
IV.1 PROPIEDADES DEL ESTADO FRESCO .....	57
IV.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTERO .....	61
IV.2.1 Granulometría media .....	61
IV.2.2 Granulometría fina .....	62
IV.2.3 Granulometría gruesa.....	63
IV.3 RESULTADOS DE PANELES .....	65
IV.3.1 Resistencia a la compresión.....	65
IV.4 RESULTADOS ACÚSTICOS.....	67
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>73</b>

<b>VII. APÉNDICE .....</b>	<b>76</b>
VII.1    MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DENSIDAD, ABSORCIÓN Y PORCENTAJE DE VACÍOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO .....	76
VII.2    DATOS ACÚSTICOS .....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1 Bote de Joseph Lambot (3.66 x 1.22mts., 1855, ferrocemento, Paris).....	16
2 Pasos de la metodología.....	27
3 Diagrama de la metodología a seguir para las pruebas del mortero.....	28
4 Cemento Cruz Azul tipo II Modificado .....	29
5 Agua potable para la mezcla .....	31
6 EPS de desecho de embalaje .....	32
7 Fundición del EPS dentro del mortero por temperatura 110°C .....	34
8 Triturador adaptado para trabajar con EPS.....	35
9 Triturado domestico con triturador en seco.....	35
10 Producto obtenido de la trituración del EPS .....	36
11 Materiales de preparación de mortero.....	39
12 Izquierda: mezcla separada. Derecha Mezcla homogénea.....	40
13 Moldes para la elaboración de cubos de mortero.....	41
14 Mezcla de mortero en molde de fraguado .....	41
15 Cubos para probar a compresión .....	42
16 Pesaje de cubos de mortero.....	43
17 Cubos a compresión simple en Máquina universal .....	43
18 Grietas perpendiculares a la aplicación de la carga .....	44
19 Diagrama de flujo de metodología de paneles de ferrocemento Adicionado con EPS de desecho .....	45
20 Producto de desecho de empresas de embalaje. Derecha molde para paneles .....	46
21 Izquierda malla de acero. Derecha armazón rígido para sostener la malla.....	47
22 Material para elaborar paneles.....	49
23 Mezcla de mortero para paneles ya homogéneo .....	49
24 Colocación de malla de acero para panel. Vertido de mortero dentro de los moldes.....	50
25 Compactación de mortero dentro de molde .....	50

26	Desmoldado de paneles a partir del molde desarmable. Curado de paneles .	51
27	Pesaje de paneles ya curados de antes de la prueba de compresión. ....	51
28	Izq. Nivelación de panel para el vertido de azufre líquido. Der. Panel cabeceado con azufre .....	52
29	Máquina Universal y panel a compresión.....	52
30	Isométrico de banco de pruebas para aislamiento acústico .....	53
31	Banco de pruebas para pruebas acústicas .....	54
32	Fuente de sonido que transmite de 20 a 20kHz .....	55
33	Medidor de Nivel de Sonido Sonómetro de 30-130 Decibeles TPM-HER-400	56
34	Micrografía de espécimen con 40% de sustitución de EPS	
35	Micrografía de espécimen con 40% de sustitución de EPS después de haber sido sometido a 110°C durante 24hrs	
36	Resistencia a la compresión a primera falla de mortero con EPSm (1.18-2mm) .....	61
37	Resistencia a la compresión a última falla de mortero con EPSm (1.18-2mm)	62
38	Resistencia a la compresión para la granulometría fina de 0.6 a 1.18mm .....	62
39	Resistencia a la compresión a ultima falla de mortero con EPSf (0.6-1.18mm) .....	63
40	Resistencia a la compresión a primera falla de mortero con EPSg (2-4mm) ..	63
41	Resistencia a la compresión a ultima falla de mortero con EPSg (2-4mm).....	64
42	Primera falla de la resistencia a la compresión de panel de ferrocemento con diferentes adiciones de poliestireno expandido medio (1.18-2mm). ....	65
43	Ultima falla de la resistencia a la compresión de panel de ferrocemento con diferentes adiciones de poliestireno expandido medio (1.18-2mm). ....	65
44	Fallas de paneles de ferrocemento por compresión simple, se aprecia la falla perimetral del armazón de acero. 0, 40 y 60% de derecha a izquierda .....	66
45	Grafica de registro de fuente de sonido sin obstrucción.....	67
46	Grafica de registro de absorción acústica en el banco de pruebas con paneles 0% de EPS.....	68

47 Grafica de registro de absorción acústica en el banco de pruebas con paneles 40% de EPS.....	68
48 Grafica de registro de absorción acústica en el banco de pruebas con paneles 60% de EPS.....	69
49 Líneas de tendencia polinómica de sexto orden con relaciones mayores a 0.9 para el banco de pruebas y los paneles.....	70

### ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PAGINA
1 Datos de consumo y residuos de plástico en toneladas.....	22
2 Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de residuo, SEMARNAT 2010 .....	23
3 Granulometrías de EPS triturado y tamizado .....	37
4 Batería de pruebas de mortero con adición de EPS fino, medio y grueso .....	38
5 Pesos y proporciones de elaboración de mortero .....	39
6 Batería de pruebas de mortero con adición de EPS fino, medio y grueso .....	48
7 Dosificación de materiales para panales de ferrocemento.....	48
8 Características físicas de mortero. Densidad absorción y porcentaje de vacíos	57

## I. INTRODUCCIÓN

### I.1 Antecedentes

Una gestión sostenible de los recursos implica un menor consumo de materias primas y energía, así como la disminución de los residuos. Esto se puede lograr integrando los residuos en procesos productivos tales como su incorporación a materiales de construcción tradicionales. Estos nuevos materiales de construcción resultan ecológicamente más eficientes al permitir un ahorro de materias primas, de consumo energético asociado a la fabricación de los productos a los que sustituyen, así como la preservación de espacios naturales debido a una menor necesidad de explotación de recursos minerales.

En la construcción actual el concreto reforzado es uno de los materiales más utilizados, no solo en los países desarrollados, sino también en zonas muy remotas, ya que es un material resistente a los esfuerzos de compresión, y cuando es armado, también a resistencias de flexión y cortantes. Mundialmente probablemente sea el material constructivo más utilizado en las edificaciones. Un inconveniente es que es muy pesado, su peso específico es de 2400 kg/m<sup>3</sup>, lo cual puede ser problemático en algunos casos (Weigler, 1974).

El mortero ligero se pueden preparar ya sea mediante la inyección de aire o por la omisión de finos del agregado o mediante la sustitución de ellos con agregados huecos, celulares, o porosos. La densidad del concreto ligero por lo general oscila entre 300 hasta 1800 kg/m<sup>3</sup> (Narayanan et al. 2000)

El concreto que vamos a utilizar en esta investigación es aquel con agregados de peso ligero se compone de agregado liviano (en este caso Poliestireno expandido, EPS) que puede ser utilizado como un reemplazo para los agregados normales, tales como gravilla o arena (NRMCA, 2003). Tal concreto tiene la capacidad de flujo alto, bajo peso, y un consumo mínimo de los agregados, de baja resistencia controlada, y excelentes propiedades de aislamiento térmico.

El EPS es un polímero termoplástico espumado con estructura celular cerrada. Es biológicamente inerte y no tóxico. El EPS posee interesantes propiedades tales como su baja densidad, aislamiento térmico, comportamiento hidrofóbico, y resistencia química a ácidos y álcalis. El EPS se puede encontrar en perlas, granulado en forma de pequeñas partículas. Las perlas de EPS se pueden considerar como un tipo de árido artificial de naturaleza polimérica, no absorbente y ultraligero (densidad menor de 300 kg/m<sup>3</sup>), permitiendo la fabricación de materiales de construcción ligeros.

## **I.2 Hipótesis**

La inclusión de EPS de desecho en el ferrocemento, reduce su peso volumétrico, para crear paneles de ferrocemento ligeros, remplazando el cemento por un residuo reciclado, con mayor aislamiento acústico que el ferrocemento convencional, disminuyendo la contaminación al reutilizar EPS un residuo de embalaje.

## **I.3 Objetivos**

Elaborar un panel de ferrocemento mortero-EPS reciclado con adición de EPS triturado y caracterizar las propiedades acústicas que pueda tener para aplicaciones de muros divisorios (no estructurales) y para desarrollar confort en espacios de viviendas y oficinas.

- Gestionar la obtención de residuos de embalaje con una empresa de envíos o electrodomésticos
- Habilitar el EPS a utilizar en el proyecto, por limpieza trituración y secado para obtener un material homogéneo y de las mejores características para la inclusión en el compuesto de ferrocemento
- Determinar el espesor de panel de ferrocemento que cumpla con las Normas para elementos no estructurales (muros divisorios principalmente)

para obtener la mayor resistencia acústica y el menor peso en base a las pruebas experimentales de tensión compresión flexión y adherencia.

#### **I.4 Desarrollo de tesis**

La tesis se conforma de varios apartados:

En el capítulo 1, se hace mención de los objetivos de esta tesis y se da una breve descripción de la importancia que tiene esta investigación en nuestro entorno.

En el capítulo 2 se hace un estudio del arte sobre autores a nivel internacional que han abordado el tema, así como una breve descripción de lo que es el ferrocemento, concreto ligero y poliestireno expandido.

En el capítulo 3, se describen las características de los materiales a utilizar en este trabajo, tales como: la granulometría, la absorción, la densidad y peso volumétrico. También se hace una breve descripción de los equipos utilizados, así como de las pruebas mecánicas a realizar y la metodología que se siguió en este estudio.

El capítulo 4, se presentan los resultados y el análisis obtenido de las pruebas explicadas en el capítulo 3.

El capítulo 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones del análisis de datos obtenidos en el capítulo 4.

## II. REVISION DE LITERATURA

### II.1 Antecedentes

Para abordar apropiadamente la historia y origen en primer lugar del ferrocemento, hay que mencionar el estrecho parentesco que guarda el ferrocemento con el concreto reforzado, (conocido también como concreto armado y particularmente en España como concreto armado), además hay que decir también, que ambos materiales o técnicas, se realizan a base de la utilización de componentes elaborados de acero y mortero de cemento

3000 años Antes de Cristo, los egipcios utilizaron barro mezclado con paja para unir ladrillos. Ellos utilizaron morteros de yeso y cal en las pirámides. De igual manera en diferentes culturas como la china o las culturas mesoamericanas, se utilizó un mortero o estuco para unir igualmente piedras en edificaciones. Siglos más tarde, Los romanos utilizaron una especie de cemento, llamado puzolana, antes del nacimiento de Cristo. Encontraron grandes depósitos de ceniza volcánica arenosa cerca del Vesubio y en otros lugares de Italia. Cuando mezclaron este material con cal viva y agua, además de arena y grava, dejando endurecer la mezcla, se produjo una substancia rocosa que utilizaron en la construcción. Se podría pensar que resultaría una especie de concreto relativamente pobre, en comparación con las normas actuales, pero algunas estructuras de concreto romanas siguen en pie hoy día. Un ejemplo notable es el Panthetin, que se encuentra en Roma y fue terminado en el año 126 de nuestra era (Lewis et al, 1985).

El arte de hacer concreto puzolánico se perdió durante la Edad Media y fue resucitado hasta los siglos XVIII y XIX. En Inglaterra se descubrió en 1796 un depósito de piedra de cemento natural que fue vendida como "cemento romano". Se descubrieron otros depósitos de cemento natural tanto en Europa como en América, que fueron explotados durante varias décadas.

En 1824, Joseph Aspdin, un constructor inglés, después de largos y laboriosos experimentos obtuvo una patente para un cemento que él llamó

"cemento portland", debido a que su color era muy similar al de la piedra de una cantera en la isla de Portland, en la costa inglesa. Él hizo su cemento con ciertas cantidades de arcilla y piedra caliza que pulverizó y quemó en la estufa de su cocina, moliendo después la escoria resultante para obtener un polvo fino. En los primeros años tras su invención, ese cemento se usó principalmente en estucos (McCormac, 2005)

Para Paul, B.K. y Pama, R.P. la historia del Ferrocemento "se remonta hasta 1848, fecha considerada por muchos como la del primer uso del concreto reforzado (McCormac, 2005), lo cual establece un nacimiento simultáneo de ambos materiales, de ambas técnicas, no obstante para Olvera A. quien establece que es el ferrocemento el hermano mayor del Concreto Armado, que vio la luz el año de 1855 cuando el sr. Lambot construyó un bote de este material y fue exhibido en París, como se muestra en la figura 1. El bote fue concebido como la primera realización de una nueva tecnología que habría de cobrar enorme incremento en los siglos XIX y XX con el nombre de concreto armado (Olvera, 2002).



**Figura 1 Bote de Joseph Lambot (3.66 x 1.22mts., 1855, ferrocemento, Paris).**

Joseph Louis Lambot construyó varios botes de remos, maceteros, asientos y otros artículos con un material que llamó "Fericement" en una patente que obtuvo en 1852

La patente dice en parte lo siguiente: Mi invención es un producto nuevo que puede reemplazar la madera (en pisos, recipientes para agua, maceteros,

etc;), la cual está sujeta a daños por el agua y la humedad. La base del nuevo material es una malla metálica de alambre o de varillas interconectadas para formar un emparrillado flexible. Moldeo esta malla en forma similar al artículo que quiero crear, después utilizo cemento hidráulico o una breca bituminosa o una mezcla para rellenar las juntas. Los botes de remos de Lambot se encuentran actualmente en el museo de Brignoles, en Francia. Estos barcos se construyeron de 3.66 m de largo y 1.22 m de ancho con espesores delgados de 2.5 a 3.8 cm, reforzados con emparrillado y malla de alambre (Paul y Pama, 1985).

A principios de los años cuarenta, un notable ingeniero-arquitecto italiano, Pier Luigi Nervi, resucitó la idea original de Lambot al observar que reforzando el concreto con capas de malla de alambre se obtenía un material que presentaba las características mecánicas de un material homogéneo equivalente y que demostraba tener gran resistencia al impacto. A través de una serie de pruebas el profesor Nervi estableció las características preliminares del ferrocemento (Walkus y Kowalski, 1971). Nervi también fue el primero en emplear el ferrocemento arquitectónico en edificios. En 1947 construyó con ferrocemento una pequeña bodega. Posteriormente techó la alberca de la Academia Naval Italiana con una cubierta de 15 m y después la famosa Sala de Exhibición de Turín; sistema de techado con un claro de 91 in. En ambas estructuras se usó ferrocemento como uno de los elementos estructurales; las nervaduras y superficies exteriores son de concreto reforzado (Paul y Pama, 1985).

## **II.2 Ferrocemento**

Por criterio de aclaración de conceptos, se cita la definición de ferrocemento; El ferrocemento es una capa de mortero de cemento de espesor delgado, reforzado con malla de alambre. E igualmente; es un tipo de material compuesto donde los materiales que lo integran, generalmente de consistencia frágil, llamada matriz, se refuerzan con fibras dispuestas a través del compuesto, dando como resultado mejores comportamientos estructurales que el comportamiento individual.

Esto podría semejar sobremanera una definición aplicable al concreto reforzado si no fuera por la distinción de "fibras" dispersas para refuerzo, ya que en principio si el concreto es: Una mezcla de arena, grava, roca triturada u otros agregados unidos en una masa rocosa por medio de una pasta de cemento y agua como se definió en un principio y el concreto reforzado es: Una combinación de concreto y acero en la que el refuerzo de acero proporciona la resistencia a tensión de que carece el concreto, entonces el esclarecimiento de conceptos de mayor agudeza para diferenciar entre concreto reforzado y ferrocemento, radica en que el concreto reforzado es el material compuesto de concreto y acero, donde el acero previamente conforma una estructura rígida. armada con barras de acero estándar ASTM, unidas mediante amarres con alambre recocido o soldadas, y que quedará inmersa y cubierta dentro de concreto vaciado en un molde conformado "In Situ" para ser retirado una vez fraguado el concreto y dejando a vista un arreglo estructural donde el acero y el concreto constituyen una nueva estructura que por tal lleva el nombre de "concreto reforzado", y en cambio el ferrocemento es la estructura compuesta de concreto y acero, donde el acero fundamentalmente es el material del que está fabricada la malla y los refuerzos de la malla que orientarán los planos de la estructura deseada y que posteriormente será cubierta por concreto en capas de delgado espesor que obedecerán el contorno predefinido, en este caso el concreto no se cuele (McCormac, 2005).

### **II.3 Concreto aligerado**

Para determinar las limitaciones del concreto ligero se divide en dos categorías determinantes para el uso y la normativa del concreto, concreto estructural o no-estructural. El concreto estructural de agregado ligero se define como concreto que: (a) está constituido con agregado ligero conforme a la normativa ASTM 330, (b) tiene un esfuerzo de compresión superior a 17.2Mpa a los 28 días cuando se prueba de acuerdo con los métodos establecidos en la norma ASTM C 330, y (c) tiene un equilibrio de peso no superior a 1842kg/m<sup>3</sup> como lo determina la norma ASTM C 567

El principal factor que modifica la proporción y control de los procedimientos para el concreto ligero, comparado con el concreto tradicional, es la gran absorción de la mayoría de los agregados ligeros

Los agregados húmedos son preferibles a los agregados secos la hora de mezclar, ya que así tienden a absorber menos agua durante el mezclado y también se reduce la posibilidad de pérdidas de revenimiento mientras es mezclado, transportado y colocado. Los agregados húmedos tienen menor tendencia a la segregación cuando son almacenados.

Cuando el concreto está hecho con agregados ligeros que tienen una baja humedad inicial (normalmente menores de 10%) y alto rango de absorción, se recomienda mezclar los agregados con una mitad o dos tercios del agua de mezclado por un periodo corto antes de agregar el cemento y aditivos para minimizar las pérdidas de revenimiento.

#### **II.4 Aligerantes y propiedades en concreto**

En la industria de la construcción, tener la mayor cantidad de materiales, métodos constructivos y sistemas de construcción, ofrece la oportunidad de innovar en cada edificación que se realice, aplicaciones que se vuelven globales y de extensos estudios (Hernández, 2012) Así, el mortero ligero ofrece una la cualidad de soportar cargas, ser adherente y tener mayor flexibilidad (García, 2011). El mortero aligerado en esta investigación se realiza en paneles de ferrocemento aunque no solo en este sistema de construcción se utiliza; los blocks y los ladrillos son otra forma de construcción que se beneficia con la adición de aligerantes tales como el EPS, así se construyen muros que si bien son más ligeros, se utilizan como muros de carga (Ramírez, 2012).

Los agregados aligerantes pueden ser productos industriales tales como las cenizas residuos de horno; agregados naturales ligeros tales como de piedra pómez, fibra de coco (Noor et al 2012), partículas de madera; agregado artificial de peso ligero, tales como escoria, espuma, agregado de esquisto, agregado de arcilla expandida, combustibles sintetizados, tales como el poliestireno expandido; agregados pulverizados de ceniza, perlita y vermiculita.

El refuerzo de materiales en base cemento con fibras de vidrio álcali resistente, fibras que por su alto contenido en zirconio tienen una buena resistencia a los compuestos alcalinos. En general, este refuerzo aporta una mejora del módulo de rotura y evita el desprendimiento del material por el “efecto cosido” de las fibras (Antequera, 1991).

La ceniza es otro buen aligerante del concreto y adicionada en una espuma de geopolímero genera un concreto aligerado de buenas características. Cuando se genera una nueva adición para el concreto, ésta no se trata de la misma manera que otros elementos. En este caso el geopolímero modifica las características de este concreto, hasta en las características  $q$  se obtienen de curarlo a diferentes temperaturas ya que el geopolímero reacciona diferente a altas temperaturas como lo estudia Mustafa (2012).

## **II.5 Concreto ligero con agregados de plástico reciclado**

En algunos casos, este plástico es añadido como aditivos, de manera química, sin embargo, es importante conocer que existen otros métodos para utilizar el plástico reciclado. Se han encontrado unos estudios recientes sobre el plástico reciclado de botellas como aditivos en el concreto. Este plástico tiene el nombre técnico de polietileno tereftalato (PET), y al descomponerlo químicamente se obtienen nuevas cadenas, llamadas poliéster insaturado. La característica de esta es que hace que todas las cadenas puedan unirse formando una red. Si esta matriz es rellena con arena o grava, el producto obtenido es un concreto cuyo aglutinante es un polímero, llamándose concreto polimérico. Este concreto sería muy resistente, pero no es un concreto aligerado. Estudios sobre este tema fueron hechos en Perú hace algunos años, por el Prof. Nakamatsu (2009). Se modifican químicamente los residuos de plástico, para producir resinas insaturadas de poliéster y mezclarlo con los áridos para producir este concreto de poliéster. Se hicieron pruebas de resistencias y durabilidad y se observó que el comportamiento de este concreto fue positivo, resultó ser más resistente y más durable que el concreto convencional de cemento portland, y que fragua en horas, a diferencia del concreto convencional que necesita semanas.

En el artículo de Zainab (2007), se recopilan estudios hechos acerca del concreto polimérico, que lleva resinas de poliéster insaturado y polietileno tereftalato (PET). También se estudia el polipropileno en forma de fibras, para darle mayor resistencia al concreto. Muchas de estas investigaciones son acerca de plásticos como aditivos para el concreto, lo que es diferente a los áridos, ya que estos le dan otras propiedades al concreto, distintas a las buscadas con los áridos de plástico.

En 2013 Hernández-Zaragoza realizó una investigación desarrollando un ladrillo ligero elaborado con poliestireno expandido, los cuales poseen flexibilidad que reduce la aparición de grietas ante las cargas aplicadas con peso reducido en comparación con los especímenes son poliestireno expandido.

Una investigación se mezcló cemento portland, arena fina, grava y plástico reciclado en dosificaciones de 0%, 10%, 15% y 20%, los cuales reemplazaban arena. Se realizaron ensayos de consistencia y escurrimiento, de densidad del mortero fresco y endurecido, y de resistencias a compresión y flexo tracción. Los resultados mostraron que la consistencia de las mezclas fue decreciendo con el aumento de plástico reciclado, esto ocurre porque los gránulos de plástico tienen formas angulares y no uniformes, lo que da resultado a una menor fluidez del material. La densidad del mortero fresco tiende a decrecer con el aumento del plástico, al igual que la densidad del mortero endurecido, aunque esta densidad va incrementándose con el tiempo. Los ensayos de resistencias a compresión y flexo tracción indicaron que a mayor cantidad de plástico, menor es la resistencia, como indican todos los estudios hechos acerca de los esfuerzos. Esto puede deberse a la pobre adhesión entre la superficie del plástico y la pasta de cemento.

## **II.6 La situación del plástico**

La situación actual del plástico, hoy en día, es que el consumo anual de este material se ha incrementado desde aproximadamente 5 millones de toneladas en el año 1950 a casi 245 millones en el año 2006. Producimos y usamos 20 veces más plástico hoy en día que hace 50 años.

La tecnología para la producción del plástico ha ido de la mano con el consumo de este, pero no con su reciclado, esto es algo más reciente.

En la Tabla 1 se puede observar la cantidad de residuos de plástico generado en Europa, Reino Unido y Estados Unidos.

**Tabla 1 Datos de consumo y residuos de plástico en toneladas.**

		Cantidad (millones)	Referencia
Reino Unido	Consumo	4,7	www.wasteonline.org.uk (2001)
	Residuos	3,0	www.wasteonline.org.uk (2001)
Europa del Este	Consumo	43,5	APME (2004)
EE. UU.	Consumo	26,7	EPA (2003)
	Residuos	11,0	EPA (2003)

*Fuente: Waste Management: "Use of recycled plastic in concrete: A review" (R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur)*

Más de un tercio de los residuos de plástico viene de embalaje, y un cuarto del total es usado en la construcción. (WRAP, 2007) De todos los residuos generados, más del 80% es utilizado como rellenos o llevado a vertederos, el 8% es incinerado y se estima que tan solo el 7% es reciclado (Siddique et al. 2008).

En la tabla 2 se muestra como al igual que en otros países los desechos plásticos en Mexico son una cantidad considerable de los desechos en general. Con 4173 millones de toneladas los desechos plásticos tienen que encontrar caminos hacia el reciclaje o la reutilización evitando que lleguen a los rellenos sanitarios ya que según la SEMARNAT los residuos plásticos se duplican en promedio cada 4 años haciendo insostenible el modelo de un solo uso que se utiliza comúnmente.

**Tabla 2 Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de residuo, SEMARNAT 2010**

(Miles de toneladas)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<b>Total</b>	30733	31488	32174	32916	34603	35405	36135	36865	37595	38325
Papel, cartón, productos de papel	4324	4430	4527	4905	5160	5275	5338	5489	5199	5300
Textiles	458	469	479	497	520	530	542	552	538	548
Plásticos	1346	1379	1409	2014	2116	2162	2208	2223	4094	4173
Vidrios	1813	1858	1898	2156	2210	2262	2309	2341	2211	2253
Metales <sup>b</sup>	891	913	933	1047	1160	1186	1210	1298	1293	1318
Basura de comida, de jardines y materiales orgánicos similares	16104	16500	16859	16593	17441	17968	18335	18576	19707	20090
Otro tipo de basura (residuos finos, pañal desechable, etc.)	5796	5939	6068	5704	5996	6022	6143	6386	4553	4641

a/ Conforme a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, lo que se conocía como residuos sólidos municipales, pasa a ser residuos sólidos urbanos.

b/ Incluye aluminio, ferrosos, cobre, plomo, estaño y níquel.

NOTA: Los cálculos de la generación para el año 2004, se hicieron con apego a las proyecciones de población de CONAPO, que resultaron ser ligeramente superiores a los datos de población que se manejaron por la SEDESOL, por lo que hay un ligero incremento más allá de las tendencias que se venían observando del 2000 al 2003.

FUENTE: SEMARNAT. SNIARN. Base de datos estadísticos. Módulo de consulta temática. Dimensión ambiental, Mayo, 2010.

## II.7 Poliestireno expandido

El poliestireno expandido es comúnmente usado como embalaje en el sector de mensajería y transporte, principalmente porque tiene excelente resistencia al impacto, aislamiento acústico, ligereza y de fácil producción. Éste material tiene una gran variedad de aplicaciones en la industria alimenticia, aplicaciones eléctricas, en componentes computacionales, etc. También es ampliamente usado como aislante térmico en la industria de la construcción. Los productos hechos de EPS se caracterizan por su corto tiempo de servicio.

El material usado en el embalaje se convierte en grandes volúmenes de residuo en un tiempo muy corto. Con el fin de aliviar el problema generado por la acumulación de residuos, se están haciendo grandes esfuerzos para recuperar los residuos y de ese modo evitar la incineración y la acumulación en los vertederos, ya que estos procesos generan un alto impacto ambiental. Tener un alto impacto

ambiental. De esta forma, el reciclaje de plástico ha crecido significativamente en los últimos años (Samper et al. 2010)

Por lo que respecta al EPS reciclados, este material se utiliza en el concreto para el revestimiento externo de edificios con propiedades de aislamiento térmico, y para reducir la porosidad y la permeabilidad del cemento (Laukaitis et al. 2005). Además, se utiliza en algunas partes como fibra de filtración de sistemas (Shin, 2005), en el procesamiento de EPS puro (Teo et al. 1997) para generar monómeros de catálisis (Guoxi et al. 1999)

## **II.8 Ferrocemento y EPS**

El ferrocemento por sí mismo tiene características benéficas para la construcción como lo es la trabajabilidad en paneles y estructuras esbeltas, su alta moldeabilidad en formas poco convencionales con curvas pronunciadas y formas caprichosas, lo hace idóneo para viviendas.

El ferrocemento convencional por hacerse principalmente con mortero que consiste en mortero hecho con cemento Portland, agua y agregado, normalmente arena que pasa la malla N8 (2.36mm). La matriz de mortero compone cerca del 95% del volumen del ferrocemento, generando, como en el concreto convencional un alto peso específico que ronda los 2200kg/m<sup>3</sup>. La inclusión de EPS genera espacios de baja densidad como agregado lo que reduce su peso por volumen. Su bajo peso sirve para colocarse en estructuras de varios niveles como lo son complejos de oficinas.

Los elementos prefabricados poseen características constructivas que los permiten montar un ensamblaje con control de los procesos de calidad, un ensamblaje en una línea de producción de acuerdo a las características del panel, así como un rápido montaje en el sitio de construcción.

Los paneles de ferrocemento ya que contienen acero interno en forma de malla, lo hacen resistente a la tensión y absorbe diferentes deformaciones.

Aunado a esto, la trabajabilidad del mortero en forma de pasta hace el proceso de elaboración fácil y rápida, aparte de que puede adquirir la forma de la malla. Y por último la inclusión del EPS a este compuesto genera un panel con diversas características como lo son el bajo peso por volumen, la resistencia térmica y el aislamiento acústico. Y para terminar el hecho de que el EPS sea reciclado contribuye a eliminar residuos contaminantes de los vertederos.

En la actualidad los materiales usados en la industria de la construcción, tienen grandes pesos específicos y sus propiedades de resistencia acústica y térmica son o deficientes o pasadas por alto en los análisis.

En México, la construcción de casas de interés social o para el ancho de población tiene grandes deficiencias desde el diseño arquitectónico pasando por el diseño estructural, los materiales y los procesos constructivos. Estos problemas conllevan a viviendas que necesitarán un mantenimiento correctivo regular o una mala calidad de vida, por ejemplo según el INEGI a nivel nacional el 71% de las viviendas cuentan con techos duraderos, esto provoca que no se tenga un hogar digno para habitar.

En la construcción dentro de la casa, si bien la mayoría de los mexicanos buscan una casa hecha con materiales de mampostería en el exterior por la cultura que se tiene, dentro de la vivienda se pueden colocar muros divisorios de paneles, en este caso la proposición es el ferrocemento celular ecológico. Con respecto a las paredes de las viviendas el INEGI muestra un porcentaje del 86% del total con paredes que no muestran una alta deficiencia constructiva, pero no hablan de la resistencia acústica y térmica que genera un alto confort.

Por si solo el poliestireno expandido (EPS) es un contaminante que si no se recicla termina en los vertederos ocasionando polución. El EPS es un derivado del petróleo lo que lo hace un polímero de larga degradación más allá del rango de los 100 años. La utilización del EPS es un método óptimo de reciclaje de este

compuesto agregando propiedades al ferrocemento y evitando un porcentaje de contaminación.

### III. METODOLOGÍA

La metodología se divide en 3 secciones principales; una parte dedicada al mortero (III.1 Mortero) y las pruebas relevantes a este. Las otras dos secciones se basan en las características de los paneles de ferrocemento ligero mecánicas (III.2 Paneles) y físicas (III.3 Banco de pruebas).

Se comienza con las pruebas del mortero para determinar las características de la mezcla y el comportamiento de los elementos combinados. Ya que se tienen los resultados del mortero se prosigue a elaborar los paneles de ferrocemento tomando en cuenta los resultados obtenidos del mortero. Una vez elaborados los paneles se procede a determinar las características y propiedades mecánicas de este elemento. Por último las propiedades acústicas del panel de ferrocemento por medio de un banco de pruebas.

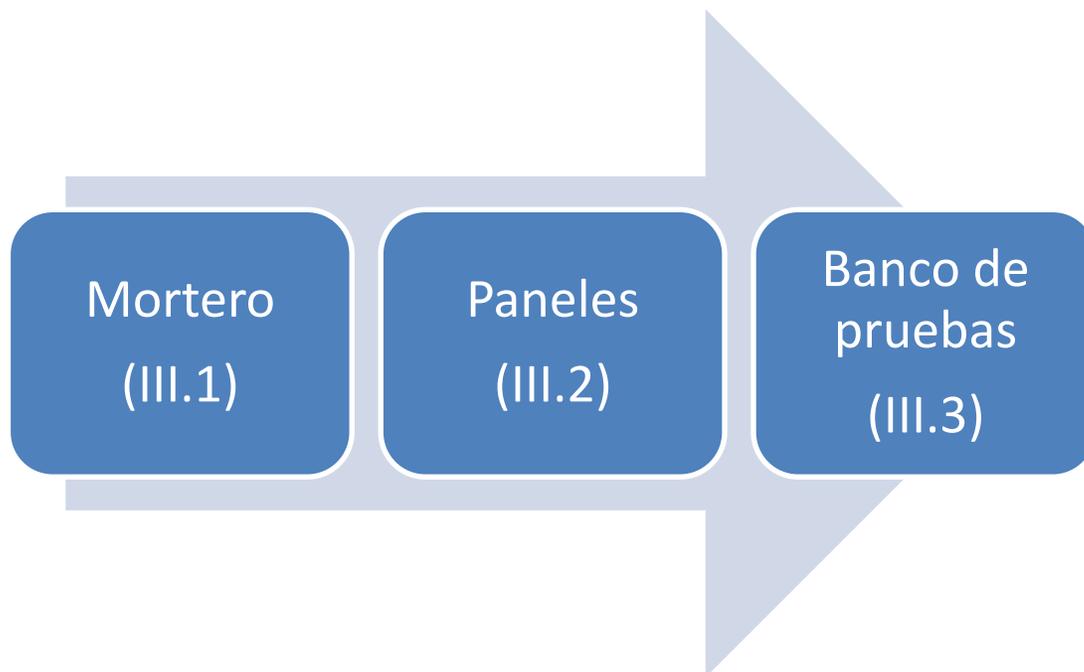


Figura 2 Pasos de la metodología.

### III.1 Mortero

El análisis del mortero se determina por medio de la elaboración de especímenes cúbicos utilizando los materiales mostrados a continuación, se prueba la compresión por medio del equipo presentado continuación y se hacen las pruebas mostradas en el diagrama (figura 3).

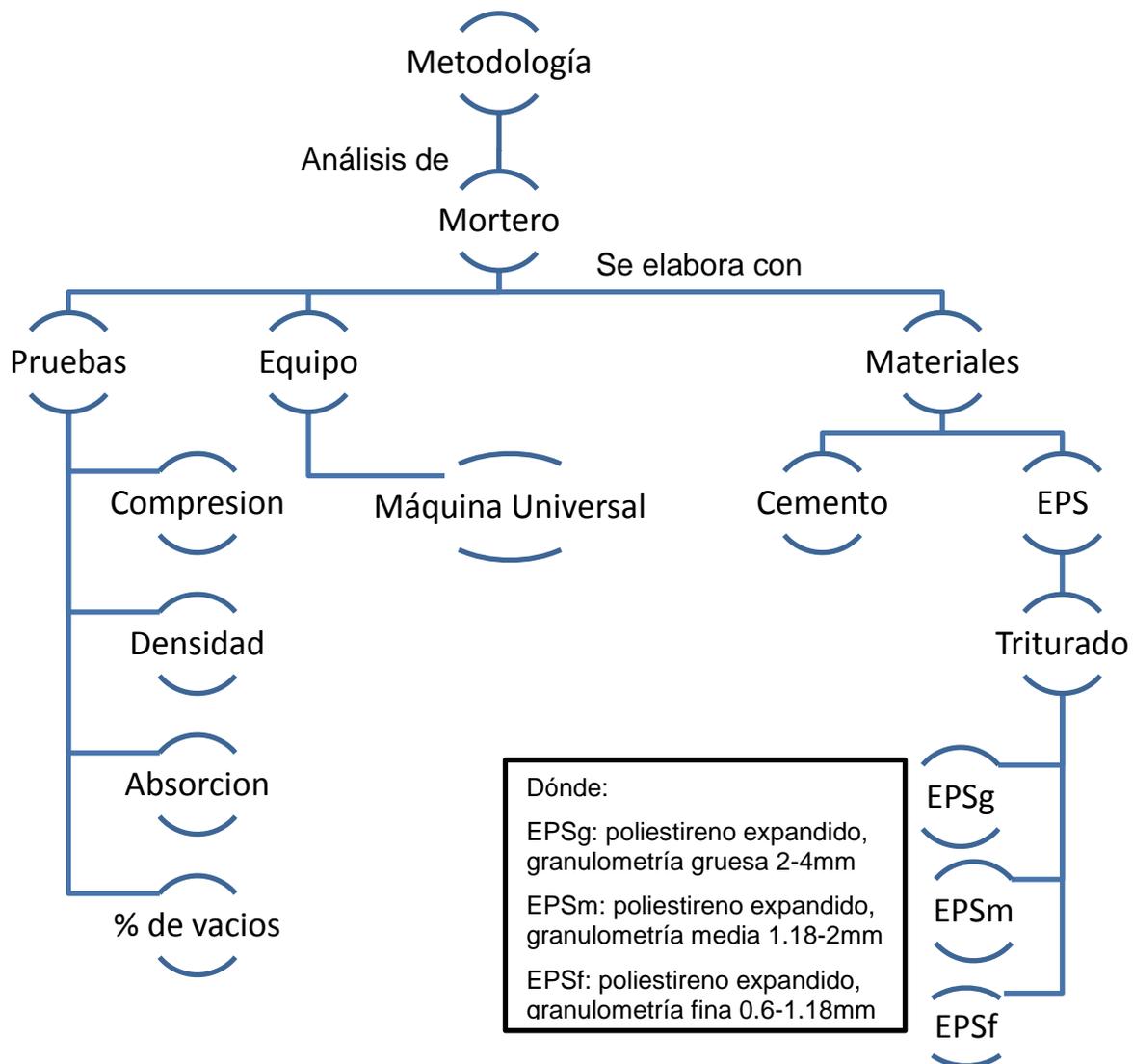


Figura 3 Diagrama de la metodología a seguir para las pruebas del mortero.

### III.1.2 Materiales

Los materiales para elaborar el mortero ligero fueron cemento, agua y agregado de poliestireno expandido reciclado.

Los materiales para elaborar los paneles de ferrocemento fueron malla de acero, especificar el tipo de malla marco de acero constituido por varillas de 3/8" y mortero ligero.

El agregado de poliestireno expandido (EPS) reciclado fue el que se obtuvo de la trituración del EPS obtenido, como residuo de embalaje en las empresas gestoras

- **Cemento Portland Tipo II Compuesto (CPC 30R RS)**



**Figura 4 Cemento Cruz Azul tipo II Modificado**

El cemento utilizado para realizar el mortero en este estudio fue un cemento CPC 30R RS (Cruz Azul), como se ve en la figura 4, que por su composición química genera menor calor de hidratación que sus similares, con lo que se disminuye notablemente la formación de fisuras y lo hace resistente al

ataque moderado de agentes agresivos del agua y del suelo, principalmente de sulfatos y salitre.

El cemento Cruz Azul Tipo II Compuesto (CPC 30R RS) satisface ampliamente las especificaciones de la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE y la Norteamericana ASTM C-1157. Sus propiedades principales son:

Resistencias Mecánicas: Altas y Uniformes.

Resistencia al Ataque de Sulfatos: El diseño de nuestro cemento CPC 30R RS, da por resultado un cemento resistente al ataque de los sulfatos del medio ambiente.

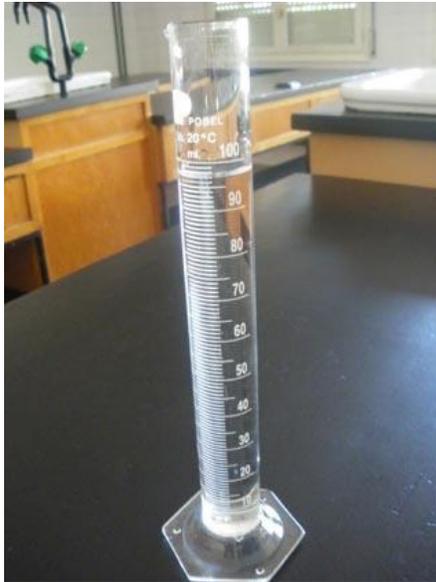
Impermeabilidad: Siguiendo todos los cuidados en la elaboración, transporte, colocación y acabado del concreto, ayuda a reducir la cantidad de poros en el mismo, disminuyendo la penetración de los agentes agresivos, como las sales marinas, aguas negras, suelos salitrosos, etc.

Calor de Hidratación: Con Clinker característico, junto con los cementantes suplementarios, genera menor cantidad de calor al hidratarse, por lo que se califica cemento de bajo calor de hidratación, con lo que minimiza las expansiones térmicas y disminuye significativamente la aparición de grietas.

Segregación, Sangrado, Plasticidad y Cohesión: La finura y la mejor distribución de tamaños de las partículas del cemento contribuyen a lograr un menor sangrado y menor segregación en el concreto, obteniéndose una mayor cohesividad con los agregados.

- **Agua**

En la figura 5 se muestra el agua potable utilizada que resulta de manera satisfactoria en el mezclado del mortero.



**Figura 5 Agua potable para la mezcla**

Sin embargo hay que tener en cuenta que cuando los contaminantes e impurezas presentes en el agua son excesivos, pueden afectar no solo la resistencia del mortero sino también el tiempo de fraguado, la deposición de sales blancas en la superficie del mortero y la corrosión del acero de refuerzo en los paneles de ferrocemento.

En general el agua de mezclado raramente es un factor en la resistencia del mortero, aunque en las especificaciones para elaborar mezclas la calidad del agua se determina por la condición de que el agua deberá ser adecuada para el consumo humano.

- **Agregado aligerante**

Investigación y recolección de aligerante en empresas o industria generadoras de residuos de poliestireno expandido principalmente en forma de desperdicio de embalaje. Como se muestra en la figura 6 el material tiene diversas formas y tamaños pero se obtiene relativamente limpio después de haber sido desechado



**Figura 6 EPS de desecho de embalaje**

#### Efecto de la temperatura en la conductividad térmica

La conductividad térmica para productos de edificación se declara a una temperatura media de 10 °C. Para productos empleados en equipamientos de edificios pueden ser de interés otras temperaturas medias.

#### Mecanismo de transferencia de calor

El mecanismo de transferencia de calor de una plancha de aislamiento térmico como el EPS puede dividirse en tres componentes:

- Conductividad
- Radiación
- Transferencia de masa

Las curvas para la densidad de 20 kg/m<sup>3</sup> y 30 kg/m<sup>3</sup> pueden calcularse como sigue:

Para los productos de construcción, la conductividad térmica se mide a 10°C, para equipamiento e instalaciones, se debe medir a diferentes temperaturas (al menos tres) para establecer la curva de conductividad térmica del rango de temperatura declarado. Es claro que la conductividad térmica varía con la temperatura. A menor temperatura, menor conductividad térmica.

#### Efecto de la humedad en la conductividad térmica

El cambio de la conductividad térmica por cada 1% de contenido de agua es del orden del 3%. En la práctica el contenido de agua en las aplicaciones habituales del EPS no supera el 0,1%. El valor práctico de cambio de la conductividad térmica debido al contenido de agua es del orden de 0,4%.

#### Reacción al fuego

A exposición constante de temperaturas por encima de 100 °C, el EPS comienza a ablandarse y arrugarse y finalmente se funde. Si se sigue exponiendo al calor, se forman por descomposición productos gaseosos combustibles.

Si estos pueden o no incendiarse por una llama o chispa depende en gran medida de la temperatura, duración de la exposición al calor y el caudal de aire alrededor del material (disponibilidad de oxígeno).

El EPS fundido normalmente no arde por chispas de soldadura o brasas de cigarrillos; sin embargo, las pequeñas llamas harán arder fácilmente al EPS de grado estándar a menos que contenga aditivos retardantes de la llama

(EPS-SE). Cuando se exponen a una fuente de fuego los productos de la descomposición del aditivo causarán el sofocamiento de la llama de forma que cuando se elimina la fuente el EPS-SE no continuará ardiendo.

Cuando se ensaya según ASTM D 1929, la temperatura de ignición en presencia de una llama piloto del EPS grado estándar es 360 °C y el del EPS-SE es 370 °C. Estos valores indican que, cuando el EPS fundido se descompone, los gases inflamables solo se forman a 350 °C o más. En ausencia de llama piloto, la temperatura de autoinflamación del EPS fundido es 450 °C.

En la figura 7 se observan los espacios donde había EPS pero al calcinarse por una temperatura de 110°C el EPS prácticamente desaparece.



**Figura 7 Fundición del EPS dentro del mortero por temperatura 110°C**

### **III.1.3 Triturado**

En el proceso de triturado convencional se utiliza un triturador en un medio acuoso.

A diferencia de este proceso en esta tesis se utiliza un triturado en seco por medio de un extractor (figura 8), presentando beneficios a la hora del secado y sin dependencia del clima (humedad y precipitación)



**Figura 8 Triturador adaptado para trabajar con EPS**

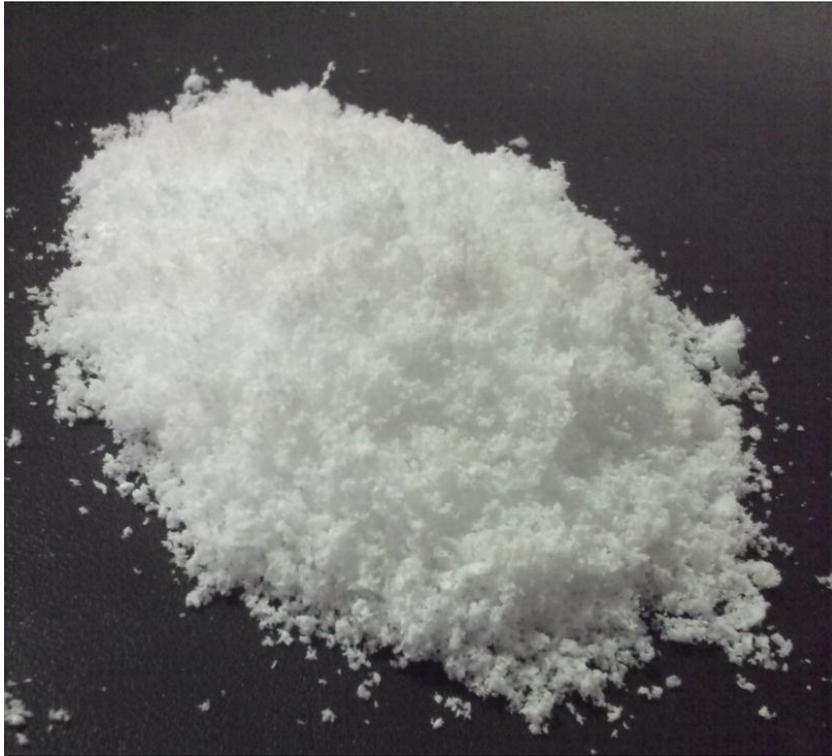
Piezas de poliestireno expandido: materia prima del panel, el EPS se tritura en seco dentro de una trituradora domestica que procesa  $700\text{cm}^3$  de EPS por hora y resulta en 3 granulometrías diferentes este tiempo está determinado por la capacidad del aparato así como de las condiciones de retenido. El aspa giratoria produce partículas que van de los 0.5 a los 4mm.



**Figura 9 Triturado domestico con triturador en seco. La primera fase es el triturado, después el producto pasa por un conducto hasta un contenedor de almacenaje**

En la figura 9 se muestra como trabaja el extractor. Por medio de las aspas el extractor pulveriza el EPS. A continuación el EPS pasa por un conducto sellado hasta un filtro de aire el cual deja salir el aire manteniendo el EPS triturado

dentro para su contención. El producto final es un triturado de EPS como se muestra en la figura 10. El producto triturado genera la mayor parte entre 2-4mm de partícula. Los pedazos que no alcanzan a triturarse completamente son vueltos a procesar, con lo que se tiene un proceso sin residuos.



**Figura 10 Producto obtenido de la trituración del EPS**

#### **III.1.4 Equipos**

Los equipos utilizados en esta tesis fueron:

- Máquina universal
- Trituradora
- Tamices y equipo de mezclado
- Moldes para especímenes

- **Máquina universal**

En ingeniería se denomina máquina universal a una máquina semejante a una prensa con la que es posible someter materiales a ensayos de tracción y compresión para medir sus propiedades. La presión se logra mediante placas o

mandíbulas accionadas por tornillos o un sistema hidráulico. Esta máquina es ampliamente utilizada en la caracterización de nuevos materiales.

Tiene dos platinas, una fija (arriba) y una móvil (Abajo). Es de tipo electrónico y dependiendo de la aproximación requerida se tienen diferentes capacidades: 3, 7, 15, 30, 75 y 120 toneladas como capacidad máxima.

### III.1.5 Desarrollo experimental

El desarrollo experimental se comprende principalmente de dos etapas

- 1) Caracterización de mortero con proporciones de EPS triturado
- 2) Prueba de elementos (paneles de ferrocemento)

Lo anterior aplicado a cada una de las tres granulometrías y tres porcentajes de adición de EPS triturado

**Tabla 3 Granulometrías de EPS triturado y tamizado**

Nombre	Granulometría
EPSf	0.6-1.18mm
EPSm	1.18-2mm
EPSg	2-4mm

### III.1.6 Elaboración de mortero

El mortero en el ferrocemento es la parte encargada de dar rigidez y resistencia a la compresión. Las normas del ACI del ferrocemento toman en cuenta que el mortero es el que toma toda la resistencia a la compresión mientras que el acero la resistencia a la tensión.

Para la determinación de la resistencia a la compresión se hizo un conjunto de pruebas para las 3 granulometrías presentadas de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2006, la cual determina la resistencia a la compresión de cementantes. Para cada granulometría se hicieron especímenes

de control, 20%, 40% y 60% de adición de EPS para determinar cada punto con 3 especímenes.

Para la inclusión de EPS de desecho al mortero se realizaron sustituciones de cemento con diferentes porcentajes de volumen con EPS en porcentajes de 20, 40 y 60%. Para estos especímenes se les determinó la resistencia a la compresión y los resultados se compararon con la mezcla de control (0% adición de EPS) para determinar la conveniencia de elegir una granulometría en específico para la elaboración de los paneles de ferrocemento ligero. La tabla 4 muestra la batería de pruebas que se realizaron con las diferentes sustituciones y edades de curado.

**Tabla 4 Batería de pruebas de mortero con adición de EPS fino, medio y grueso**

Material de Sustitución	Mezclas	Relación (agua-cemento-EPS)	Días de edad		
			7	14	28
<b>Pasta (agua-cemento)</b>	Control	100:0	3	3	3
<b>EPSg</b>	20% adición	80 :20	3	3	3
	40% adición	60 : 40	3	3	3
	60% adición	40 : 60	3	3	3
<b>EPSm</b>	20% adición	80 :20	3	3	3
	40% adición	60 : 40	3	3	3
	60% adición	40 : 60	3	3	3
<b>EPSf</b>	20% adición	80 :20	3	3	3
	40% adición	60 : 40	3	3	3
	60% adición	40 : 60	3	3	3

La norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2006 indica que se tienen que determinar 3 especímenes por prueba, por edad por granulometría.

Las mezclas de mortero consistieron en cemento y agua en una relación a/c de 0.45. Las sustituciones fueron hechas por volumen, a diferencia de otras pruebas que se determinan por peso, en este caso por ser el EPS un material

aligerante no puede relacionarse por peso. Las sustituciones por volumen fueron a 20 40 y 60%

**Tabla 5 Pesos y proporciones de elaboración de mortero**

Adición %	cemento (gr)	EPS (gr)	a/c	agua (ml)	Absorción EPS (ml)	Especímenes
0.00	2004.00	0.00	0.45	901.80	0.00	9.00
20.00	1603.20	11.10	0.45	721.44	6.66	9.00
40.00	1202.40	22.20	0.45	541.08	13.32	9.00
60.00	801.60	33.30	0.45	360.72	19.98	9.00

Esta tabla 5 nos indica que para realizar 9 cubos de mortero de control, se requieren 2004gr de cemento. Para que la relación a/c sea igual a 0.45 es necesario agregar 900ml de agua. En el caso de las siguientes adiciones se agrega una pequeña cantidad de agua relacionada con la absorción del EPS que es de 5.9% para no afectar la relación agua cemento.



**Figura 11 Materiales de preparación de mortero. Cemento y EPS a 20% de sustitución**

Como se puede observar en la figura 11 el poliestireno expandido tiene un volumen mayor que la suma de los otros componentes de la mezcla

El material fue mezclado en una charola con ayuda de una espátula hasta obtener una mezcla totalmente homogénea (figura12).

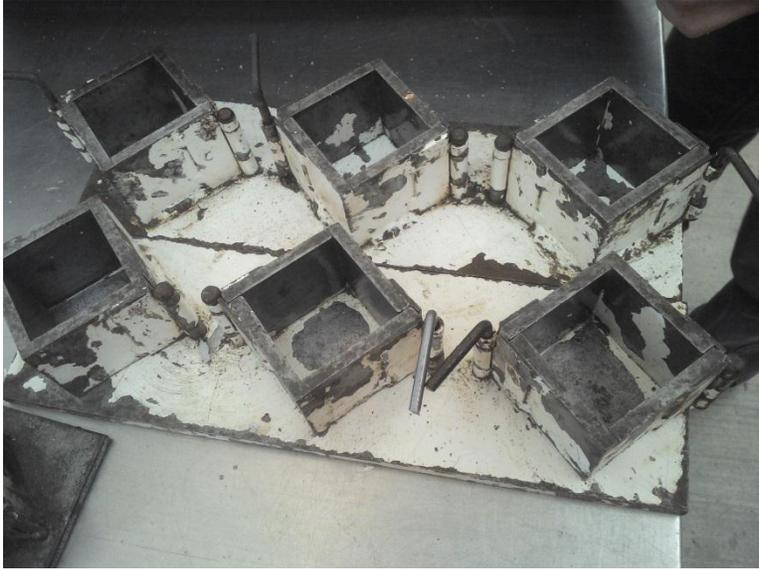
Como se puede observar la mezcla es homogénea y el EPS no se nota a simple vista ya que se encuentra completamente homogeneizado.



**Figura 12 Izquierda: mezcla separada. Derecha Mezcla homogénea en el ya no se nota el EPS**

### **III.1.7 Elaboración de especímenes**

Una vez hechas las mezclas de mortero se procedió a llenar los moldes de acero inoxidable (figura 13) que cumplen con las dimensiones especificadas (ASTM C 109M, 2002), que previamente fueron cubiertos con aceite para facilitar el paso de desmolde. Una vez que se llenaron los moldes (figura 14) fueron mantenidos a la intemperie para el adecuado fraguado, se dejaron fraguar durante 24 horas para después ser desmoldados, marcarlos y colocarlos en la cámara de curado (figura 15).



**Figura 13 Moldes para la elaboración de cubos de mortero**



**Figura 14 Mezcla de mortero en molde de fraguado**

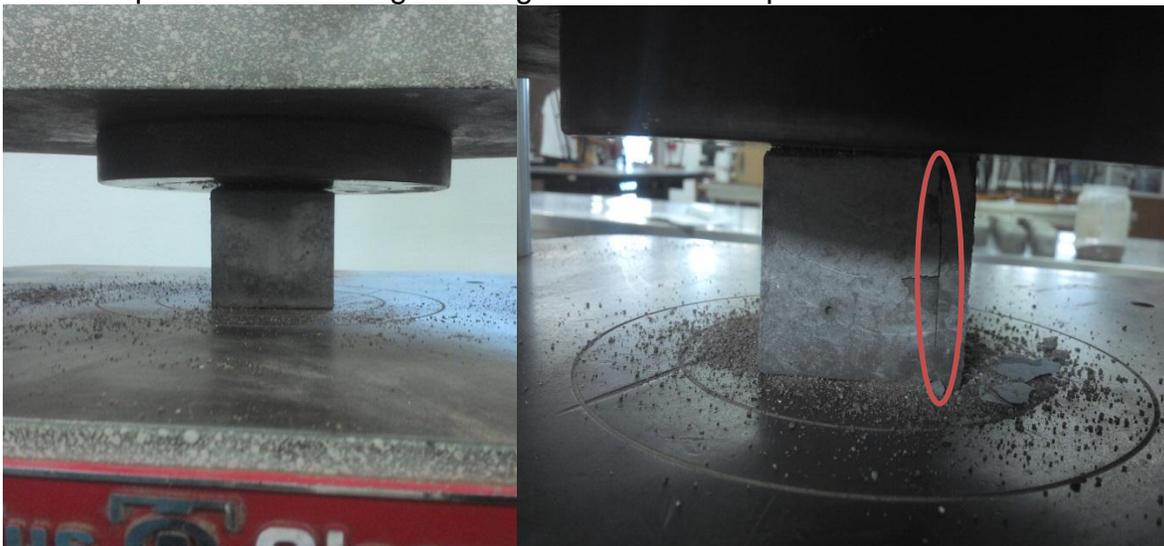


<b>40% adición</b>	140.63	1125.01	179.50	1436.00	192.39	1539.12
<b>60% adición</b>	128.18	1025.44	149.65	1197.22	162.23	1297.81



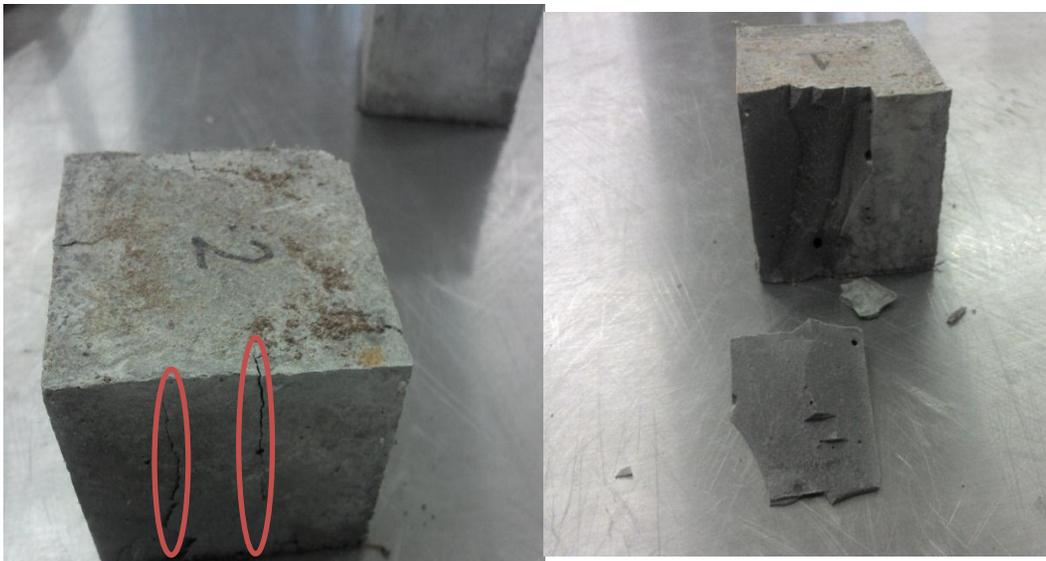
**Figura 16 Pesaje de cubos de mortero**

Los cubos fueron colocados en la máquina de pruebas añadiendo una capa de arena en la parte superior para así garantizar una carga uniforme sobre el cubo en caso de que este tuviese alguna irregularidad en la superficie



**Figura 17 Especímenes a compresión simple en Máquina universal, con arena para mantener la uniformidad. Se muestran las grietas a los costados de los cubos**

Para empezar la prueba de compresión se ajusta la platina de prueba con el cubo y se empieza a aplicar la carga a una velocidad constante hasta producir la falla. Los resultados son arrojados en kg.f que más tarde deberán ser traducidos a  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . La máquina muestra en su display el incremento de carga constante, aunque cuando se producen las primeras fisuras en los especímenes los valores empiezan a descender y después vuelven a recuperarse los valores hasta llegar al punto en donde ya no se puede aplicar más carga y empieza el descenso de manera dramática en el display.



**Figura 18 Grietas perpendiculares a la aplicación de la carga. A la derecha desprendimiento en cubo de 0% de EPS por comportamiento frágil**

Se probaron 3 especímenes por cada sustitución hecha para obtener un promedio y poder realizar las gráficas correspondientes de resistencia a la compresión contra edad del espécimen.

### III.2 Paneles.

Ya que se determinaron las características del mortero se procede a elaborar los paneles de ferrocemento con la granulometría que arrojó los mejores resultados. El análisis de los paneles se determina por medio de la elaboración de especímenes de 30x30x5cm utilizando los materiales mostrados a continuación, se prueba la compresión por medio del equipo presentado continuación y se hacen las pruebas mostradas en el diagrama (figura 19).

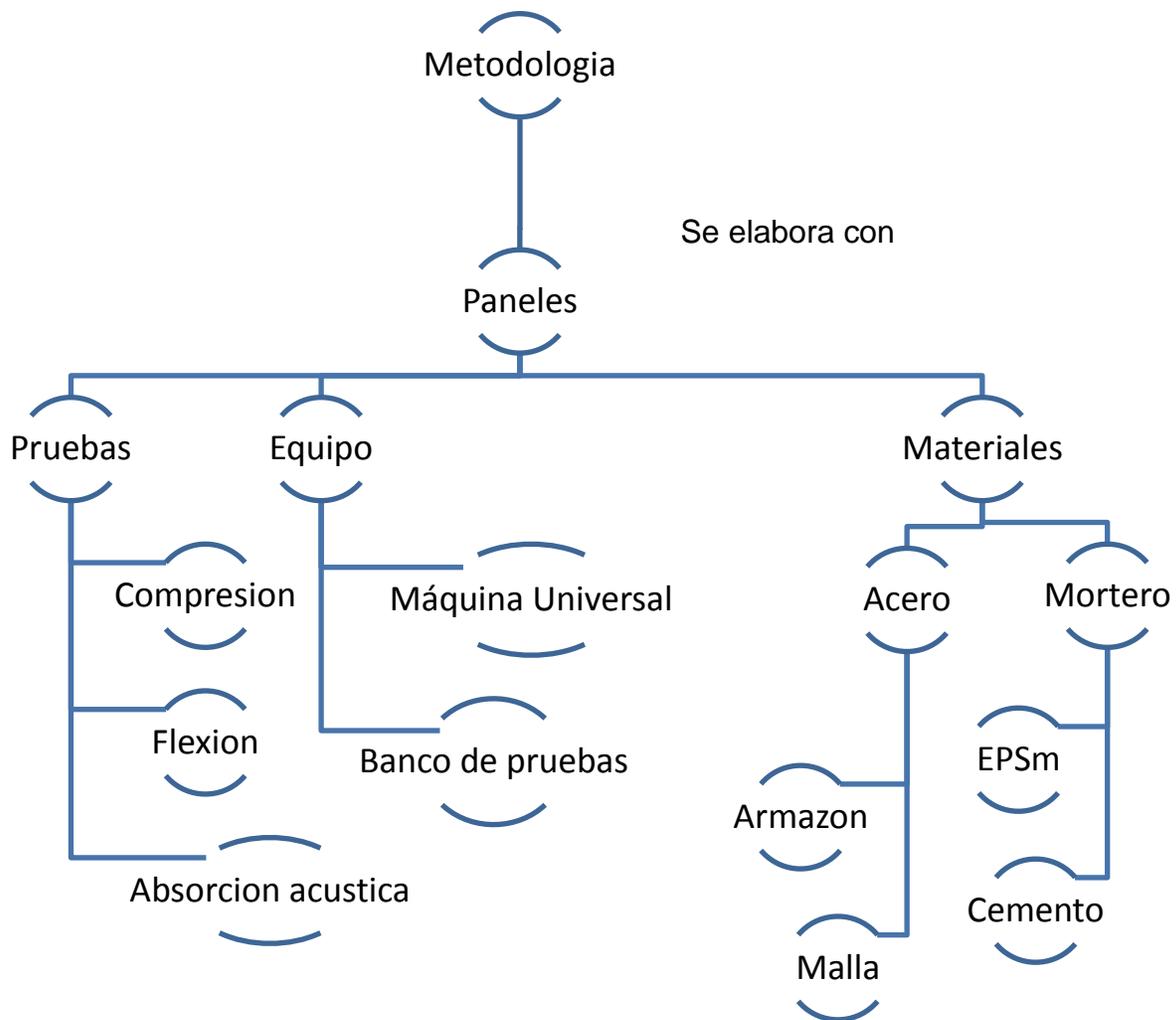


Figura 19 Diagrama de flujo de metodología de paneles de ferrocemento Adicionado con EPS de desecho

### III.2.1 Materiales

Los materiales para elaborar los paneles ligeros de ferrocemento fueron:

- Mortero utilizado para las pruebas de mortero mostradas en la sección pasada con poliestireno expandido de la granulometría de EPSm (1.18-2mm), acero de refuerzo, varilla N°3 y malla 8x8mm.
- El agregado de poliestireno expandido (EPS) reciclado fue el que se obtuvo de la trituración del EPS obtenido, como residuo de embalaje en las empresas gestoras (Fig. 20)
- Aglomerante: para los paneles se utilizó cemento tipo II en diferentes proporciones



**Figura 20** Producto de desecho de empresas de embalaje. Derecha molde para paneles de 30x30x5.5cm

- Molde de panel: Este molde permite obtener paneles de espesor de 30cm x 30cm y 5.5cm de espesor (Fig.20)
- Acero de armazón: se utilizó varilla corrugada 3/8"  $f_y=4200\text{kg/cm}^2$  que se utiliza para dar la forma y soporte a la malla de acero (Fig. 21)



**Figura 21 Izquierda malla de acero 8x8 recortada a la medida. Derecha armazón rígido para sostener la malla**

- Malla de acero: malla de 8x8mm de apertura de orificios (Fig.21)

### **III.2.2 Equipos**

Los equipos utilizados en esta tesis fueron:

- Máquina universal
- Trituradora
- Tamices y equipo de mezclado
- Moldes para especímenes

#### **Máquina universal**

En ingeniería se denomina máquina universal a una máquina semejante a una prensa con la que es posible someter materiales a ensayos de tracción y compresión para medir sus propiedades. La presión se logra mediante placas o mandíbulas accionadas por tornillos o un sistema hidráulico

### **III.2.3 Elaboración del mortero**

Para el mortero de los paneles se tomó la granulometría media. La batería de pruebas de paneles de ferrocemento ligero se hizo adiciones de EPS de 40 y

60% aparte del panel de comparación de 0% de EPS. Se omitió la adición de 20% ya que a partir de 40% las características en el mortero dieron las mejores características y el menor peso posible sin llegar a la disgregación más allá del 60% de adición de EPS. La tabla 7 muestra la cantidad de especímenes, la sustitución con la que elaboran y los días de curado.

**Tabla 7 Batería de pruebas de mortero con adición de EPS fino, medio y grueso**

Material de Sustitución	Mezclas	Relación (mortero- EPS)	Días
			28
Pasta (agua-cemento)	Control	100:0	3
EPSm	40% adición	60 : 40	3
	60% adición	40 : 60	3

Las mezclas de mortero consistieron en cemento y agua en una relación a/c de 0.45. Las sustituciones fueron hechas por volumen, a diferencia de otras pruebas que se determinan por peso, en este caso por ser el EPS un material aligerante no puede relacionarse por peso. Las sustituciones por volumen fueron a 40 y 60% a 28 días de curado como se muestra en la tabla 8.

**Tabla 8 Dosificación de materiales para paneles de ferrocemento**

Adición %	cemento (gr)	EPS (gr)	a/c	agua (ml)	Absorción EPS (ml)
0.00	8350.00	0.00	0.45	3757.50	0.00
20.00	6680.00	46.25	0.45	3006.00	27.75
40.00	5010.00	92.50	0.45	2254.50	55.50
60.00	3340.00	138.75	0.45	1503.00	83.25

### III.2.4 Elaboración de paneles

El mortero se hace de la misma manera que los cubos de mortero con la única diferencia de que la magnitud de los materiales es mucho mayor



**Figura 22 Material para elaborar paneles. Izquierda panel con 40% de EPS. Derecha panel de ferrocemento con 60% de EPS**

Como se puede ver en la figura 22 los porcentajes de adición son tales que con un volumen de 40% de adición, izquierda, y un 60% de adición, derecha, el EPS cubre completamente cualquier otro material. Pero al mezclarlos de una manera homogénea el EPS se adhiere perfectamente al cemento y provoca que no se note la cantidad de EPS contenido en la mezcla figura 23.



**Figura 23 Mezcla de mortero para paneles ya homogéneo**

Después de haber elaborado el mortero se procede a verter dentro del molde junto con el armazón y la malla incluida en él como se muestra en la figura 24.



**Figura 24 Colocación de malla de acero para panel. Vertido de mortero dentro de los moldes**

El proceso de compactado consiste en introducir una varilla punta de bala en la mezcla mientras se vierte el mortero en 3 capas. Al concluir se golpea levemente el molde con un martillo de goma para evitar las burbujas (figura 25).



**Figura 25 Compactación de mortero dentro de molde**

Una vez hechas las mezclas de mortero se procedió a llenar los moldes de 30x30x5.5cm que previamente fueron cubiertos con aceite para facilitar el paso de desmolde (figura 26). Una vez que se llenaron los moldes fueron mantenidos a la intemperie para el adecuado fraguado, se dejaron fraguar durante 24 horas

para después ser desmoldados, marcarlos y colocarlos en la cámara de curado (figura 26).



**Figura 26 Desmoldado de paneles a partir del molde desarmable. Curado de paneles dentro de cuarto de curado**

Después de 28 días se retiran de la cámara de curado para secarlos y pesarlos (figura 27). Después se preparan para las pruebas en este caso de compresión



**Figura 27 Pesaje de paneles ya curados de antes de la prueba de compresión.**

Para las pruebas de compresión, el panel debe de estar uniforme en sus caras para lo cual se procede a agregar, como se muestra en la figura 28 se vierte una capa de azufre en una de sus caras disperejas, a esto se le llama cabeceado, donde se funde el azufre en una estufa y se procede a verter en un molde para dejarlo uniforme.



**Figura 28 Izq. Nivelación de panel para el vertido de azufre líquido. Der. Panel cabeceado con azufre**

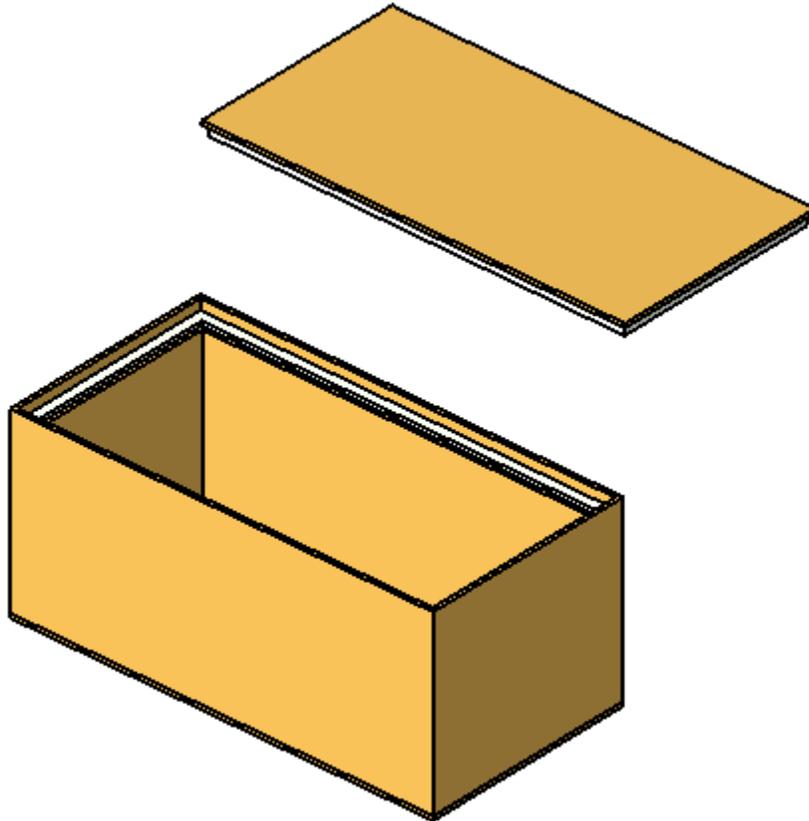
En la figura 29 se muestra el equipo para la prueba de compresión. Se utilizó una máquina universal de 50ton de capacidad



**Figura 29 Máquina Universal y panel a compresión**

### III.3 Banco de pruebas

Para esta investigación fue necesaria la realización de una caja especial que hiciera más sencilla la valoración acústica del prototipo del panel de ferrocemento ligero como se muestra en la figura 30. Esta caja tiene unas condiciones de insonorización especiales. La caja está construida con MDF (Medium density fiberboard) y poliestireno expandido de alta densidad



**Figura 30 Isométrico de banco de pruebas para aislamiento acústico**

Debido a las propiedades del sonido y su forma de propagación, esta caja tiene las mismas condiciones en cada uno de sus lados, dos láminas de MDF de 0,005m y entre ellas una lámina de 0,05m de poliestireno expandido, haciendo así más fácil la valoración de absorción acústica del panel

El panel de ferrocemento se coloca a la mitad del banco de datos y la fuente de sonido del lado contrario y se procede a sellar. La figura 31 muestra el banco de pruebas aislado y antes del sellado superior.



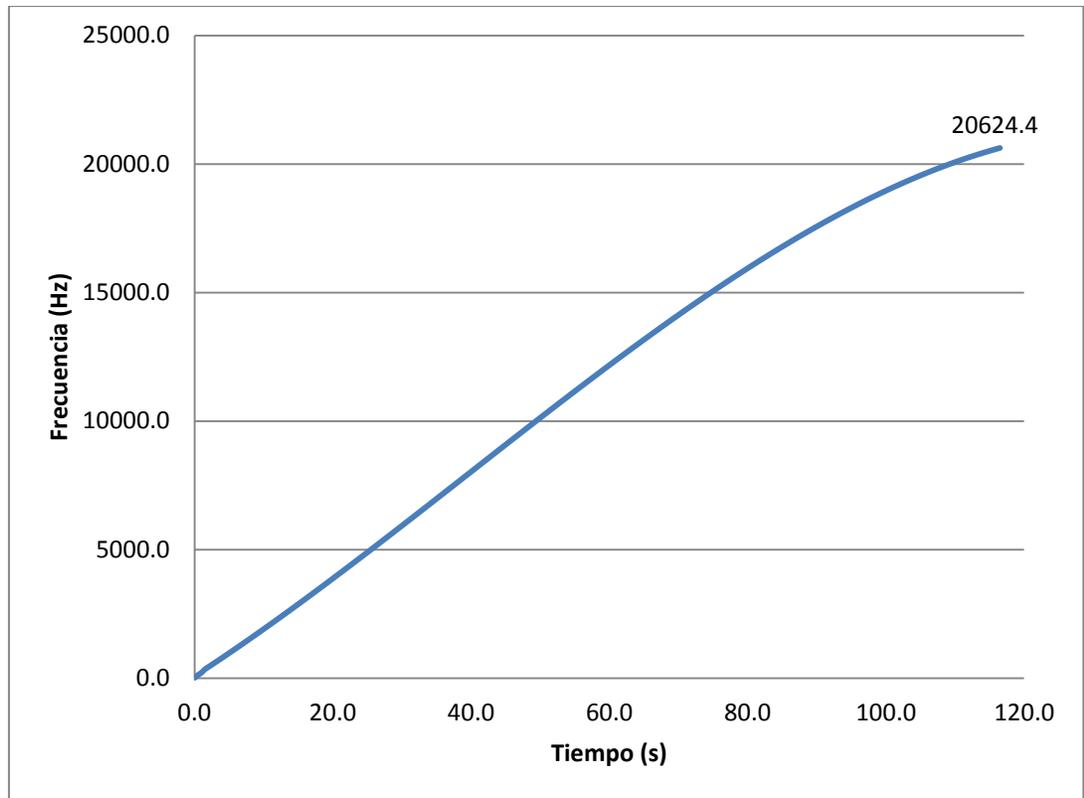
**Figura 31 Banco de pruebas para pruebas acústicas**

Al banco de prueba se le realizaron las respectivas pruebas acústicas para conocer su aislamiento acústico (del interior al exterior). Se probó un rango de frecuencias. La prueba consistía en emitir el sonido 2 veces durante 1 minuto y medio con el sonómetro en el exterior, y así encontrar los dB máximos del exterior.

### **III.3.1 Fuente de sonido**

Para la realización de las pruebas se reprodujo un rango de frecuencias de 20Hz a 20kHz para tener una mejor valoración de las cualidades acústicas del prototipo y tener claro con cual frecuencia tendría un mejor desempeño. Estos fueron probados y medidos con el fin de determinar su frecuencia y el máximo de dB que pueden alcanzar.

El medio de sonido es reproducido por bocinas a volumen constante y se registra por el sonómetro.



**Figura 32 Fuente de sonido que transmite de 20 a 20kHz**

La frecuencia va variando a través del tiempo de 0 a 20,000 en 116 segundos logarítmicamente.

### **III.3.2 Instrumento de medición**

Para la medición de las pruebas se utilizó como instrumento un sonómetro TPM-HER-400. Este instrumento de medición capta de 30 a 130 dB, en tres medidas: alto, medio y bajo, con una precisión de +/- 1.5 dB. Además de una medición rápida o lenta. Para las pruebas realizadas en esta investigación, el sonómetro se programó en una velocidad de medición lenta y con una captación de 30 a 130 dB.



Figura 33 Medidor de Nivel de Sonido Sonómetro de 30-130 Decibeles TPM-HER-

400

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### IV.1 Propiedades físicas

El estado fresco del mortero es cuando parece masa, es blando y puede ser trabajado o moldeado en diferentes formas

Una propiedad del estado fresco es la trabajabilidad y cohesividad. El mortero que se va a utilizar para los paneles de ferrocemento es necesario que el mortero en estado fresco pueda adherirse a la malla de acero.

#### Diseño de mezclas

El diseño de las mezclas se realizó con mortero a base de cemento agua y sustitución de EPS por volumen de pasta, quedando el proporcionamiento como se muestra en la tabla. Las mezclas se sustituyeron EPS en 20, 40 y 60% de la cantidad de cemento por volumen

#### Propiedades en estado endurecido

El estado endurecido es después de que el concreto ha fraguado y empieza a ganar resistencia y se endurece. Las propiedades más importantes del concreto endurecido son la resistencia y durabilidad

#### Densidad, absorción y porcentaje de vacíos

Al agregar EPS al mortero este se aligera, en el caso se agregar 60% de sustitución en volumen del mortero la densidad disminuye tanto que se vuelve menos denso que el agua en estado seco.

**Tabla 9 Características físicas de mortero. Densidad absorción y porcentaje de vacíos después de inmersión**

	<b>Absorción después de inmersión %</b>	Absorción después de inmersión y cocido %	Densidad seco (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad después de inmersión (g/cm <sup>3</sup> )
<b>0% adición</b>	5.04	6.55	1.591	1.671
<b>40% adición</b>	6.99	11.08	1.244	1.331
<b>60%</b>	1.50	9.63	1.119	1.217

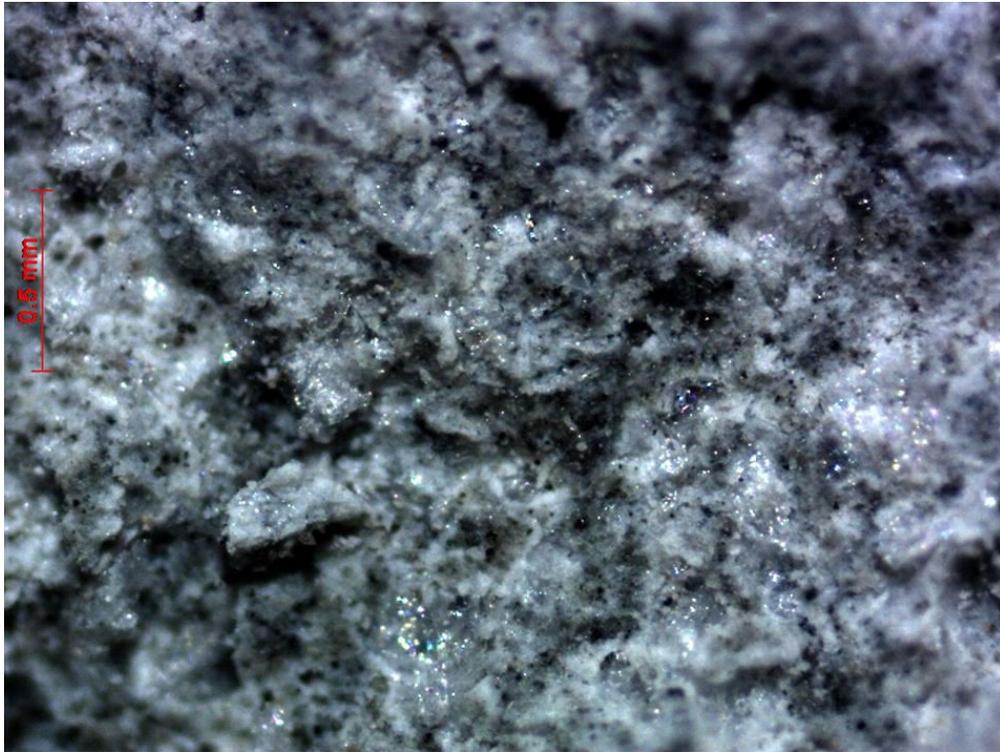
**adición**

	Densidad del agua (g/cm <sup>3</sup> )		
		Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen de espacio permeable poroso (vacíos) %
	Densidad después de inmersión y cocido (g/cm <sup>3</sup> )		
<b>0% adición</b>	1.695	1.776	10.43
<b>40% adición</b>	1.382	1.443	13.81
<b>60% adición</b>	1.314	1.355	11.57

Como se puede observar una absorción de 9.63% después del cocido para la adición de 60% de EPS, el panel de ferrocemento repele el agua y marca un porcentaje de vacíos del 11.57% lo que lo hace un material ligero, que al estar seco flota en el agua, se percibe que al sumergirlo la absorción del material de 60% solo absorbe un 1.5%

**Micrografías**

Como se puede observar en la micrografía el poliestireno no deja poros por los cuales el agua se infiltre y al ser hidrofóbico el agua superficial se elimina rápidamente.



**Figura 34 Micrografía de espécimen con 40% de sustitución de EPS**

Por otro lado al exponer el material a más de 100°C el EPS desaparece completamente dejando grandes poros en todo el material.



**Figura 35** Micrografía de espécimen con 40% de sustitución de EPS después de haber sido sometido a 110°C durante 24hrs

## IV.2 Resistencia a la compresión de mortero

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto se obtuvo siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C39.

En la figura se muestran los resultados obtenidos a 7, 14, 28 días a compresión, mostrando el promedio de los 3 especímenes por prueba. Se muestra la primera falla.

### IV.2.1 Granulometría media

La granulometría media está entre 1.18 y 2 mm de espesor. Se le hicieron pruebas a compresión de los especímenes para determinar la gráfica 34.

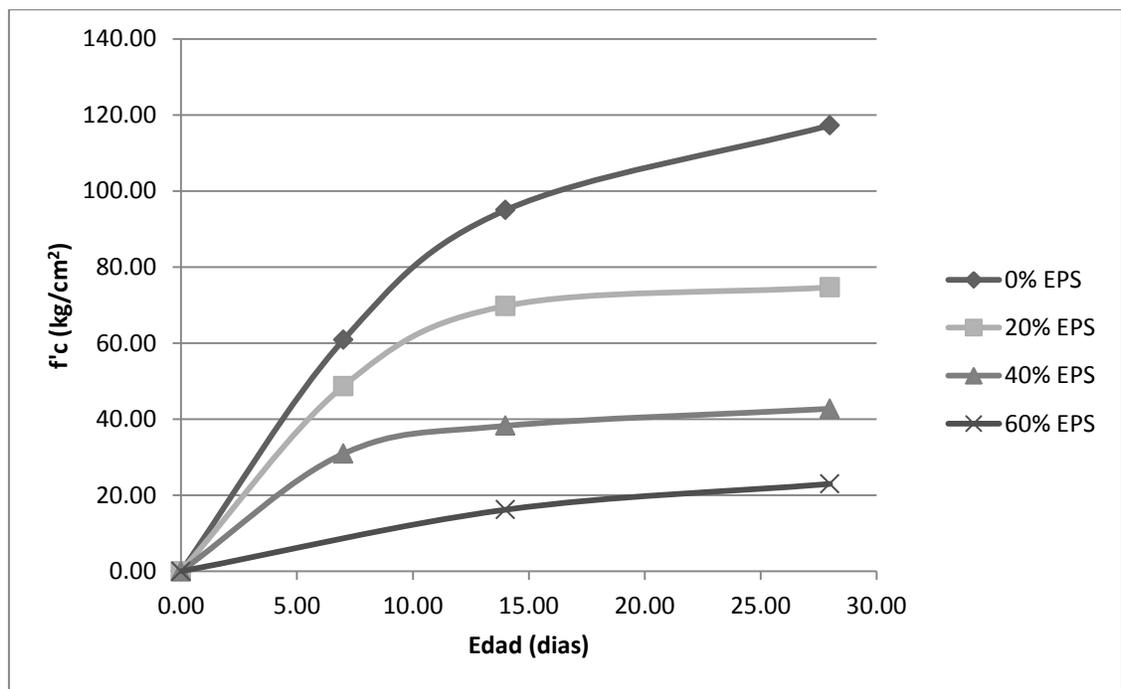


Figura 36 Resistencia a la compresión a primera falla de mortero con EPSm (1.18-2mm)

En la figura se muestra la resistencia a la compresión a última falla, antes de la falla catastrófica.

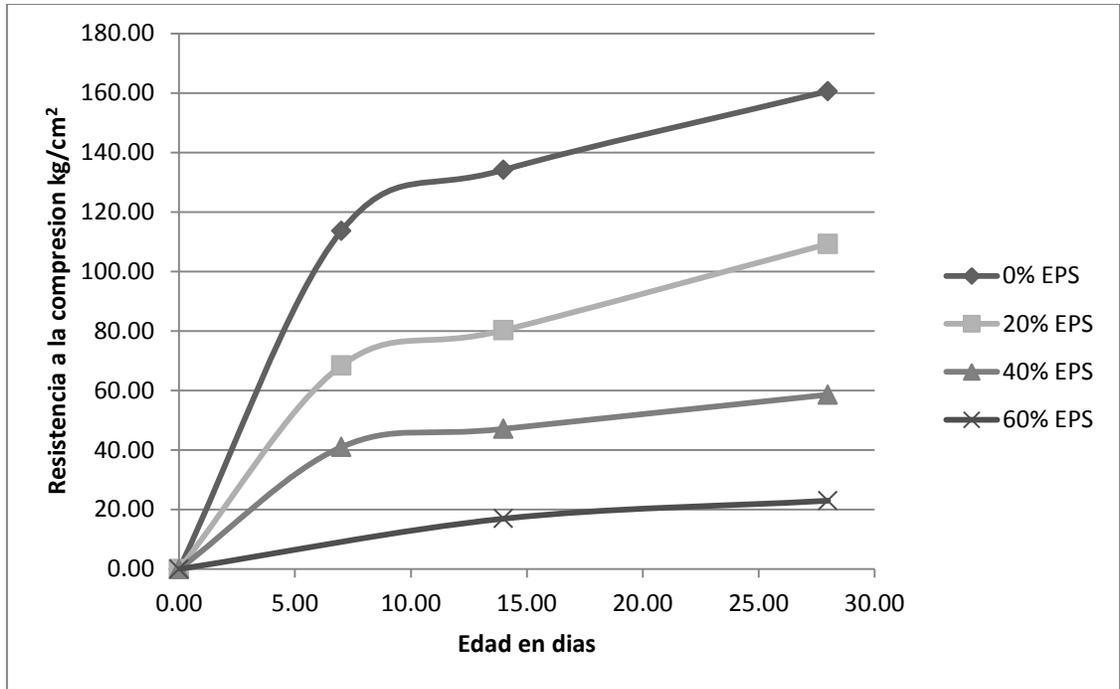


Figura 347 Resistencia a la compresión a última falla de mortero con EPSm (1.18-2mm)

#### IV.2.2 Granulometría fina

En la siguiente figura se muestra la resistencia a la compresión para la granulometría fina de 0.6 a 1.18mm

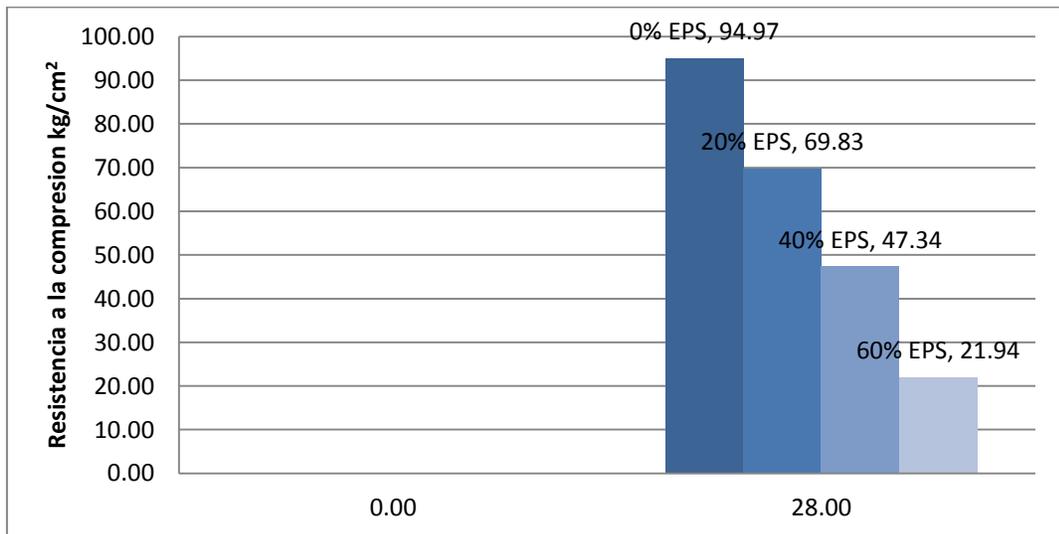


Figura 358 Resistencia a la compresión para la granulometría fina de 0.6 a 1.18mm

Resistencia a la compresión a primera falla de mortero con EPSf (0.6-1.18mm)

En la figura se muestra la resistencia a la compresión a última falla, antes de la falla catastrófica.

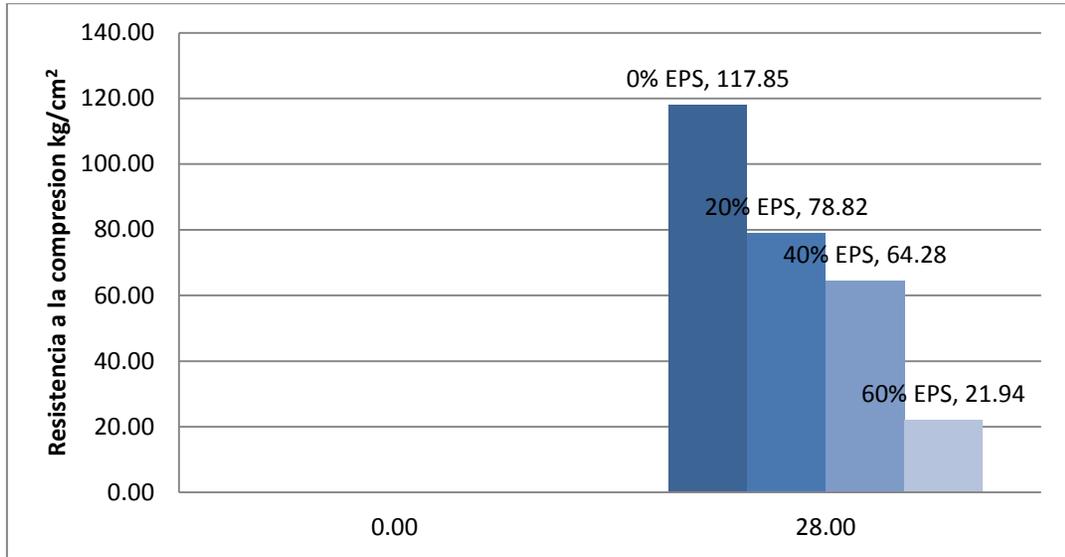


Figura 369 Resistencia a la compresión a ultima falla de mortero con EPSf (0.6-1.18mm)

#### IV.2.3 Granulometría gruesa

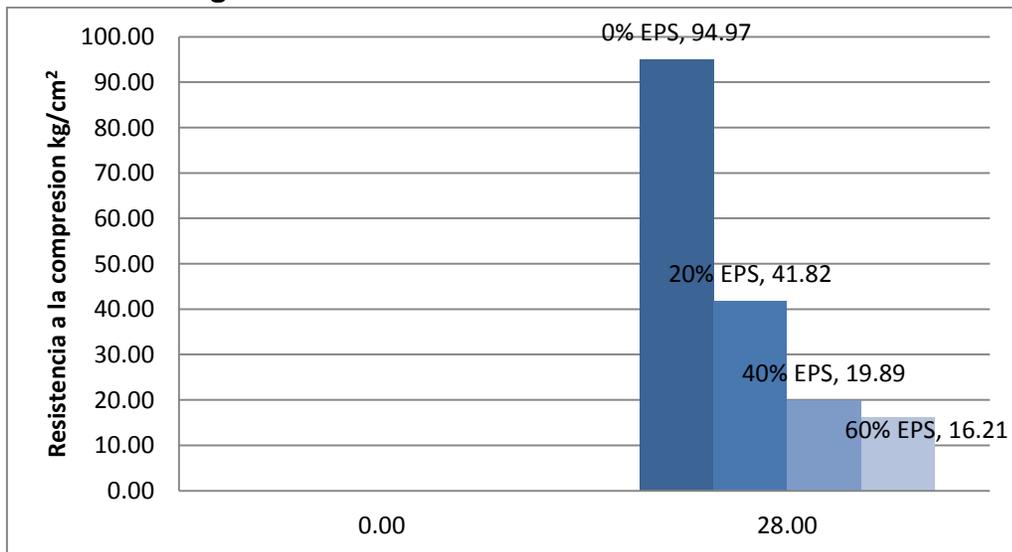
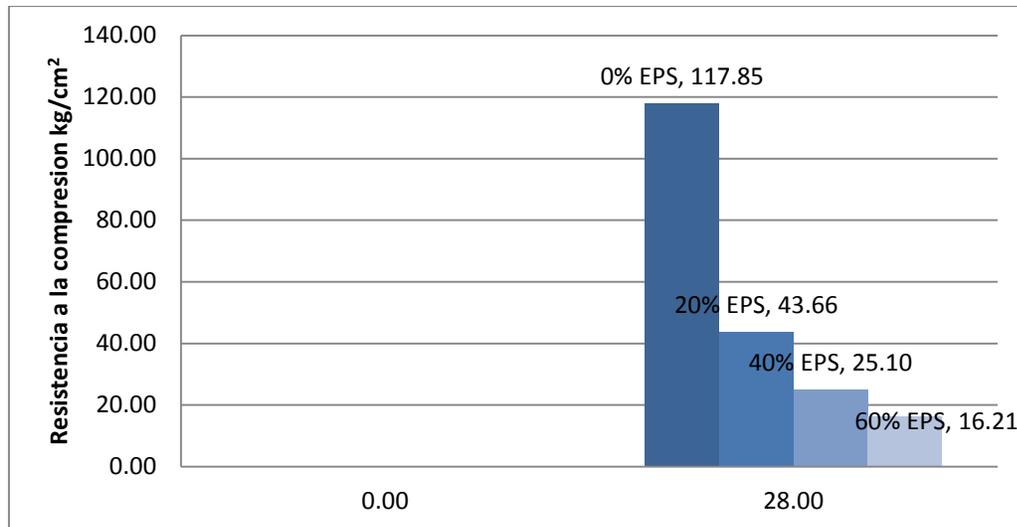


Figura 40 Resistencia a la compresión a primera falla de mortero con EPSg (2-4mm)



**Figura 41 Resistencia a la compresión a ultima falla de mortero con EPSg (2-4mm)**

La resistencia a la compresión para la granulometría gruesa de 2-4mm mostro una baja muy determinante, con respecto a los especímenes sin sustitución de EPS así como también menor a las sustituciones fina y media antes presentadas.

Según los resultados obtenidos a medida que se va incrementando el porcentaje de inclusión de EPS en el mortero se va disminuyendo la resistencia a la compresión debido a la disminución del aglomerante o cemento

Los resultados de pruebas de compresión la granulometría media y fina mostraron resultados similares.

De las granulometrías de poliestireno expandido triturado presentadas EPSf, EPSm, y EPSg la que mostro los mejores resultados de resistencia a la compresión fue la granulometría media de (1.18 a 2mm).

Lo cubos de mortero con adición de EPS mientras más porcentaje poseían la deformación del cubo era mayor. Esto se evidencio al momento de la falla el mortero con 0% de adición fallaba de forma frágil, en cambio el mortero de 60% de adición mostro mayor deformación sin mostrar desprendimiento significativo.

### IV.3 Resultados de paneles

#### IV.3.1 Resistencia a la compresión

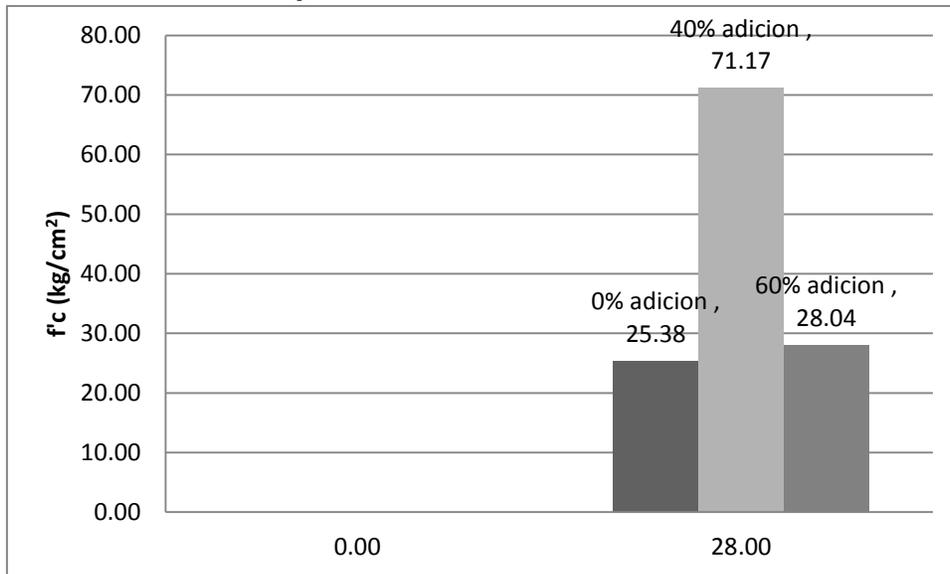


Figura 372 Primera falla de la resistencia a la compresión de panel de ferrocemento con diferentes adiciones de poliestireno expandido medio (1.18-2mm).

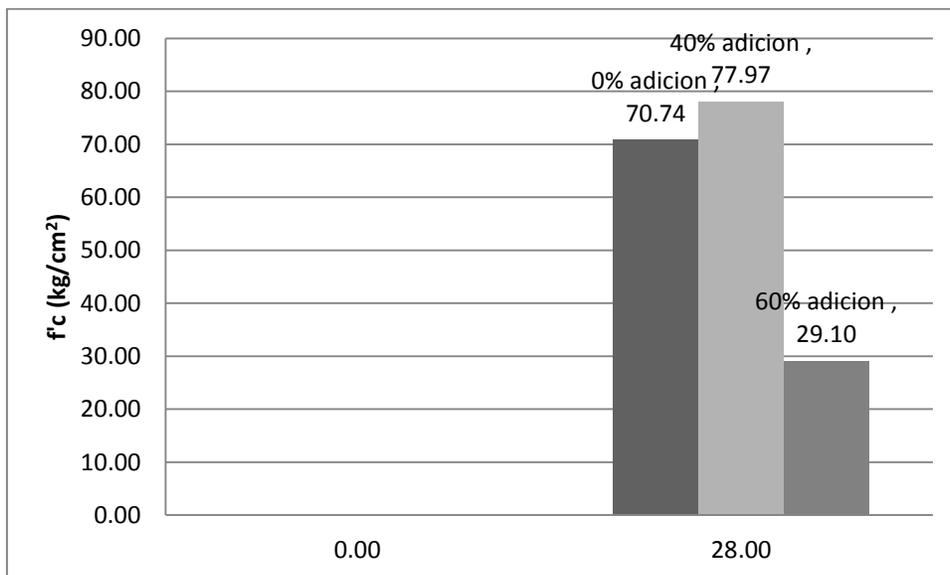


Figura 383 Última falla de la resistencia a la compresión de panel de ferrocemento con diferentes adiciones de poliestireno expandido medio (1.18-2mm).

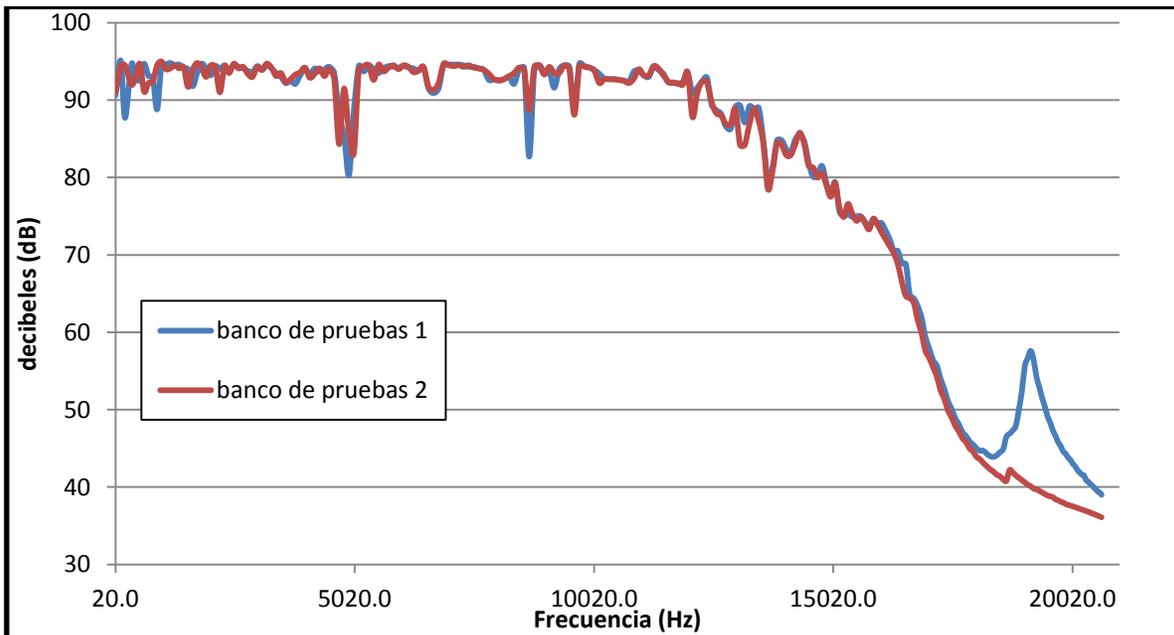
De los resultados de compresión para los paneles de ferrocemento, a diferencia de las pruebas de mortero, el panel con 0% de adición de EPS tuvo grietas en el estado endurecido, también la falla de este panel se presentó a los  $25\text{kg/cm}^2$  muy similar a los  $28\text{kg/cm}^2$  del panel de 60% de adición y mucho menor que los  $71\text{kg/cm}^2$  del panel de 40% de sustitución.



**Figura 394 Fallas de paneles de ferrocemento por compresión simple, se aprecia la falla perimetral del armazón de acero. 0, 40 y 60% de derecha a izquierda**

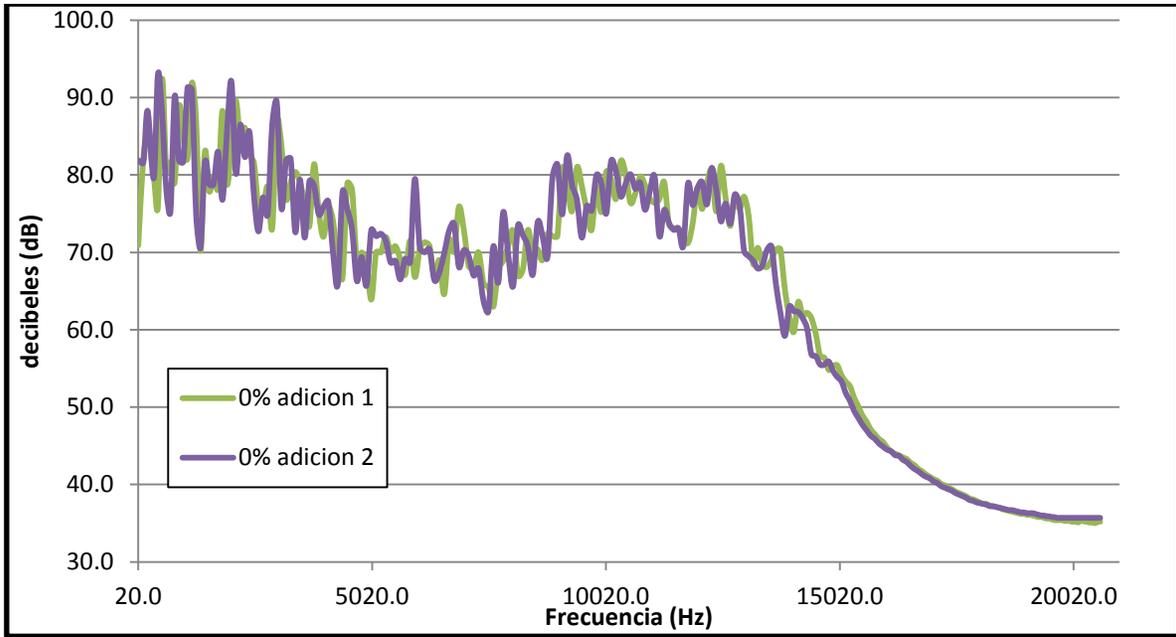
Las fallas en las pruebas a compresión se dieron en el armazón principalmente, en el perímetro interno del panel.

#### IV.4 Resultados acústicos



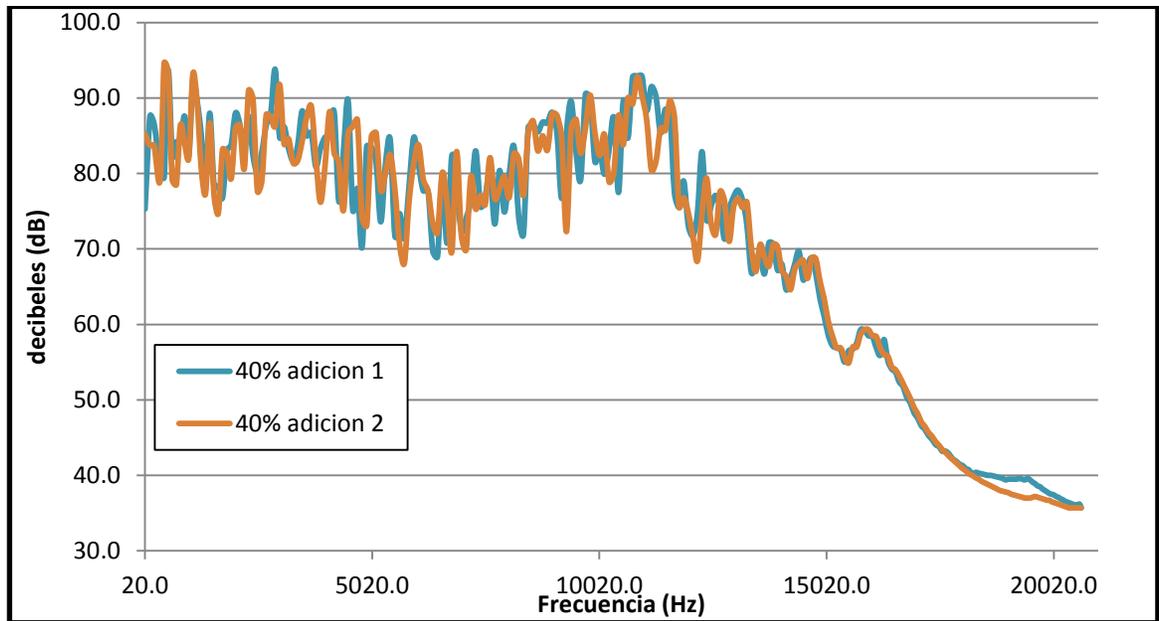
**Figura 405 Grafica de registro de fuente de sonido sin obstrucción**

Gráfico de determinación acústica por medio de sonómetro de una fuente de sonido de 20 a 20kHz dentro del banco de pruebas. Se logra notar una perturbación sobre el final del registro en línea azul. Esto se debe quizá a una perturbación ajena al estudio



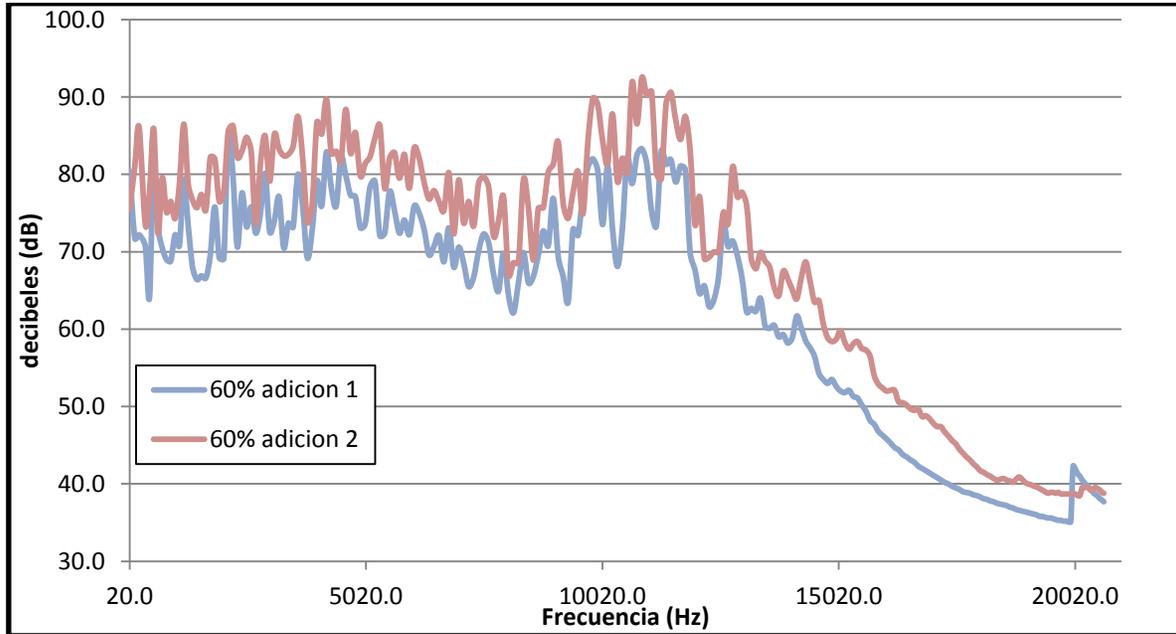
**Figura 416 Grafica de registro de absorción acústica en el banco de pruebas con paneles 0% de EPS**

Absorción acústica de panel de ferrocemento con 0% de adición de EPS por medio de sonómetro de una fuente de sonido de 20 a 20kHz dentro del banco de pruebas.



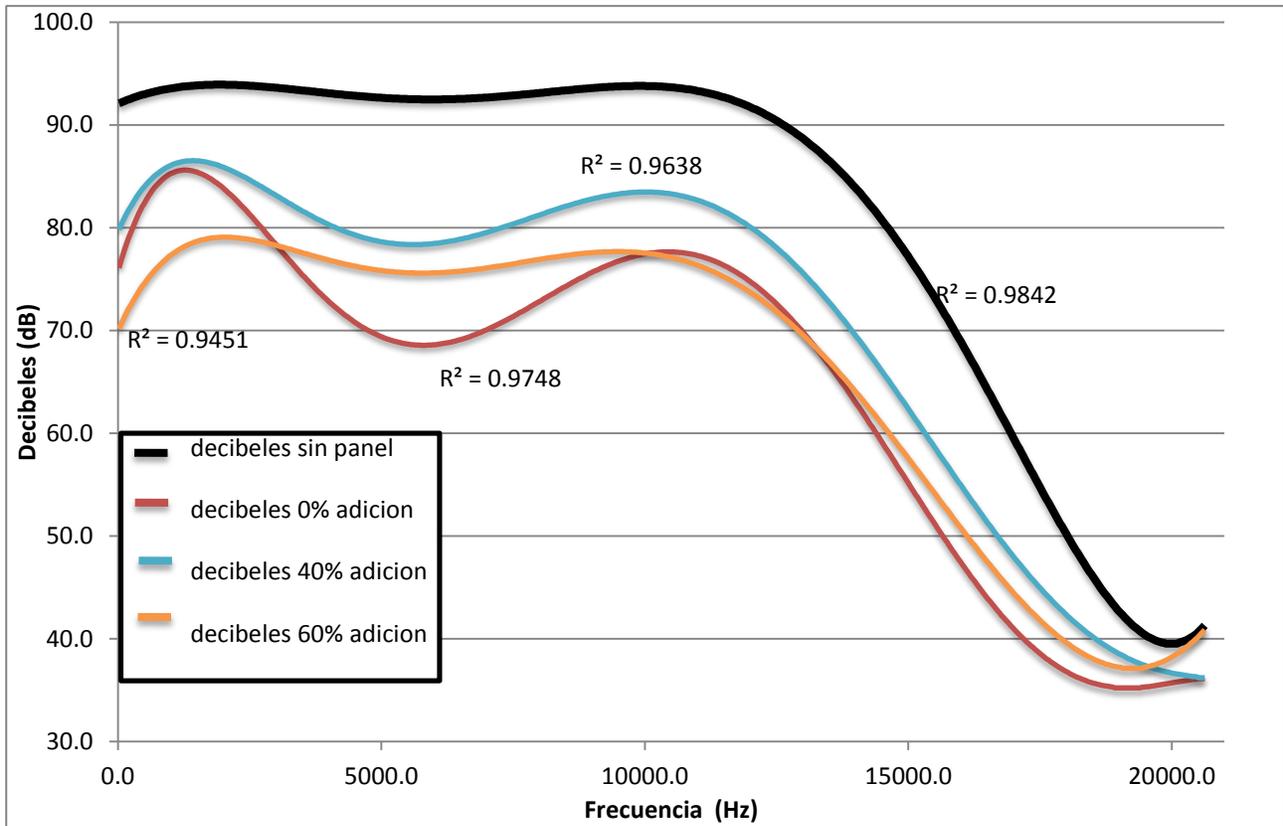
**Figura 427 Grafica de registro de absorción acústica en el banco de pruebas con paneles 40% de EPS**

Absorción acústica de panel de ferrocemento con 40% de adición de EPS por medio de sonómetro de una fuente de sonido de 20 a 20kHz dentro del banco de pruebas



**Figura 438 Grafica de registro de absorción acústica en el banco de pruebas con paneles 60% de EPS**

Absorción acústica de panel de ferrocemento con 60% de adición de EPS por medio de sonómetro de una fuente de sonido de 20 a 20kHz dentro del banco de pruebas. Se nota una diferencia entre las dos lecturas, probablemente debido a una perturbación ajena constante que eleva los decibeles de forma uniforme.



**Figura 49** Líneas de tendencia polinómica de sexto orden con relaciones mayores a 0.9 para el banco de pruebas y los paneles

Absorción acústica de panel de ferrocemento con diferentes adiciones de EPS por medio de sonómetro de una fuente de sonido de 20 a 20kHz dentro del banco de pruebas.

Las pruebas acústicas muestran que los paneles reducen el sonido como barrera en un espacio, como es lógico, pero la adición de EPS no presenta una mayor absorción acústica con respecto al panel que no cuenta con EPS.

Los paneles con adición de 40 y 60% de adición de EPS tienen un comportamiento muy parecido de absorción acústica

## V. CONCLUSIONES

Existe una correlación negativa entre el aumento en la dosificación del EPS y la resistencia a la compresión en los cubos de mortero. A medida que aumenta el contenido de EPS la resistencia disminuye.

A partir de una adición de 9% de adición de EPS el mortero se considera ligero ya que llega al peso de  $1842\text{kg/m}^3$  según ASTM C 567.

La densidad del mortero fresco se reduce al aumentar el contenido de EPS en el mortero y conforme disminuye su tamaño de partícula.

La densidad seca del mortero va disminuyendo al aumentarse el contenido de EPS, cuando se llega al 60% de adición la densidad baja a  $0.75\text{gr/cm}^3$  lo que lo hace flotar en el agua. A su vez un 60% de sustitución genera un 11.57% de porosidad, aunque por su gran cantidad de poliestireno el porcentaje de absorción por inmersión solo llega al 1.5%. también en los resultados se puede apreciar que el volumen de espacio permeable poroso aumenta a medida que los especímenes contienen más EPS hasta llegar a un punto cuando la sustitución llega al 60% donde baja nuevamente por la propiedad del EPS de evitar el agua.

El triturado de EPS se hizo en estado seco a diferencia de procesos anteriores que se hacían por medios acuosos y aspas. El método utilizado en este trabajo produce un producto muy homogéneo dando más del 80% de la granulometría media (1.18-2mm) y el restante porcentaje de 0.6 a 118mm y 2-4mm con un mínimo de desperdicio, lo que lo hace factible para un trabajo a mayor escala.

Más allá del 60% de adición de EPS al mortero se vuelve poco trabajable y de baja adherencia aparte de presentar disgregación y baja homogeneidad. Por este hecho en este trabajo el límite se estableció en 60%.

Con respecto a las pruebas de compresión de los paneles los resultados arrojan que a diferencia de las pruebas con los morteros la mezcla sin EPS o de

control dieron resistencias menores a la adición de 40% a primera y última falla en los paneles de ferrocemento a 28 días. Otro punto importante es que el panel de 0% de EPS al fallar tuvo grandes desprendimientos y fracturas. El panel de adición de 40% de EPS tuvo fallo el recubrimiento perimetral interior aunque el panel se mantuvo unido. Por otro lado el panel de 60% de adición de EPS tuvo una baja resistencia de 20-30kg/cm<sup>2</sup> pero mostro un comportamiento elástico al aplicarse la carga en la cual se deforma y, aunque falló, al momento de retirar la carga tuvo un regreso a su posición inicial.

Al agregar EPS al mortero se llegó a reducir a la mitad el peso del panel sin EPS en absoluto.

Respecto a las pruebas acústicas de estos paneles, se puede apreciar como al colocar un panel entre la fuente de sonido y el medidor, se crea una absorción y disminución de los decibeles transmitidos. En las pruebas acústicas se aprecia que los paneles de 0 y 60% de EPS mostraron buenas cualidades de aislamiento acústico sobre el panel adicionado con 40% de EPS. Estos dos paneles mostraron diferentes absorciones de frecuencias de sonido.

A final de cuentas el panel de 40% de adición de EPS mostro las mejores características para elementos estructurales, ya que mostro la mejor resistencia a la compresión y una significativa reducción de peso (39%) con una similar absorción acústica. Por otro lado para elementos no estructurales el panel de 60% de adición de 60% de EPS reduce a la mitad el peso con respecto al convencional pero también reduce una tercera parte la resistencia a la compresión por lo que es especial para muros interiores, y otros elementos prefabricados.

## VI. BIBLIOGRAFIA

**ACI 549R-97**, State-of-the-Art Report on Ferrocement, Reported by ACI Committee 549, 2009

**Agus S.**, Ismail B., Amirkhan S., The Performance Evaluation of Lightweight Concrete Piles on UTHM's Soft Soil under Static and Dynamic Loading Tests, Faculty of Civil and Environmental Engineering, UTHM, 2010

**Antequera P.**, Jiménez L., Miravete A., Los materiales compuestos de fibra de vidrio, Secretariado de publicaciones, Zaragoza, 1991.

**Babaee S.**, Sabour M. R., Kamalan H., Simulation of Natural Gas Saving Through Foam Lightweight Concrete Utilization in Residential Buildings, Environ. Health. Sci. Eng., Vol. 8, No. 4, 2011.

**Balagur P.**, Shah S., Alternative Reinforcing Materials for Less Developed Countries, International Journal of Development Technology, V. 3, 1985: 87-105.

**Brook K. M.**, Malhotra V.M., Croswell S.F., Atkinson G., No-Fines Concrete; Cement and Concrete Association of Australia: North Sydney, Australia, 1999.

Cem. Concr. Compos, 2000.

**Eyers J. D.**, Survey of Ferrocement Fishing Boats Built in New Zealand, FAO Seminar on the Design and Construction of Ferrocement

**Fahrizal Z.**, Mahyuddin R., Performance and characteristic foamed concrete mix design with silica fume for housing development, Int. J. Acad. Res, 2011,(3):1198–1206.

Fishing Vessels, Wellington, 1972

**Ferrandiz-Mas V.**, Garcia-Alcocel E., 2012, Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS), Mater. Construcc., Vol. 62, 308, 547-566. ISSN: 0465-2746

**García O.**, Mortero liguero para su uso en la industria de la construcción, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma De Querétaro, Querétaro, 2011.

**Hagenbach** T. M., Experience of 300 Commercially Built Craft in More Than 20 Countries, FAO Seminar on the Design and Construction of Ferrocement Fishing Vessels, Wellington, 1972.

**Haynes** H. H., Guthrie G. S., Ferrocement Construction Panels, Technical Note No. 1341, Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center, Port Hueneme, 1974:33

**Hernández-Zaragoza** J.B., Reporte de estancia sabática en Universidad Central de Rosario, Argentina, Universidad Autónoma De Querétaro, Querétaro, 2012.

**Hernández-Zaragoza** J.B., Research Article Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate, Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2013, Article ID 160162, 2013.

**Iorns** M. E., A Contractors' Guide to Laminated Concrete, Concrete International: Design and Construction, V. 11, No. 10, 1989.

**Kamyar** E., Elastic Composite Reinforced Lightweight Concrete as a type of Resilient Composite Systems, International Journal of Innovative Technology and Creative Engineering, Vol.2 No.8, 2012

**Kirby**, R.S.y Laurson, P.C., 1932, The Early Years of Modern Civil Engineering (New Haven: Yale University Press)

**Lo** T. Y., Structural Light Weight Aggregate Concrete - Now, New and Next, Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, PRC, 15-17 January 2003.

**McCormac**, J.C., 2005 Diseño de Concreto Reforzado, México, Alfaomega

**MOE**, Energy Statistics and Diagrams in Iran and the World, Iran Ministry of Energy - Energy Planning Office, 2007.

Molecular Sciences, 2012,

**Mustafa** B., Kamarudin H., Bnhussain, Nizar I., Yahya, Abdul R., Fly Ash-based Geopolymer Lightweight Concrete Using Foaming Agent, International Journal of

**Nakamatsu** J., Elgegren M., Poliésteres Insaturados a partir de Desechos de PET, Revista de la Sociedad Química del Perú, vol. 75,2009.

**Narayanan N.**, Ramamurthy K., Structure and properties of aerated concrete: A review,

**National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)**, Structural Lightweight Concrete; NRMCA: Silver Spring, USA, 2003.

**Noor S. H.**, Hadibur R., Shiblee S., Saiful I., The Use of Coconut Fibre in the Production of Structural Lightweight Concrete, School of Civil Engineering, Linton University College, 2012.

**Olvera A.**, 2002, El Ferrocemento y sus Aplicaciones, México, Alfaomega

**Paramasivam P.**, Nathan G. K., Prefabricated Ferrocement Water Tanks, ACI JOURNAL, 1984: 580-586.

**Paul. B.K.** y Pama, R.P., 1981, Ferrocemento, México, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C.

**Ramírez J.**, Tesis: Propiedades mecánicas de muros fabricados con tabiques ligeros, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, 2012.

**Short W. K.**, Lightweight Concrete, Third Edition, Applied Science Publishers Ltd, London, 1978.

Siddique R, Khatib J, Kaur I., Use of recycled plastic in concrete: a review, Thapar Institute of Engineering and Technology, 2008

**Stevens N.J.**, S.M. Uzumeri, M.P. Collins, Analysis modelling of reinforced concrete subjected to monotonic and reverses loading, Pub. No. 87-1, Depart of Civil Eng.Uni. Toronto, Canada, 1987.

**Walkus, B.R.** y Kowalski., 1971, T.G.Ferrocement: A Survey. Concrete , Cement and Concrete Association of London.

**Weigler H.**, 1974, Hormigones ligeros armados, Gustavo Gili, S.A., España.

**WRAP**, 2007, Realizing the Value of Recovered Plastics, Market Situation Report.

**Zainab Z. I.**, Enas A., Use of plastic in concrete mixture as aggregate replacement, Waste Management, 2007.

## VII. APÉNDICE

**VII.1** Método de prueba estándar para Densidad, Absorción y porcentaje de vacíos en el concreto endurecido

### **Procedimiento**

*Masa secada en horno.* Determinar la masa de las partes y secar en un horno a una temperatura de 100 a 110 ° C durante no menos de 24 hrs. Después de retirar cada muestra del horno, deje que se enfríe en el aire seco a una temperatura de 20 a 25 ° C y determinar la masa. Designe a este valor *A*.

Para los especímenes con EPS la norma fue modificada ya que el EPS hidrofóbico se volatiliza a 100°C por lo que la prueba no representa el comportamiento del mortero. Los especímenes se dejaron secar a 50°C por 96 horas.

*Masa saturada después de la inmersión.* Sumergir el espécimen en agua a aproximadamente a 21 ° C durante al menos 48 horas secar superficialmente la muestra mediante la eliminación de la humedad con una toalla, y determinar la masa. Designe a este valor *B*

*Masa saturada después de hervir.* Coloque la muestra en un recipiente adecuado, cubierto con agua de la llave, y hervir durante 5 hrs. Deje que se enfríe por pérdida natural de calor para no menos de 14 hrs a una temperatura final de 20 a 25° C. Quite la humedad de la superficie con una toalla y determinar la masa de la muestra. Designe a este valor *C*.

*Masa sumergida.* Suspender la muestra, después de la inmersión y de la ebullición, con un alambre y determinar la masa en el agua. Designar esta masa aparente *D*.

### **Cálculo**

Mediante el uso de los valores de masa determinados de acuerdo con los procedimientos:

Cálculos:

	Valor A (g)	Valor B (g)	Valor C (g)	Valor D (g)
<b>0% adición</b>	202.56	212.76	215.82	88.73
<b>40% adición</b>	167.34	179.03	185.88	51.61
<b>60% adición</b>	137.94	140.01	151.23	36.35

	<b>Absorción después de inmersión %</b>	Absorción después de inmersión y cocido %	Densidad seco (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad después de inmersión (g/cm <sup>3</sup> )
<b>0% adición</b>	5.04	6.55	1.591	1.671
<b>40% adición</b>	6.99	11.08	1.244	1.331
<b>60% adición</b>	1.50	9.63	1.119	1.217

Densidad del agua (g/cm <sup>3</sup> )	0.99829
--	---------

	<b>Densidad después de inmersión y cocido (g/cm<sup>3</sup>)</b>	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen de espacio permeable poroso (vacíos) %
<b>0% adición</b>	1.695	1.776	10.43
<b>40% adición</b>	1.382	1.443	13.81
<b>60% adición</b>	1.314	1.355	11.57

## VII.2 Datos acústicos

			DECIBELES											
No	tiempo	frecuencia	sin panel		0% adición		40% adición		60% adición					
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
1	0.0	20.0	90.6	91.0	90.8	70.9	81.9	76.4	75.3	85.2	80.3	80.4	75.5	78.0
2	0.5	130.0	95.1	94.4	94.8	82.3	81.6	82.0	87.6	83.7	85.7	71.7	81.1	76.4
3	1.0	220.0	87.7	94.5	91.1	85.3	88.3	86.8	86.6	83.7	85.2	72.2	86.1	79.2
4	1.5	351.4	94.6	92.0	93.3	79.8	79.6	79.7	80.6	79.1	79.9	70.7	73.5	72.1
5	2.0	440.2	92.8	93.0	92.9	75.9	93.0	84.5	79.5	94.6	87.1	64.1	77.6	70.9
6	2.5	529.4	92.6	94.7	93.7	92.4	87.9	90.2	93.7	93.5	93.6	81.7	85.9	83.8
7	3.0	619.1	94.7	91.1	92.9	80.6	78.1	79.4	82.3	79.2	80.8	73.2	72.4	72.8
8	3.5	709.1	93.1	92.2	92.7	81.7	75.3	78.5	84.2	78.5	81.4	70.5	79.6	75.1
9	4.0	799.6	92.9	92.4	92.7	79.1	90.2	84.7	84.2	86.4	85.3	69.0	75.1	72.1
10	4.5	890.5	88.8	94.5	91.7	88.9	81.9	85.4	87.6	84.0	85.8	68.8	76.5	72.7
11	5.0	981.8	94.5	95.0	94.8	85.0	81.7	83.4	82.3	82.0	82.2	72.2	74.3	73.3
12	5.5	1073.6	94.6	94.0	94.3	82.2	91.3	86.8	92.0	93.2	92.6	70.8	78.8	74.8
13	6.0	1165.7	94.8	94.1	94.5	91.9	91.0	91.5	89.6	89.5	89.6	79.4	86.5	83.0
14	6.5	1258.1	94.5	94.5	94.5	87.0	74.8	80.9	85.1	80.7	82.9	73.4	78.8	76.1
15	7.0	1351.0	94.6	94.1	94.4	70.2	70.6	70.4	78.5	77.3	77.9	68.0	76.7	72.4
16	7.5	1444.3	94.1	94.3	94.2	83.0	81.6	82.3	88.0	86.7	87.4	66.4	75.7	71.1
17	8.0	1537.9	94.0	91.7	92.9	77.9	78.8	78.4	78.5	77.2	77.9	66.9	77.4	72.2
18	8.5	1631.8	91.8	93.9	92.9	79.8	78.8	79.3	78.3	74.7	76.5	66.6	75.4	71.0
19	9.0	1726.2	93.5	94.8	94.2	78.2	83.0	80.6	76.8	83.2	80.0	69.6	82.2	75.9
20	9.5	1820.9	94.7	94.2	94.5	88.3	76.8	82.6	83.0	82.7	82.9	75.8	82.0	78.9
21	10.0	1915.9	94.1	93.0	93.6	78.8	85.4	82.1	83.8	79.3	81.6	69.2	76.5	72.9
22	10.5	2011.3	93.2	94.5	93.9	84.0	92.1	88.1	88.0	86.0	87.0	69.1	77.7	73.4
23	11.0	2107.0	94.4	94.3	94.4	89.6	80.2	84.9	86.5	86.4	86.5	85.0	85.6	85.3
24	11.5	2203.0	94.0	91.0	92.5	84.5	86.5	85.5	83.1	80.6	81.9	80.0	86.3	83.2
25	12.0	2299.4	94.5	94.4	94.5	86.1	82.3	84.2	87.6	91.0	89.3	70.6	82.2	76.4
26	12.5	2396.1	93.8	93.5	93.7	82.6	85.6	84.1	82.4	89.9	86.2	77.6	83.0	80.3
27	13.0	2493.1	94.6	94.7	94.7	81.6	77.4	79.5	80.1	77.7	78.9	73.2	84.8	79.0
28	13.5	2590.4	94.3	94.1	94.2	75.9	72.7	74.3	82.8	79.0	80.9	75.8	83.0	79.4
29	14.0	2688.0	94.1	94.3	94.2	75.7	77.1	76.4	86.4	87.8	87.1	72.4	73.6	73.0
30	14.5	2785.9	93.8	93.4	93.6	78.5	74.9	76.7	87.9	87.5	87.7	74.9	81.3	78.1
31	15.0	2884.0	93.6	93.0	93.3	73.1	86.5	79.8	93.8	86.3	90.1	80.1	85.0	82.6
32	15.5	2982.5	94.4	94.3	94.4	86.9	89.4	88.2	84.8	91.8	88.3	72.6	79.1	75.9
33	16.0	3081.2	93.9	93.9	93.9	83.9	75.7	79.8	86.2	83.9	85.1	74.0	85.2	79.6
34	16.5	3180.3	94.5	94.7	94.6	76.9	81.9	79.4	83.3	84.6	84.0	77.1	83.3	80.2
35	17.0	3279.5	94.1	94.2	94.2	79.1	82.1	80.6	81.7	81.4	81.6	70.5	82.4	76.5

36	17.5	3379.1	93.5	93.1	93.3	80.4	72.6	76.5	83.7	81.7	82.7	73.7	82.6	78.2
37	18.0	3478.9	93.0	93.5	93.3	79.0	79.4	79.2	88.3	84.3	86.3	73.2	83.6	78.4
38	18.5	3578.9	92.2	92.3	92.3	76.4	71.9	74.2	85.0	87.5	86.3	80.0	87.5	83.8
39	19.0	3679.2	92.5	92.7	92.6	73.4	79.2	76.3	85.4	88.9	87.2	75.9	82.2	79.1
40	19.5	3779.7	92.1	93.3	92.7	81.4	78.6	80.0	80.9	82.0	81.5	69.2	73.8	71.5
41	20.0	3880.5	93.2	93.6	93.4	75.2	74.9	75.1	83.3	76.2	79.8	72.7	76.0	74.4
42	20.5	3981.5	94.0	94.2	94.1	72.0	75.9	74.0	84.8	81.0	82.9	79.2	86.7	83.0
43	21.0	4082.7	93.3	92.9	93.1	75.9	76.6	76.3	85.1	88.2	86.7	75.9	85.2	80.6
44	21.5	4184.1	94.1	93.4	93.8	74.1	70.0	72.1	88.1	82.7	85.4	82.9	89.7	86.3
45	22.0	4285.7	93.7	94.1	93.9	68.5	65.8	67.2	76.3	81.5	78.9	78.2	82.7	80.5
46	22.5	4387.5	94.0	93.1	93.6	66.7	77.8	72.3	83.0	75.1	79.1	75.9	83.0	79.5
47	23.0	4489.5	94.3	94.1	94.2	78.9	75.6	77.3	89.7	85.3	87.5	82.2	81.7	82.0
48	23.5	4591.7	93.5	92.7	93.1	78.1	72.9	75.5	75.2	86.2	80.7	79.9	88.4	84.2
49	24.0	4694.1	88.1	84.3	86.2	68.7	66.3	67.5	78.0	87.1	82.6	77.3	82.7	80.0
50	24.5	4796.7	85.4	91.5	88.5	70.0	69.4	69.7	70.2	74.2	72.2	77.1	85.4	81.3
51	25.0	4899.5	80.3	85.9	83.1	68.7	65.7	67.2	83.6	73.1	78.4	73.1	79.8	76.5
52	25.5	5002.4	88.7	83.2	86.0	63.9	72.9	68.4	83.5	84.9	84.2	73.6	81.4	77.5
53	26.0	5105.4	94.4	93.8	94.1	70.0	72.1	71.1	81.5	85.4	83.5	78.4	82.3	80.4
54	26.5	5208.7	93.7	94.4	94.1	70.0	72.4	71.2	73.6	77.8	75.7	79.1	84.7	81.9
55	27.0	5312.1	94.5	94.5	94.5	72.0	71.5	71.8	81.2	80.0	80.6	72.1	86.3	79.2
56	27.5	5415.6	94.0	92.6	93.3	70.1	68.7	69.4	84.5	82.5	83.5	72.4	78.2	75.3
57	28.0	5519.3	93.5	94.6	94.1	70.8	68.9	69.9	71.8	77.9	74.9	77.8	82.1	80.0
58	28.5	5623.0	94.1	93.7	93.9	69.1	66.5	67.8	74.7	70.6	72.7	75.3	82.8	79.1
59	29.0	5727.0	94.4	94.2	94.3	67.1	69.2	68.2	71.4	68.1	69.8	72.4	79.5	76.0
60	29.5	5831.0	94.3	94.5	94.4	71.5	68.7	70.1	78.3	76.3	77.3	74.1	82.6	78.4
61	30.0	5935.2	94.2	94.0	94.1	66.8	79.5	73.2	84.8	81.3	83.1	72.2	78.2	75.2
62	30.5	6039.5	94.4	94.5	94.5	70.4	70.6	70.5	81.1	83.8	82.5	75.9	83.4	79.7
63	31.0	6143.8	94.2	94.3	94.3	71.3	70.0	70.7	77.7	79.2	78.5	75.0	82.1	78.6
64	31.5	6248.3	94.1	93.6	93.9	70.8	70.4	70.6	77.7	77.7	77.7	72.9	79.0	76.0
65	32.0	6352.9	93.8	93.8	93.8	66.6	66.4	66.5	69.7	73.4	71.6	69.6	76.8	73.2
66	32.5	6457.5	94.2	94.3	94.3	69.0	67.4	68.2	69.0	72.2	70.6	70.7	77.9	74.3
67	33.0	6562.3	91.5	91.7	91.6	64.6	69.9	67.3	79.5	80.1	79.8	72.1	76.5	74.3
68	33.5	6667.1	90.9	91.3	91.1	71.6	72.8	72.2	70.8	76.2	73.5	68.7	75.3	72.0
69	34.0	6771.9	91.5	92.2	91.9	70.1	73.7	71.9	82.3	69.6	76.0	73.1	80.2	76.7
70	34.5	6876.9	94.5	94.7	94.6	75.9	68.1	72.0	78.3	82.9	80.6	68.0	72.3	70.2
71	35.0	6981.9	94.6	94.5	94.6	72.9	70.3	71.6	72.4	71.8	72.1	70.6	79.3	75.0
72	35.5	7086.9	94.6	94.4	94.5	68.2	69.5	68.9	74.1	69.9	72.0	68.5	73.7	71.1
73	36.0	7192.0	94.6	94.5	94.6	68.0	67.0	67.5	76.5	79.6	78.1	65.5	76.5	71.0
74	36.5	7297.2	94.5	94.3	94.4	70.0	67.9	69.0	83.0	75.3	79.2	66.7	73.3	70.0
75	37.0	7402.4	94.3	94.5	94.4	66.0	63.7	64.9	75.7	77.1	76.4	70.1	78.9	74.5

76	37.5	7507.6	94.3	94.2	94.3	65.5	62.4	64.0	77.0	75.9	76.5	72.3	79.7	76.0
77	38.0	7612.8	94.1	94.1	94.1	63.0	70.8	66.9	80.2	82.1	81.2	71.2	78.4	74.8
78	38.5	7718.0	93.9	93.9	93.9	67.8	66.1	67.0	73.3	76.7	75.0	67.1	72.0	69.6
79	39.0	7823.3	92.6	93.4	93.0	68.9	75.2	72.1	80.4	78.0	79.2	64.9	74.0	69.5
80	39.5	7928.5	92.7	92.7	92.7	70.8	69.8	70.3	74.9	79.6	77.3	69.8	77.1	73.5
81	40.0	8033.8	92.5	92.6	92.6	72.8	65.6	69.2	79.8	76.8	78.3	64.4	67.0	65.7
82	40.5	8139.1	92.7	92.7	92.7	67.0	73.5	70.3	83.6	82.6	83.1	62.1	68.6	65.4
83	41.0	8244.3	93.0	93.1	93.1	67.8	72.2	70.0	74.2	81.9	78.1	66.0	68.6	67.3
84	41.5	8349.5	92.1	93.5	92.8	72.9	70.8	71.9	72.0	77.1	74.6	69.9	79.3	74.6
85	42.0	8454.7	94.0	94.2	94.1	70.0	67.1	68.6	86.1	85.4	85.8	66.0	75.7	70.9
86	42.5	8559.9	94.2	93.9	94.1	70.4	73.9	72.2	86.5	87.0	86.8	66.8	68.9	67.9
87	43.0	8665.0	82.7	88.7	85.7	69.0	72.1	70.6	85.5	83.0	84.3	69.6	75.6	72.6
88	43.5	8770.1	93.7	94.3	94.0	72.4	69.4	70.9	86.8	85.0	85.9	72.7	75.7	74.2
89	44.0	8875.2	94.5	94.5	94.5	72.1	79.6	75.9	86.7	83.1	84.9	70.8	80.3	75.6
90	44.5	8980.2	93.7	93.3	93.5	72.1	81.4	76.8	88.1	87.9	88.0	76.9	81.3	79.1
91	45.0	9085.1	93.7	94.3	94.0	80.8	74.9	77.9	85.5	87.7	86.6	69.4	84.2	76.8
92	45.5	9190.0	91.6	93.5	92.6	78.7	82.5	80.6	76.7	84.7	80.7	66.8	76.2	71.5
93	46.0	9294.8	94.0	93.5	93.8	75.3	78.7	77.0	85.4	72.3	78.9	63.5	74.3	68.9
94	46.5	9399.6	94.5	94.5	94.5	81.0	76.8	78.9	89.6	86.0	87.8	72.9	77.7	75.3
95	47.0	9504.2	94.3	94.0	94.2	78.6	71.9	75.3	83.0	87.2	85.1	72.1	80.4	76.3
96	47.5	9608.8	89.1	88.1	88.6	75.4	76.0	75.7	79.2	82.7	81.0	77.4	74.9	76.2
97	48.0	9713.3	94.7	94.4	94.6	72.9	75.4	74.2	90.5	86.0	88.3	80.9	84.2	82.6
98	48.5	9817.7	94.4	94.3	94.4	78.5	80.0	79.3	90.0	90.4	90.2	82.0	89.8	85.9
99	49.0	9921.9	94.2	94.2	94.2	75.2	78.9	77.1	81.6	85.4	83.5	80.5	89.0	84.8
100	49.5	10026.1	93.9	93.8	93.9	80.4	75.0	77.7	83.2	82.4	82.8	73.5	84.3	78.9
101	50.0	10130.1	93.4	92.2	92.8	79.5	81.8	80.7	79.9	85.2	82.6	81.1	81.3	81.2
102	50.5	10234.1	92.8	92.7	92.8	76.9	80.5	78.7	83.2	78.9	81.1	73.0	87.8	80.4
103	51.0	10337.9	92.7	92.7	92.7	81.8	77.2	79.5	87.4	80.1	83.8	68.1	79.1	73.6
104	51.5	10441.5	92.7	92.7	92.7	80.1	78.9	79.5	77.5	87.7	82.6	72.9	82.1	77.5
105	52.0	10545.1	92.6	92.6	92.6	76.4	80.1	78.3	89.6	83.8	86.7	82.2	80.3	81.3
106	52.5	10648.5	92.5	92.5	92.5	77.6	78.2	77.9	84.7	90.0	87.4	78.8	91.9	85.4
107	53.0	10751.7	92.4	92.2	92.3	79.8	79.0	79.4	92.8	89.2	91.0	82.5	86.5	84.5
108	53.5	10854.8	93.7	92.8	93.3	78.7	75.5	77.1	92.9	92.8	92.9	83.3	92.5	87.9
109	54.0	10957.7	93.8	94.0	93.9	77.0	77.9	77.5	92.9	90.3	91.6	81.4	90.2	85.8
110	54.5	11060.4	93.2	93.2	93.2	76.4	79.8	78.1	88.3	87.1	87.7	75.2	90.7	83.0
111	55.0	11163.0	93.0	93.2	93.1	76.9	72.1	74.5	91.5	80.5	86.0	73.4	80.2	76.8
112	55.5	11265.4	94.3	94.4	94.4	79.1	75.5	77.3	90.2	81.6	85.9	83.0	79.4	81.2
113	56.0	11367.6	93.9	94.1	94.0	73.6	73.8	73.7	85.4	86.0	85.7	81.3	89.1	85.2
114	56.5	11469.7	93.4	93.2	93.3	73.1	72.9	73.0	88.5	85.7	87.1	81.9	90.6	86.3
115	57.0	11571.5	92.3	92.4	92.4	73.1	73.1	73.1	87.9	89.7	88.8	79.0	87.0	83.0

116	57.5	11673.1	92.3	92.2	92.3	72.1	70.8	71.5	77.4	87.4	82.4	81.1	84.5	82.8
117	58.0	11774.5	92.1	92.2	92.2	71.2	78.9	75.1	75.5	75.6	75.6	80.6	87.5	84.1
118	58.5	11875.7	92.4	92.0	92.2	73.8	76.1	75.0	79.0	76.8	77.9	69.9	83.1	76.5
119	59.0	11976.7	93.5	93.6	93.6	78.4	78.3	78.4	73.1	74.8	74.0	67.7	73.5	70.6
120	59.5	12077.5	90.9	87.8	89.4	75.6	79.1	77.4	71.7	71.7	71.7	64.6	77.1	70.9
121	60.0	12178.0	91.6	90.9	91.3	78.9	76.2	77.6	74.7	68.4	71.6	65.6	69.1	67.4
122	60.5	12278.3	92.4	92.4	92.4	80.5	80.9	80.7	82.9	74.6	78.8	62.9	69.3	66.1
123	61.0	12378.3	92.9	92.3	92.6	75.3	78.1	76.7	73.9	79.4	76.7	63.8	70.0	66.9
124	61.5	12478.1	89.4	89.7	89.6	81.2	74.0	77.6	75.7	73.4	74.6	66.8	70.0	68.4
125	62.0	12577.7	88.7	88.3	88.5	77.1	76.3	76.7	77.1	71.9	74.5	73.7	75.1	74.4
126	62.5	12677.0	88.2	88.0	88.1	73.4	73.7	73.6	75.4	77.6	76.5	70.7	73.6	72.2
127	63.0	12776.0	86.6	86.9	86.8	77.3	77.5	77.4	71.3	76.3	73.8	71.4	81.0	76.2
128	63.5	12874.7	86.3	86.9	86.6	75.6	76.2	75.9	75.2	71.0	73.1	69.5	77.1	73.3
129	64.0	12973.2	89.1	88.9	89.0	77.2	70.2	73.7	76.9	75.6	76.3	66.6	77.7	72.2
130	64.5	13071.4	89.3	84.2	86.8	74.7	69.5	72.1	77.8	76.7	77.3	62.2	76.0	69.1
131	65.0	13169.3	87.1	84.2	85.7	68.5	68.9	68.7	76.5	75.5	76.0	62.7	69.1	65.9
132	65.5	13266.9	89.2	86.9	88.1	70.6	67.9	69.3	73.2	76.2	74.7	62.3	67.8	65.1
133	66.0	13364.2	88.8	88.9	88.9	68.4	68.3	68.4	66.9	70.2	68.6	64.0	69.9	67.0
134	66.5	13461.2	89.0	87.3	88.2	68.1	70.3	69.2	68.5	67.0	67.8	60.4	68.8	64.6
135	67.0	13557.9	84.8	84.4	84.6	69.0	70.8	69.9	69.1	70.6	69.9	60.1	68.0	64.1
136	67.5	13654.3	79.6	78.5	79.1	70.4	65.9	68.2	66.7	68.9	67.8	60.5	65.4	63.0
137	68.0	13750.3	81.3	80.8	81.1	70.4	62.2	66.3	70.8	67.7	69.3	59.0	64.3	61.7
138	68.5	13846.1	84.8	84.5	84.7	65.2	59.2	62.2	70.6	70.6	70.6	59.3	67.5	63.4
139	69.0	13941.4	84.8	84.2	84.5	61.7	63.0	62.4	67.2	70.3	68.8	58.2	66.5	62.4
140	69.5	14036.5	83.7	82.9	83.3	59.7	62.4	61.1	68.0	67.1	67.6	58.9	65.1	62.0
141	70.0	14131.2	83.2	82.9	83.1	63.6	62.3	63.0	64.6	66.4	65.5	61.7	63.9	62.8
142	70.5	14225.5	84.9	84.3	84.6	61.9	61.5	61.7	66.1	64.6	65.4	60.2	66.6	63.4
143	71.0	14319.5	85.5	85.8	85.7	62.2	60.2	61.2	68.0	67.3	67.7	58.5	68.7	63.6
144	71.5	14413.1	84.7	84.3	84.5	61.5	56.8	59.2	69.7	68.1	68.9	57.6	66.2	61.9
145	72.0	14506.4	81.9	81.5	81.7	59.5	56.6	58.1	65.9	68.5	67.2	56.5	63.5	60.0
146	72.5	14599.3	80.1	81.3	80.7	56.6	55.5	56.1	67.8	66.1	67.0	54.3	63.7	59.0
147	73.0	14691.8	80.4	80.0	80.2	56.4	55.5	56.0	68.8	68.8	68.8	53.5	60.7	57.1
148	73.5	14783.9	81.5	80.6	81.1	54.8	55.9	55.4	66.7	68.7	67.7	53.0	58.9	56.0
149	74.0	14875.6	79.3	79.0	79.2	55.3	54.7	55.0	63.4	65.7	64.6	53.5	58.4	56.0
150	74.5	14966.9	77.7	77.5	77.6	55.4	53.9	54.7	61.1	63.4	62.3	52.6	58.7	55.7
151	75.0	15057.8	79.4	79.3	79.4	54.1	53.3	53.7	58.6	60.4	59.5	52.0	59.8	55.9
152	75.5	15148.3	75.6	76.1	75.9	53.3	51.8	52.6	57.2	58.5	57.9	51.8	58.3	55.1
153	76.0	15238.4	75.0	74.9	75.0	52.7	50.8	51.8	56.9	56.9	56.9	52.1	57.4	54.8
154	76.5	15328.1	75.3	76.6	76.0	51.2	49.5	50.4	56.7	56.9	56.8	51.3	58.1	54.7
155	77.0	15417.3	74.9	75.3	75.1	50.1	48.6	49.4	55.0	55.7	55.4	51.1	58.4	54.8

156	77.5	15506.1	75.0	74.4	74.7	48.9	47.7	48.3	56.5	54.9	55.7	50.2	57.5	53.9
157	78.0	15594.5	75.0	74.9	75.0	48.1	47.0	47.6	56.7	57.0	56.9	49.4	57.3	53.4
158	78.5	15682.4	74.3	74.1	74.2	47.1	46.3	46.7	57.5	57.0	57.3	48.2	56.5	52.4
159	79.0	15769.9	73.7	73.3	73.5	46.5	45.9	46.2	59.3	58.7	59.0	47.7	54.0	50.9
160	79.5	15856.9	74.6	74.7	74.7	45.9	45.3	45.6	59.2	59.3	59.3	46.8	52.9	49.9
161	80.0	15943.5	74.1	73.9	74.0	45.5	44.9	45.2	58.5	59.3	58.9	46.3	52.4	49.4
162	80.5	16029.6	74.1	72.9	73.5	44.8	44.5	44.7	58.4	58.5	58.5	45.8	52.0	48.9
163	81.0	16115.2	73.1	72.0	72.6	44.3	44.3	44.3	56.9	58.4	57.7	45.3	52.1	48.7
164	81.5	16200.3	72.0	71.1	71.6	44.0	43.8	43.9	55.9	56.9	56.4	44.7	52.1	48.4
165	82.0	16285.0	70.5	70.2	70.4	43.8	43.7	43.8	58.0	56.0	57.0	44.4	50.6	47.5
166	82.5	16369.1	70.5	68.8	69.7	43.5	43.2	43.4	55.2	55.8	55.5	43.8	50.5	47.2
167	83.0	16452.8	68.9	66.5	67.7	43.3	42.9	43.1	54.1	54.4	54.3	43.5	50.2	46.9
168	83.5	16536.0	68.8	64.7	66.8	42.8	42.4	42.6	53.7	54.0	53.9	43.1	49.7	46.4
169	84.0	16618.6	64.8	64.4	64.6	42.5	42.0	42.3	52.4	53.2	52.8	42.8	49.5	46.2
170	84.5	16700.7	64.4	63.8	64.1	42.0	41.7	41.9	51.8	52.2	52.0	42.3	49.7	46.0
171	85.0	16782.4	63.4	61.6	62.5	41.7	41.3	41.5	50.4	51.2	50.8	42.0	48.7	45.4
172	85.5	16863.5	61.9	59.9	60.9	41.3	41.0	41.2	49.6	50.2	49.9	41.7	48.8	45.3
173	86.0	16944.0	59.4	57.6	58.5	41.0	40.8	40.9	48.3	49.0	48.7	41.4	48.4	44.9
174	86.5	17024.0	57.9	56.7	57.3	40.7	40.4	40.6	47.6	48.2	47.9	41.1	47.8	44.5
175	87.0	17103.5	56.4	55.5	56.0	40.5	40.2	40.4	46.6	47.1	46.9	40.8	47.4	44.1
176	87.5	17182.5	55.7	54.3	55.0	40.1	39.8	40.0	46.1	46.5	46.3	40.5	47.4	44.0
177	88.0	17260.8	54.0	52.5	53.3	39.9	39.6	39.8	45.3	45.7	45.5	40.2	46.7	43.5
178	88.5	17338.7	52.7	51.4	52.1	39.6	39.4	39.5	44.8	45.2	45.0	40.0	46.2	43.1
179	89.0	17415.9	51.1	49.9	50.5	39.4	39.2	39.3	44.1	44.5	44.3	39.7	45.6	42.7
180	89.5	17492.6	50.1	49.0	49.6	39.1	38.9	39.0	43.8	44.0	43.9	39.5	45.2	42.4
181	90.0	17568.7	48.9	47.9	48.4	38.9	38.7	38.8	43.2	43.4	43.3	39.3	44.5	41.9
182	90.5	17644.2	48.1	47.2	47.7	38.7	38.5	38.6	43.2	43.0	43.1	39.0	44.0	41.5
183	91.0	17719.2	47.1	46.3	46.7	38.5	38.3	38.4	42.8	42.5	42.7	38.9	43.5	41.2
184	91.5	17793.5	46.6	45.8	46.2	38.2	38.0	38.1	42.2	42.1	42.2	38.8	43.1	41.0
185	92.0	17867.2	45.9	45.0	45.5	38.1	37.9	38.0	41.9	41.7	41.8	38.6	42.6	40.6
186	92.5	17940.4	45.5	44.6	45.1	37.9	37.7	37.8	41.5	41.3	41.4	38.5	42.2	40.4
187	93.0	18012.9	45.0	43.9	44.5	37.7	37.6	37.7	41.3	40.9	41.1	38.3	41.7	40.0
188	93.5	18084.8	44.7	43.6	44.2	37.5	37.5	37.5	40.9	40.6	40.8	38.1	41.5	39.8
189	94.0	18156.1	44.7	43.1	43.9	37.5	37.4	37.5	40.7	40.2	40.5	38.0	41.2	39.6
190	94.5	18226.7	44.3	42.7	43.5	37.3	37.2	37.3	40.1	40.0	40.1	37.8	41.0	39.4
191	95.0	18296.7	44.0	42.3	43.2	37.2	37.2	37.2	40.4	39.7	40.1	37.7	40.7	39.2
192	95.5	18366.1	43.9	42.0	43.0	37.1	37.1	37.1	40.3	39.5	39.9	37.5	40.5	39.0
193	96.0	18434.8	44.1	41.6	42.9	37.0	37.0	37.0	40.2	39.2	39.7	37.4	40.6	39.0
194	96.5	18502.9	44.5	41.4	43.0	36.8	36.9	36.9	40.1	39.0	39.6	37.3	40.7	39.0
195	97.0	18570.3	44.9	41.0	43.0	36.7	36.8	36.8	40.0	38.8	39.4	37.2	40.5	38.9

196	97.5	18637.1	46.5	40.8	43.7	36.6	36.7	36.7	40.0	38.6	39.3	37.0	40.4	38.7
197	98.0	18703.1	46.9	42.2	44.6	36.5	36.7	36.6	39.9	38.4	39.2	36.9	40.2	38.6
198	98.5	18768.5	47.3	41.9	44.6	36.4	36.6	36.5	39.8	38.2	39.0	36.7	40.6	38.7
199	99.0	18833.3	47.9	41.5	44.7	36.3	36.5	36.4	39.7	38.0	38.9	36.6	40.9	38.8
200	99.5	18897.3	50.0	41.2	45.6	36.2	36.4	36.3	39.6	37.9	38.8	36.5	40.6	38.6
201	100.0	18960.6	52.4	40.9	46.7	36.2	36.4	36.3	39.4	37.8	38.6	36.4	40.2	38.3
202	100.5	19023.3	55.7	40.6	48.2	36.1	36.3	36.2	39.5	37.7	38.6	36.3	40.0	38.2
203	101.0	19085.2	56.7	40.3	48.5	36.1	36.3	36.2	39.5	37.5	38.5	36.2	39.9	38.1
204	101.5	19146.5	57.6	40.1	48.9	36.0	36.3	36.2	39.5	37.4	38.5	36.1	39.7	37.9
205	102.0	19207.0	56.4	39.8	48.1	35.9	36.2	36.1	39.5	37.3	38.4	36.0	39.6	37.8
206	102.5	19266.8	54.2	39.7	47.0	35.8	36.1	36.0	39.6	37.2	38.4	35.8	39.4	37.6
207	103.0	19325.8	52.9	39.5	46.2	35.8	36.0	35.9	39.5	37.1	38.3	35.8	39.2	37.5
208	103.5	19384.2	51.5	39.3	45.4	35.7	36.0	35.9	39.4	37.0	38.2	35.7	39.0	37.4
209	104.0	19441.8	50.4	39.1	44.8	35.6	35.9	35.8	39.6	37.0	38.3	35.6	38.8	37.2
210	104.5	19498.6	49.1	38.9	44.0	35.6	35.9	35.8	39.4	37.0	38.2	35.6	38.9	37.3
211	105.0	19554.7	48.3	38.8	43.6	35.5	35.8	35.7	39.1	37.1	38.1	35.5	38.9	37.2
212	105.5	19610.0	47.3	38.7	43.0	35.4	35.8	35.6	38.9	37.2	38.1	35.4	38.8	37.1
213	106.0	19664.6	46.6	38.4	42.5	35.4	35.7	35.6	38.6	37.1	37.9	35.3	38.9	37.1
214	106.5	19718.4	45.8	38.3	42.1	35.4	35.7	35.6	38.5	37.0	37.8	35.3	38.7	37.0
215	107.0	19771.5	45.3	38.1	41.7	35.4	35.7	35.6	38.2	36.9	37.6	35.2	38.7	37.0
216	107.5	19823.7	44.6	38.0	41.3	35.3	35.7	35.5	38.0	36.8	37.4	35.2	38.7	37.0
217	108.0	19875.2	44.3	37.8	41.1	35.3	35.7	35.5	37.8	36.7	37.3	35.1	38.7	36.9
218	108.5	19925.9	43.8	37.7	40.8	35.3	35.7	35.5	37.6	36.7	37.2	35.1	38.7	36.9
219	109.0	19975.7	43.5	37.6	40.6	35.2	35.7	35.5	37.5	36.5	37.0	42.3	38.7	40.5
220	109.5	20024.8	43.0	37.5	40.3	35.2	35.7	35.5	37.4	36.4	36.9	41.9	38.7	40.3
221	110.0	20073.1	42.7	37.4	40.1	35.2	35.7	35.5	37.2	36.3	36.8	41.3	38.5	39.9
222	110.5	20120.6	42.2	37.3	39.8	35.1	35.7	35.4	37.1	36.2	36.7	41.0	38.5	39.8
223	111.0	20167.2	41.9	37.2	39.6	35.3	35.7	35.5	36.9	36.1	36.5	40.5	39.5	40.0
224	111.5	20213.0	41.6	37.1	39.4	35.3	35.7	35.5	36.8	36.0	36.4	40.2	39.5	39.9
225	112.0	20258.0	41.5	37.0	39.3	35.2	35.7	35.5	36.6	35.9	36.3	39.8	39.6	39.7
226	112.5	20302.1	40.9	36.9	38.9	35.2	35.7	35.5	36.5	35.8	36.2	39.6	39.5	39.6
227	113.0	20345.4	40.7	36.8	38.8	35.1	35.7	35.4	36.4	35.7	36.1	39.3	39.2	39.3
228	113.5	20387.9	40.4	36.7	38.6	35.1	35.7	35.4	36.3	35.7	36.0	39.0	39.3	39.2
229	114.0	20429.5	40.2	36.6	38.4	35.1	35.7	35.4	36.2	35.7	36.0	38.7	39.5	39.1
230	114.5	20470.2	39.9	36.5	38.2	35.0	35.7	35.4	36.1	35.7	35.9	38.6	39.5	39.1
231	115.0	20510.1	39.7	36.4	38.1	35.1	35.7	35.4	36.1	35.7	35.9	38.3	39.3	38.8
232	115.5	20549.1	39.4	36.3	37.9	35.2	35.7	35.5	36.0	35.7	35.9	38.1	39.2	38.7
233	116.0	20587.2	39.3	36.2	37.8	35.2	35.7	35.5	36.2	35.7	36.0	37.9	38.9	38.4
234	116.5	20624.4	39.0	36.1	37.6	35.2	35.7	35.5	35.7	35.7	35.7	37.7	38.8	38.3