



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

“CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DE HORMIGONES LIVIANOS,
USANDO COMO MATERIA PRIMA POLIESTIRENO
EXPANDIDO MODIFICADO (MEPS)”

Tesis para optar al Título de:
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor Patrocinante:
Sr. Pablo Vergara Moscoso
Ingeniero Civil en Obras Civiles

FERNANDO GABRIEL VIDAL ALMONACID

VALDIVIA - CHILE

2010

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por brindarme la oportunidad de poder realizar mis estudios en forma optima e iluminarme en este camino.

A mi padre que desde el cielo me ha acompañado siempre en este proceso, a mi madre Eliana, hermanos, Javier y Angelo, por su apoyo incondicional.

A mis tíos, Rosa y Roberto, Padrinos, Juan y Sara, a mis abuelos Carlos y Puri, a Carlitos, Nibaldo, Miryam y toda mi familia que me ha acompañado en el proceso de formación.

A mis compañeros de carrera, en especial a los del inolvidable grupo, por el apoyo y fuerza de todos, se ha podido finalizar el camino que comenzamos hace años.

Al señor Aliro Peña, y su familia que me apoyaron en el comienzo de este camino que se tornó difícil por cosas de la vida.

A Pablo por su guía, consejos y buena disposición a lo largo de este trabajo.

Y a todos los que fueron partícipes de una u otra forma en esta etapa que ya culmina.

DEDICATORIA

*Dedicado en especial a mi
Padre Gabriel, Madre, Eliana,
por su apoyo, amor y fuerza.*

RESUMEN

Últimamente existe un interés muy fuerte en encontrar materiales de construcción que sean de bajo presupuesto, de buena calidad y mejor aún si pueden reutilizar materiales con el fin de reciclar y descontaminar.

En el presente trabajo, se desea diseñar un Hormigón Liviano de Alta Resistencia, utilizando como materia prima los rechazos de poliestireno expandido.

Se realizará un pequeño tratamiento térmico al material de poliestireno expandido (EPS), mejorando notablemente sus propiedades físicas, entregando un material, óptimo y de buena resistencia que llamaremos Poliestireno Expandido Modificado (MEPS).

Para estudiar el comportamiento de este nuevo material se efectuarán probetas de hormigón liviano de distintas dosificaciones, reemplazando el material granular por MEPS, en porcentajes controlados.

Se analizará su resistencia a la compresión, flexión y su adherencia para trabajar junto al hormigón.

Debido al tratamiento realizado al poliestireno expandido, se desea encontrar una gama de resistencias no conocidas en hormigones livianos, donde se utiliza como materia prima el poliestireno expandido y además se espera que el presente trabajo sirva como base para el estudio de un nuevo material a utilizarse en el diseño de hormigones livianos de alto desempeño.

SUMMARY

Lately there is a strong interest in find materials of construction at low Budget, of good quality and better yet if it can re-use materials with the objective of recycle and descontaminate.

This work search design a light Concrete with high resistente, using the rejections of expand polystyrene as raw material.

It will perform a termic treatment to the material of expand polystyrene (EPS), improving it physical properties, obtaining a optimal material with a good resistente, it called Modified Expanded Polystyrene (MEPS).

For study the behavior of this new material we will perform specimens of light concrete with different dosages, replacing the granular material for MEPS, in checked percentages.

We will analyze it compression resistance, flecion and it adherente for work with the concrete.

INDICE GENERAL

Temario	Página
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL	
I.1 Planteamiento Del Problema	15
I.2 Objetivos	16
I.2.1 Objetivo General	16
I.2.2 Objetivos Específicos	16
I.3 Alcances y Limitaciones	16
I.4 Metodología y Estructura de Trabajo	17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	
II.1 Introducción	18
II.2 Aspectos Teóricos Referentes al Hormigón	19
II.2.1 Definición de Hormigón	19
II.2.2 Materiales que Componen el Hormigón	19
II.2.2.1 Cemento	19
II.2.2.1.1 Proceso de Fabricación de Cemento	19
II.2.2.1.2 Fraguado y Endurecimiento de la Pasta de Cemento	20
II.2.2.2 Áridos	21
II.2.2.3 Agua de Amasado	22
II.2.2.4 Aditivos	23

Temario	Página
II.2.3 Tipos de Ensayo	25
II.2.3.1 Ensayo de Granulometría	25
II.2.3.2 Densidad Aparente	25
II.2.3.3 Densidades Reales y de Absorción	26
II.2.3.4 Ensayo de Compresión	26
II.2.3.4.1 Marcado y Medición de Probetas Cúbicas	27
II.2.3.4.2 Ensayo	27
II.2.3.4.3 Resultados	28
II.2.3.4.4 Cálculo de Resistencia a Compresión	28
II.2.3.5 Ensayo de Tracción por Flexión	29
II.2.3.5.1 Marcado y Medición de Probetas	30
II.2.3.5.2 Ensayo	30
II.2.3.5.3 Resultados	31
II.3 Concepto de Hormigón Liviano	32
II.3.1 Desarrollo Histórico del Hormigón Liviano	32
II.3.2 Clasificación de los Hormigones Livianos	33
II.3.2.1 Estructurales	33
II.3.2.2 Estructurales/Aislantes	34
II.3.2.3 Aislantes	34
II.4 Agregados Livianos	35
II.4.1 Clasificación de los Agregados Livianos	35
II.4.1.1 Agregado Liviano Natural	35

Temario	Página
II.4.1.1.1 Estructura Interna y Textura Superficial	35
II.4.1.1.2 Densidad Real y Aparente	36
II.4.1.1.3 Características de Absorción	36
II.4.1.2 Agregado Liviano Artificial	38
II.4.1.2.1 Forma y Textura Superficial	38
II.4.1.2.2 Estructura Interna, Resistencia Mecánica Y Módulo de Deformación	39
II.4.1.2.3 Porosidad y Absorción de Agua	39
II.5 Proceso de Fabricación de Poliestireno Expandido	40
II.5.1 Pre-Expansión	40
II.5.2 Reposo Intermedio y Estabilización	41
II.5.3 Proceso de Transformación	41
II.5.3.1 Bloque	41
II.5.3.2 Moldeado	41
II.5.4 Corte Mecanizado	41
II.5.4.1 Corte en Recto	41
II.5.4.2 Corte en Formas	41
II.6 Proceso de Fabricación de Poliestireno Expandido Modificado (MEPS)	42
II.6.1 Disponibilidad de los MEPS Mediante Tratamiento Térmico	44
II.6.2 Métodos Utilizados Para Evaluar Propiedades Del MEPS y Resultados De Las Pruebas	45
II.6.2.1 Conductividad Térmica de Los MEPS	45

Temario	Página
II.6.2.2 Investigación De Resistencia a La Compresión	
De los MEPS	45
II.6.2.3 Absorción de Agua, Densidad, Resistencia de los	
Agregados MEPS al Proceso Hielo – Deshielo	45
CAPITULO III: MATERIALES Y ENSAYOS A REALIZAR	46
III.1 Introducción	46
III.2 Materiales Componentes del Hormigón Liviano con Poliestireno	
Expandido Modificado.	47
III.2.1 Cemento	47
III.2.2 Áridos	47
III.2.3 Agua	47
III.2.4 Aditivos	48
III.2.5 Material en Base a Poliestireno Expandido modificado	48
III.3 Dosificaciones Experimentales	52
III.4 Planificación y Preparación de Ensayos	52
III.4.1 Confección de Probetas	53
III.4.2 Desmolde de Probetas	55
III.4.3 Curado	56
III.5 Ensayos	57
III.5.1 Determinación de Granulometría	57
III.5.2 Determinación de Masa Específica Aparente	57

Temario	Página
III.5.3 Determinación de Densidad Real, Neta y Absorción de Agua	57
III.5.4 Determinación de Resistencia a Compresión Axial	57
III.5.5 Determinación de Resistencia a Tracción por Flexión	59
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	
IV.1 Características del Poliestireno Expandido Modificado	60
IV.2 Material Natural	
IV.2.1 Caracterización del Arena	61
IV.2.2 Caracterización de la Gravilla	62
IV.3 Clasificación de Series de Probetas Cúbicas	63
IV.4 Resistencia a Compresión Axial (Cuerpos de Probetas Cúbicas)	65
IV.5 Reducción de Masa Específica y Resistencia a Compresión Axial	68
IV.6 Resistencia a Tracción por Flexión (Cuerpos Prismáticos)	70
IV.7 Aspectos Visuales	75
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
V.1 Comportamiento Relativo a Resistencias de Compresión Axial	77
V.1 Comportamiento Relativo a Resistencia a Tracción Por Flexión	78
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	79
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	86

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página.
Capítulo II: Marco Teórico y Revisión del Estado del Arte.	
Tabla 2.3.5: Descripción Ensayo Flexión	29
Tabla 2.3.6: Descripción Aplicación de Cargas Ensayo Flexión	30
Tabla 3.2.3: Clasificación de Agregados Livianos Naturales Para Hormigón Según Utilidad y Propiedades Físicas	35
Capítulo III: Materiales y Ensayos a Realizar.	
Tabla 2.5: Muestras en Cubos de 8cms. De Poliestireno Expandido y sus Dimensiones Luego de Aplicar Temperatura	51
Capítulo IV: Resultados	
Tabla 1.1: Distribución Granulométrica De Poliestireno Expandido Modificado	60
Tabla 2.1: Distribución Granulométrica Del Arena	61
Tabla 2.2: Distribución Granulométrica De la Gravilla	62
Tabla 3.(a): Clasificación de Probetas, Dosificación, Masa Específica Serie A	63
Tabla 3.(b): Clasificación de Probetas, Dosificación, Masa Específica Serie B	63
Tabla 3.(c): Clasificación de Probetas, Dosificación, Masa Específica Serie C	64
Tabla 3.(d): Clasificación de Probetas, Dosificación, Masa Específica Serie D	64
Tabla 4.(a): Resultado Ensayo a Compresión Serie A	65
Tabla 4.(b): Resultado Ensayo a Compresión Serie B	66

Tabla	Página.
Tabla 4.(c): Resultado Ensayo a Compresión Serie C	66
Tabla 4.(d): Resultado Ensayo a Compresión Serie D	67
Tabla 5.1: Pérdida de Masa Específica y Pérdida de Resistencia a Compresión Axial, Porcentual	68
Tabla 6.1: Ensayo de Tracción por Flexión	71
Tabla 6.2: Ensayo de Tracción por Flexión, Resistencias y Pérdidas Promedios	74

INDICE DE FIGURAS

FIGURA		Página.
Capítulo II: Marco Teórico y Revisión del Estado del Arte.		
Figura 2.3.4:	Prensa Hidráulica Para Ensayo de Compresión	27
Figura 2.3.5:	Prensa Hidráulica Para Ensayo de Probetas a Tracción Por Flexión	29
Figura 2.6:	Proceso de Producción de Poliestireno Expandido Modificado	42
Figura 2.6. (a), (b):	Cambio de Volumen de Poliestireno Expandido Modificado	42
Figura 2.6. (c):	Comparación de Volúmenes Antes y Después del Tratamiento	43
Figura 2.6. (d):	Gráfico de Variación de Densidad Versus Temperatura	43
Figura 2.6.1:	Obtención de MEPS Después del Tratamiento	44
Capítulo III: Materiales y Ensayos a Realizar.		
Figura 2.5.1:	Poliestireno Expandido Reciclado	48
Figura 2.5.2:	Poliestireno Expandido Triturado en Horno Para su Modificación.	49
Figura 2.5.3:	Retiro del Poliestireno del Horno, Haciéndose Evidente Su Disminución de Tamaño	49
Figura 2.5.4:	Muestras de Poliestireno Expandido Modificado por Temperatura	50
Figura 4:	Material Granular de Poliestireno Expandido Modificado	53
Figura 4.1.(a):	Moldes Metálicos de 15 x 15 cms. Provistos de Desmoldante	54
Figura 4.1.(b):	Betonera de Baja Revolución en Confección de Mezcla	54
Figura 4.1.(c):	Llenado y Rotulación de Moldajes Para Probetas de Ensayo	55
Figura 4.2:	Desmolde de Probetas de Hormigón	55

FIGURA		Página.
Figura 4.3:	Curado de Probetas en Piscina de LEMCO	56
Figura 5.4.1:	Prensa Hidráulica Para Ensayo a Compresión	58
Figura 5.4.2:	Ensayo a Compresión de Probetas de Hormigón	58
Figura 5.5.1:	Prensa Hidráulica Para Ensayo a Tracción por Flexión	59
Figura 5.5.2:	Probetas Prismáticas Para Ensayo a Tracción Por Flexión	59
 IV RESULTADOS.		
Figura 5.1.2:	Gráfico Pérdida de Masa Específica Por Series.	68
Figura 5.1.3:	Gráfico de Aumento de Resistencias Versus Días.	69
Figura 6.1.1:	Gráfico de Tracción Por Flexión Serie A	72
Figura 6.1.2:	Gráfico de Tracción Por Flexión Serie B	72
Figura 6.1.3:	Gráfico de Tracción Por Flexión Serie C	73
Figura 6.1.4:	Gráfico de Tracción Por Flexión Serie D	73
Figura 6.1.5:	Gráfico de Tracción Por Flexión Promedios de Series	74
Figura 7.1:	Probetas Cúbicas de Hormigón Para Ensayo a Compresión.	75
Figura 7.2:	Probetas Rechazadas por Presencia de Nidos.	76
Figura 7.3:	Probetas de Hormigón: (a) Presencia de Segregación de Material Liviano, (b) Material Liviano de Forma Homogénea	76

Capítulo I. INTRODUCCIÓN GENERAL

I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gran demanda de construcción en el mundo actual, ha llevado a buscar nuevas tecnologías en materiales, que tengan como objetivo, mejorar sus propiedades de trabajo, tiempo y principalmente costos.

Alrededor del mundo, la mayoría de las materias primas para construcción, han tenido un fuerte aumento en su valor económico, lo cual ha llevado a la optimización de uso de materiales. Bajo este punto de vista es que el uso de materiales de desecho se ha convertido en una gran alternativa para la industria de la construcción. Los materiales de desecho debidamente procesados han demostrado su eficacia, ya que cumplen fácilmente con las especificaciones de diseño y además ayudan a reducir la contaminación del medio ambiente.

En estas condiciones el presente trabajo, pretende investigar, ensayar y obtener resultados en el estudio de las propiedades de hormigones livianos, para ser utilizados como elementos estructurales. Desarrollando un amplio programa experimental en el análisis de hormigones livianos, se llevará a cabo estudios en los procesos de dosificación, producción y caracterización de los hormigones en estado fresco y endurecido.

El hormigón liviano puede obtenerse de varias maneras, ya sea agregando gases (polvo de aluminio), agregados naturales de baja densidad (esquistos, perlitas, piedra pómez, pizarra, etc.) o agregados artificiales como gránulos de plástico (poliuretano, espuma de poliestireno expandido).

Existen muchos estudios donde se utiliza poliestireno expandido, como materia prima para obtener hormigones livianos de una gran gama de densidades, sin embargo, este hormigón liviano no se ha podido utilizar como un hormigón estructural o semi-estructural, debido a su baja resistencia a la compresión. La resistencia del hormigón depende de cómo trabaje el conjunto de materiales, y se sabe que el poliestireno expandido por sí solo, posee una capacidad casi nula a la compresión, lo cual ha llevado a utilizar este tipo de hormigón netamente como un mortero, o a lo más para paneles divisorios, perdiendo claramente las ventajas que puede entregar si se realiza un pequeño tratamiento térmico previo a su utilización.

La reducción de los pesos, el incremento en el uso de elementos prefabricados, generará una serie de ventajas tanto en los procesos constructivos, así como en el comportamiento futuro de las estructura.

I.2 OBJETIVOS

I.2.1 Objetivo General

- En el presente trabajo se estudiará la aplicación de un material alternativo en la producción de hormigones livianos, entregando una caracterización y evaluación del comportamiento de los mismos, usando como materia prima Poliestireno Expandido Modificado (MEPS), en reemplazo de el agregado grueso natural.

I.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensayos de laboratorio acordes a las exigencias de la Normativa Chilena, con el fin de caracterizar el material sustituyente (MEPS), y analizar su viabilidad en el reemplazo del agregado natural.
- Obtener un hormigón liviano con alta resistencia en sus primeras edades (desde los 7 a los 28 días).
- Entregar un estudio de carácter investigativo, de manera que sirva como base para estimular la formulación de nuevas hipótesis y orientar la realización de nuevas investigaciones en el área.
- Desarrollo de probetas de hormigón liviano, con agregado de poliestireno expandido modificado, siendo éste el reemplazo de material agregado grueso en igual volumen, realizando probetas con un 30%, 50% y 70% de MEPS.
- Determinar un hormigón con cierta dosificación, que asegure la resistencia requerida, pero que posea un bajo peso específico.

I.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

La utilización de Poliestireno Expandido Modificado, en la fabricación de hormigones livianos de alta resistencia, analizando su capacidad mecánica ante todo, dejando fuera del alcance de este estudio el comportamiento frente a agentes químicos agresivos.

I.4 METODOLOGIA Y ESTRUCTURA DE TRABAJO

Con el fin de poder desarrollar de manera óptima los objetivos antes mencionados, el presente trabajo constituirá de las siguientes etapas.

- **Recopilación de material teórico:** Esta etapa constará de la búsqueda y recolección del material referido a los avances teóricos de análisis, normativas de diseño y resultados de hormigones livianos. Esta información será tanto actualizada como básica y se obtendrá, ya sea, en bibliotecas, información cibernética, entrevistas personales con docentes relacionados al tema, tesis de postgrado y trabajos previamente realizados en el área.
- **Optimización de Poliestireno Expandido Modificado Para Utilización en Hormigones Livianos:** se procederá a la fabricación de MEPS, utilizando un horno convencional, con temperatura y tiempo controlado, de manera de evaluar la mejor combinación para su reutilización en hormigones.
- **Diseño de Dosificación de Mezcla de Hormigón:** En esta fase se determinará la dosificación a utilizar, estudiando las bandas de agregados, relación agua cemento, y el porcentaje a reemplazar de agregado grueso por poliestireno expandido modificado.
- **Fabricación y Ensayo de Probetas:** Se realizarán nueve muestras de probetas de hormigón de cada mezcla a utilizar, reemplazando el agregado grueso en un 30%, 50% y un 70% del volumen original y estas serán ensayadas a los 7, 14 y 28 días.
- **Análisis de Resultados y Conclusiones:** En esta etapa se analizarán en detalle los resultados obtenidos, demostrando las características de cada dosificación, analizando trabajabilidad, densidad, capacidad de soporte a la compresión, etc., de manera de realizar una acabada discusión y comparación de los resultados obtenidos, para poder elaborar las conclusiones de esta investigación.

Capítulo II. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

II.1.- INTRODUCCIÓN

Desde la invención del hormigón moderno, a mediados del siglo XIX, hasta el inicio de la década de los 80, el hormigón ha sido una mezcla de agua, áridos y cemento, sin grandes innovaciones que alteren su comportamiento y desempeño de manera significativa.

Sin embargo, desde la época de los 80 en adelante la técnica del hormigón, ha sufrido grandes desarrollos, debido a la evolución de la tecnología, y equipos para los estudios de los hormigones y el uso de nuevos materiales.

Estos nuevos materiales, conocidos como aditivos reductores de agua, permitieron mejoras significativas en las propiedades de resistencia mecánica y durabilidad, como también reducción de masa específica, lo que implica una reducción considerable de cargas por peso propio, contribuyendo de forma directa a la reducción de costos.

Con la intención de contribuir al avance tecnológico de estos materiales, el presente trabajo demostrará, un estudio experimental sobre la utilización de poliestireno expandido modificado en hormigones livianos, ayudando a la reutilización del poliestireno expandido que se deja como desecho, aportando en la optimización de materiales, reducción de costos, descontaminación, y una nueva gama de resistencias no conocidas previamente, en hormigones livianos con poliestireno expandido.

II.2 ASPECTOS TEÓRICOS REFERENTES AL HORMIGÓN

II.2.1 DEFINICION DE HORMIGÓN

La norma chilena Nch170 Of85 “Hormigón – Requisitos generales” define al hormigón como el material que resulta de la mezcla de cemento, grava, arena, agua, eventualmente aditivos y adiciones en proporciones adecuadas, que al fraguar y endurecer, adquiere resistencia.

II.2.2 MATERIALES QUE COMPONEN EL HORMIGON

II.2.2.1 Cemento

El cemento es un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua, forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire, su velocidad de endurecimiento depende de la temperatura a la cual se esté trabajando, según lo expuesto en Nch148 Of68 “Cemento – Terminología, calificación y especificaciones generales”.

II.2.2.1.1 Proceso de Fabricación del Cemento

Es obtenido mediante un proceso de fabricación que utiliza principalmente dos materias primas: una caliza, con un alto contenido de cal en forma de óxidos de calcio, y un componente rico en sílice, constituido normalmente por arcilla o eventualmente por una escoria de alto horno.

Estos componentes son mezclados en proporciones adecuadas y sometidos a un proceso de fusión incipiente en un horno rotatorio, del cual se obtiene un material granular denominado clínquer, constituido por 4 compuestos básicos:

- Silicato Tricálcico ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$), designado como C3S.
- Silicato bicálcico ($2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$), designado como C2S.
- Aluminato tricálcico ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), designado como C3A.
- Ferroaluminato tetracálcico ($4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), designado como C4AF.

Estos se presentan en forma de cuatro fases mineralizadas, en conjunto con una fase vítrea, integrada por los dos últimos. Estas fases constituyen un 95 % del peso total del clínquer, siendo el 5 % restante componentes menores, principalmente óxidos de sodio, potasio, titanio, residuos insolubles y otros.

El clínquer es sometido a molienda mediante molinos de bolas hasta convertirlo en el polvo finísimo ya mencionado, adicionándose en esta etapa una proporción de yeso alrededor de un 5 % de su peso, destinado a regular el proceso de fraguado de la pasta de cemento, la que de otra manera endurecería en forma casi instantánea. El cemento así obtenido se denomina cemento Pórtland.

Durante la molienda se puede adicionar otros productos naturales o artificiales, constituyendo así los Cementos Pórtland con adiciones o Especiales, los que, junto con mantener las propiedades típicas del Pórtland puro (fraguado y resistencia), poseen además, otras cualidades especialmente relacionadas con la durabilidad, resistencia química y otras.

Entre las adiciones más conocidas y utilizadas están las puzolanas, las cenizas volantes y las escorias básicas granuladas de alto horno.

Estas adiciones presentan una reactividad química potencial, que se activa durante la hidratación del clínquer a temperatura ambiente. Así las puzolanas y cenizas volantes, reaccionan con la cal hidratada liberada durante la hidratación de los componentes activos del clínquer. En cambio, en el caso de las escorias este efecto se produce porque la cal hidratada liberada, desencadena la reacción de los componentes de la escoria, similares a los existentes en el clínquer. (Gálvez, 2007)

II.2.2.1.2 Fraguado y Endurecimiento de la Pasta de Cemento

El cemento al ser mezclado con agua forma una pasta, que tiene la propiedad de rigidizarse progresivamente hasta constituir un sólido de creciente dureza y resistencia.

Estas características son causadas por un proceso físico - químico derivado de la reacción química del agua, con las fases mineralizadas del clínquer y que en su primera etapa incluye la solución en agua de los compuestos anhidros del cemento, formando compuestos hidratados.

Los compuestos del cemento se hidratan a distinta velocidad, iniciándose con el C3A y continuando posteriormente con C4AF, C3S y C2S en ese mismo orden.

A partir de ese momento, el proceso no es cabalmente conocido, existiendo teorías que suponen la precipitación de los compuestos hidratados, con la formación de cristales entreverados que desarrollen fuerzas de adherencia, las que producen el endurecimiento de la pasta (Teoría cristaloidal de Le Chatelier) o alternativamente por el endurecimiento superficial de un gel formado a partir de dichos compuestos hidratados (Teoría coloidal de Michaelis), estimándose actualmente que el proceso presenta características mixtas. (Gálvez, 2007)

El endurecimiento de la pasta de cemento, muestra particularidades que son de interés para el desarrollo de obras de ingeniería:

- La reacción química producida es exotérmica, con desprendimiento de calor, especialmente en los primeros días.
- Durante su desarrollo se producen variaciones de volumen, de dilatación si el ambiente tiene un alto contenido de humedad, o de contracción si este es bajo.

El proceso derivado es dependiente de las características del cemento, principalmente de su composición y de su finura, los cuales condicionan en especial la velocidad de su generación.

II.2.2.2 Áridos

Según la norma chilena Nch163 Of79 “Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales” se define el árido como un material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaños estables, que pueden ser de origen ígneo, sedimentario metamórfico o artificial como escorias y arcillas expandidas, los que deben estar limpios, libres de terrones, partículas blandas o laminadas, arcillas, impurezas orgánicas y otras sustancias que por su naturaleza o cantidad, afecten las resistencia o durabilidad de morteros y hormigones.

Es el componente inerte del concreto, que representa entre un 65% y un 80% de su volumen y tiene como principales funciones:

- Proveer una masa de partículas aptas para resistir la acción de cargas aplicadas, la abrasión, el paso de la humedad y la acción climática.
- Resistir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado, endurecimiento y los cambios de humedad del aglomerante de cemento.

Debido a las características de los áridos se debe tener un buen control en la clasificación de ellos, ya que de eso depende la docilidad del hormigón fresco, la resistencia del concreto u hormigón endurecido, durabilidad de las estructuras y la economía de las mezclas.

La NCh163 Of.79 hace hincapié en los aspectos que hay que tener en cuenta en el estudio de los áridos.

- Sus Propiedades internas.
- Cualidades de la superficie.
- Propiedades del conjunto.

Además se deben tener en cuenta condiciones que deben cumplir para una buena integración en el hormigón como son:

- Condiciones de trabajabilidad.
- Condiciones de resistencia propia.

- Condiciones de estabilidad físico – químicas.

La granulometría de los áridos, tiene una gran influencia sobre las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Para obtener la misma trabajabilidad, un árido de granulometría fina necesitará, por lo general, una mayor cantidad de agua que uno de granulometría gruesa.

De acuerdo con los valores límites especificados en NCh163 Of79, estos se clasifican según el tamaño de sus partículas componentes en dos tipos: arena y grava.

II.2.2.3 Agua de Amasado

El agua debe cumplir con los requisitos especificados en la norma chilena Nch1498 Of82 “Hormigón - Agua de amasado - Requisitos”.

La presencia del agua es imprescindible en la confección de los hormigones, ya que posee dos diferentes aplicaciones, la primera es como ingrediente en la elaboración de mezclas, otorgándole trabajabilidad al hormigón fresco, y en la segunda se presenta como medio de curado en las estructuras recién construidas, proceso que consiste en lograr que el material disponga del agua que necesita el cemento para hidratarse, y mantenerse en condiciones moderadas de temperatura. En consecuencia, es un componente fundamental del concreto, ya que su presencia condiciona tanto el desarrollo de las propiedades en estado fresco, como en la etapa de endurecimiento.

- Condiciones de calidad:

Las condiciones que debe cumplir el agua de amasado se encuentran detalladas en NCh 1498 Of82 y en general se resumen en:

- El agua de mar solo puede usarse en la preparación de hormigones de resistencia específica inferior a. $150 \frac{Kg}{cm^2}$
- El agua potable se puede utilizar sin necesidad de analizar su calidad.
- El agua con contenido de azúcares (sacarosa, glucosa), no puede ser utilizada en la preparación de hormigones.

Las aguas en las cuales no es conocida su procedencia debe ser analizada, debiendo atenderse su composición a los límites señalados en NCh1498 Of82, y principalmente se analiza lo siguiente.

- Origen: No es recomendable utilizar aguas procedentes de desagües, relaves de minas, de alta montaña, de mar, residuales de industrias de azúcares, de aceite, de ácidos, o cualquier agua que tenga olor o sabor desagradable.
- Contenidos en suspensión: No son recomendables las aguas con una alta presencia de materiales en suspensión. Si no contienen excesos de sales disueltas, podrán utilizarse si se realiza un método de decantación que permita obtener agua sin turbidez.
- Contenidos disueltos: No son recomendables las aguas con sabor soluble o azucarado. Se debe recurrir a un análisis en un laboratorio especializado, cuando se desconozca si el agua a utilizar posee partículas peligrosas de sales disueltas.

Por lo tanto se debe utilizar un agua que esté libre de impurezas, sólidos en suspensión o materias orgánicas.

II.2.2.4 Aditivos

Según ASTM. Aditivo es el material, además del cemento, agua y áridos, que se añade al hormigón o mortero inmediatamente antes o durante el mezclado.

El objeto de añadir aditivos es el de modificar, acentuar o conferir alguna propiedad que de por sí la mezcla no posee, y hacerla temporal o permanente durante su estado fresco o endurecido.

Se presenta en forma de polvo o líquido. Los aditivos líquidos se emplean diluidos en agua, y los aditivos en polvo se prefiere sean agregados directamente al cemento. Se aplican en pequeñas dosis que varían de entre un 0,1% y un 5% del peso del cemento, y su efecto es de índole físico, químico o físico-químico. Esta dosis empleada tiene directa relación con la magnitud del efecto, debiéndose en todo caso, respetar los límites recomendados por el fabricante y el aporte de sustancias dañinas en el hormigón. Los aditivos se pueden clasificar como:

- Aditivos incorporadores de aire.
- Aditivos plastificantes (reductores de agua).
- Aditivos retardadores.
- Aditivos aceleradores.
- Aditivos impermeabilizantes.
- Aditivos expansivos.
- Misceláneos (agentes para lechadas de sellado y agentes formadores de gas).

El uso de aditivos está condicionado a:

- Que se obtenga el resultado sin tener que variar sustancialmente la dosificación básica.
- Que el aditivo no tenga efectos negativos en otras propiedades del concreto.
- Que un análisis de esto justifique su empleo.

El hormigón debe ser trabajable, terminable, resistente, durable, impermeable y resistente al desgaste. Estas cualidades se pueden obtener a menudo más conveniente y económicamente por medio del cálculo apropiado de la mezcla, y la selección de materiales adecuados sin recurrir a aditivos, con excepción de los agentes incorporadores de aire cuando sean necesarios. Sin embargo, puede haber casos en que se requieran ciertas propiedades especiales, tales como: tiempo de fraguado prolongado, aceleración de la resistencia a corta edad, atrasar el desarrollo del calor de hidratación. En estos casos es aconsejable considerar e investigar ciertos aditivos, ya que su uso en el hormigón puede producir los efectos especiales deseados. En algunos casos se puede desear propiedades que sólo son posibles de obtener con la ayuda de aditivos.

No obstante, no se puede considerar a ningún aditivo como sustituto de la buena práctica de hormigonado. La trabajabilidad de las mezclas y la calidad del hormigón se pueden mejorar por medio de ajustes en la granulometría de la mezcla de áridos y por medio del uso de agentes incorporadores de aire, humedificantes y dispersadores del cemento.

Las mezclas de ensayo siempre deben hacerse con el aditivo y los materiales de trabajo, ya que la acción de un aditivo está muy influenciada por la composición del cemento y por otros aditivos.

Antes de usar un aditivo se debe tener presente que:

- Todo empleo de aditivo presume un buen hormigón.
- Antes de decidir el empleo de un aditivo, se debe verificar si es posible obtener la propiedad deseada mediante la modificación de los componentes del hormigón, y las condiciones de la obra.
- Se debe considerar, además de las ventajas, sus inconvenientes, limitaciones, contraindicaciones y compatibilidades.
- El efecto que produce el aditivo se debe medir mediante ensayos de laboratorio, y resultados de faenas.

Pese a que no se menciona, existen condiciones bastante similares en referencia a los aditivos que se aplican, en la producción de morteros, es importante destacar que son de carácter más limitado, referentes a mejorar las propiedades de morteros para relleno,

autonivelantes, de inyección, constituyendo una parte fundamental de su tecnología. (R. Aguilar, 2007).

II.2.3 TIPOS DE ENSAYOS

II.2.3.1 Ensayo de Granulometría

Ensayo de Granulometría según exigencias de NCh 165 Of 77. "Hormigón Requisitos Generales". La granulometría es la determinación más corriente y una de las más importantes que se realizan a un árido; y representa la distribución de los tamaños que posee este. La granulometría está directamente relacionada con las características de manejabilidad del hormigón fresco, la demanda de agua, la compacidad y la resistencia mecánica del hormigón endurecido.

La norma Nch 165 Of 77, establece el procedimiento para efectuar el tamizado y determinar la granulometría de los áridos de densidad real normal.

La granulometría permite también obtener el módulo de finura del árido, y su expresión gráfica representada por la curva granulométrica.

Para determinar la granulometría de un árido se considera la masa de una muestra de ensayo; se tamiza la muestra y se determina la masa de las fracciones del árido retenidas en cada uno de los tamices. Se calculan los porcentajes parciales retenidos y se expresa la granulometría.

II.2.3.2 Densidad Aparente

El ensayo se realiza según la norma NCh 1116. Of 77. "Áridos para Morteros y Hormigones, Determinación de la Densidad Aparente". La densidad aparente en determinado estado de compactación permite transformar peso a volumen o viceversa. Relacionado con la densidad real permite conocer el grado de compacidad o huecos que posee el árido.

La norma NCh 1116 Of 77, establece los procedimientos para determinar la densidad aparente de los áridos, la cual puede ser suelta o compactada. La densidad aparente compactada puede obtenerse por apisonado o por percusión; en estos casos suelen llamarse densidad aparente apisonada y densidad aparente asentada, respectivamente.

Para determinar la densidad aparente se vacía el árido en una medida de capacidad volumétrica, especificada de acuerdo al tamaño máximo nominal del árido. Se determina la masa del árido que llena la medida. Se obtiene la densidad aparente dividiendo la masa del árido, por la capacidad volumétrica de la medida para dos muestras gemelas, expresando el resultado como el promedio aritmético de los dos ensayos.

El presente ensayo se realiza a los áridos con una densidad entre $2000 \frac{kg}{m^3}$ a $3000 \frac{kg}{m^3}$.

II.2.3.3 Densidades Reales y Absorción:

Los ensayos serán realizados según lo indicado en la norma NCh 1117. Of 77, "Aridos para Morteros y Hormigones, Determinación de la densidad Real y Neta y la absorción de agua en las gravas", para la grava y la gravilla.

La densidad real y neta de los áridos permite conocer los volúmenes compactos del árido, con el fin de dosificar morteros u hormigones. Relacionada con la densidad aparente permite conocer la compacidad del árido. La absorción está íntimamente relacionada con la porosidad interna de los granos de árido, y con la permeabilidad de los morteros y hormigones.

La norma NCh 1117 Of 77, establece los procedimientos para determinar las densidades real y neta, y la absorción de agua de los áridos gruesos o gravas de densidad real normal.

El procedimiento consiste en determinar la masa de una muestra pesándola al aire, en estado seco y en estado saturado superficialmente seco. Luego determinar su volumen por diferencia entre las pesadas al aire ambiente, y sumergida en agua. Conocidas las masas y su volumen se calcula las densidades real y neta, y la absorción de agua, en función de los valores obtenidos para las diferentes condiciones de pesada.

En tanto, para la arena se utilizará la norma NCh1239. Of 77 "Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas".

La absorción está íntimamente vinculada con la porosidad interna de los granos de árido, y con la permeabilidad de los morteros y hormigones.

La norma NCh1239 establece los procedimientos para determinar las densidades real y neta, y la absorción de agua de los áridos finos o arenas de densidad real normal.

El procedimiento consiste en determinar la masa de una muestra de ensayo, en condiciones seca, y saturada superficialmente seca. Luego, determinar su volumen como la masa del agua desplazada por el árido sumergido en un matraz aforado. Conocidas las masas y su volumen se calculan las densidades real y neta, y la absorción de agua en función de los valores obtenidos en las diferentes condiciones.

II.2.3.4 Ensayos de Compresión

La norma NCh 1037 Of 77, "Hormigón- Ensayo de Compresión de probetas cúbicas y cilíndricas", establece el método a realizar para este ensayo, detallando a continuación una leve descripción del procedimiento a seguir.

II.2.3.4.1. Marcado y Medición de Probetas Cúbicas. (Consideradas en este estudio)

- Las probetas se retiran del curado inmediatamente antes del ensayo, y se protegen con arpilleras mojadas hasta el momento en que se colocan en la máquina de ensayo.
- Colocar el cubo con la cara de llenado verticalmente
- Medir los anchos de las cuatro caras laterales del cubo (a_1 , a_2 , b_1 , b_2) aproximadamente a media altura, y las alturas de las caras laterales (h_1 , h_2 , h_3 , h_4) aproximando a 0,1 cm (1mm).
- Determinar la masa del cubo (M), aproximando a 50 gramos.
- Cuando se trate de probetas refrentadas, se debe medir y pesar antes del refrentado.

II.2.3.4.2 Ensayo

- Limpiar las superficies de contacto de las placas de carga y de la probeta, luego colocar la probeta en la máquina de ensayo alineada y centrada.
- Las probetas se colocan con la cara de llenado verticalmente.
- Acercar la placa superior de la máquina de ensayo, y asentarla sobre la probeta de modo de obtener un apoyo lo más uniforme posible.
- Aplicar carga en forma continua y sin choques a velocidad uniforme, cumpliendo con las siguientes condiciones:
 - a) Alcanzar la rotura en un tiempo igual o superior a 100 segundos.
 - b) Velocidad de aplicación de carga no superior a $3,5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \text{seg}$

Registrar la carga máxima (P) expresada en Kgf. o Mpa.



Figura 2.3.4: Prensa Hidráulica Para Ensayo de Compresión
(Fuente: Elaboración Propia, 2009)

II.2.3.4.3 Resultados

Previamente se calculan las dimensiones promedio a,b,h y d.

$$\text{Ancho promedio} \quad a = \frac{a1 + a2}{2}$$

$$\text{Fondo Promedio} \quad b = \frac{b1 + b2}{2}$$

II.2.3.4.4 Cálculo de Resistencia a Compresión

Calcular la resistencia a compresión (Rc) por la siguiente fórmula:

$$Rc = \frac{P}{S} = \frac{P}{a \cdot b} \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$$

Siendo S, superficie de carga.

II.2.3.5 Ensayos de Tracción por Flexión.

El ensayo será realizado de acuerdo a lo establecido en la norma NCh 1038 Of 77, “Hormigón – Ensayo de Tracción por Flexión”.



Figura 2.3.5: Prensa Hidráulica Para Ensayos de Probetas a Tracción por Flexión
(Fuente: Elaboración Propia, 2009)

Este método, establece el procedimiento para efectuar el ensayo de tracción por flexión en probetas prismáticas de hormigón simplemente apoyadas.

Cabe destacar que según la dimensión de las probetas se describen dos procedimientos no alternativos, y por ende de resultados no comparables, uno para una luz mayor o igual a 150 mm y otro para una luz menor de 150 mm.

Dimensión Básica de la Probeta	Ensayo	Descripción
≥ 150 mm	Cargas $P/2$ en los Límites del tercio Central	
< 150 mm	Carga P en el centro de la luz de ensayo	

Tabla 2.3.5 Descripción ensayo flexión
(Fuente: UCN, Laboratorio de Hormigón, 2009)

Procedimiento:

II.2.3.5.1 Marcado y Medición de Probetas:

- Las probetas se retiran del curado inmediatamente antes del ensayo, y se protegen con arpilleras mojadas hasta el momento en que se colocan en la máquina de ensayo.
- La luz de ensayo debe cumplir las siguientes condiciones:

Ensayo	Luz de Ensayo
Carga P/2 aplicada en los tercios	Igual o mayor que tres veces la altura de la probeta
Carga P Centrada	Igual o mayor que dos veces la altura de la probeta

Tabla 2.3.5.1 Descripción Aplicación de cargas ensayo flexión

(Fuente: UCN, Laboratorio de Hormigón, 2009)

- La distancia entre las líneas de apoyo y los extremos de la probeta debe ser igual o mayor a 2,5 cms.
- Con líneas rectas, finas e indelebles se marcan sobre las cuatro caras mayores las secciones de apoyo y de carga, que servirán para colocar y alinear la probeta en la máquina de ensayo
- Se registra la luz de ensayo (L), con aproximación de 0,1 cms.

II.2.3.5.2 Ensayo:

- Se limpian las superficies de contacto de la probeta y máquina de ensayo, y se ubica la probeta alineada y centrada, dejando la cara de llenado en posición vertical.
- Se aplica hasta un 5% de la carga provista de rotura, verificando que los contactos cumplen las tolerancias. Para mejor contacto entre la probeta y las superficies de apoyo y cargas, se acepta el uso de bandas de apoyo de cuero interpuestas en las superficies de contacto. Estas láminas serán de espesor mínimo 5 mm, ancho máximo 25 mm y largo mínimo igual al ancho de la probeta.
- Se continúa la aplicación de la carga sin choques y a velocidad uniforme, cumpliendo las siguientes condiciones:
 - a) Alcanzar la rotura en un tiempo igual o mayor a 300 segundos.
 - b) Velocidad de aplicación de carga no superior a 0,16 kg/cm²/seg.

Registrar la carga máxima (**P**) expresada en Kgf.

- Medir y registrar el ancho promedio (**b**) y la altura promedio (**h**) de la probeta en la sección de rotura, con aproximación de 0,1 cm (1 mm).

II.2.3.5.3 Resultados:

- **Ensayo con P/2 en los tercios:**

- Si la fractura se produce en el tercio central de la luz de ensayo, calcular la resistencia a tracción por flexión (**Rf**) del hormigón, por la fórmula siguiente:

$$Rf = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$$

- Si la fractura se produce fuera del tercio central de la luz de ensayo, pero en la zona comprendida entre el plano de aplicación de la carga y una distancia de 0,05L de ese plano, calcular la resistencia a tracción por flexión del hormigón por la fórmula siguiente:

$$Rf = -\frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot h^2} \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$$

Siendo “a” la distancia en cm, entre la sección de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje central de la superficie inferior de la probeta.

- Si la fractura se produce en otro sector de los indicados anteriormente, se desecha el ensayo.

- **Ensayo con P en el centro de la luz**

Calcular la resistencia a tracción por flexión del hormigón por la fórmula siguiente:

$$Rf = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$$

Los resultados de resistencia a tracción por flexión se expresan con una aproximación igual o inferior a $0,5 \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$.

II.3 CONCEPTO DE HORMIGÓN LIVIANO

Generalmente los hormigones livianos son diferenciados del tradicional, por su masa específica y su alta capacidad en aislación térmica. Sin embargo, éstas no son sus únicas características importantes, debido a que la utilización de agregados livianos, ocasionan cambios importantes en las propiedades de los hormigones, como son su trabajabilidad, resistencia mecánica, módulo de deformación, retracción y fluencia.

El hormigón liviano puede producirse por la introducción de: (i) los agentes gases como el polvo de aluminio o espumantes, (ii) agregado mineral ligero como el esquisto perlita, vermiculita expandida, piedra pómez, pizarra, arcilla, o (iii) los gránulos de plástico agregado, por ejemplo, espuma de poliestireno expandido (EPS), poliuretano o de otros materiales poliméricos [1]. Hay muchas publicaciones teniendo en cuenta los diferentes residuos como fuente de materias primas, para la fabricación de hormigón liviano. Sin embargo, la aplicación de los diferentes tipos de residuos producidos, ya sea dentro de una sola industria o por varias industrias situadas en una región pequeña, puede representar un problema complejo para su reutilización.

Este capítulo busca presentar algunas características y propiedades de los agregados para hormigones livianos, como también la utilización de hormigones livianos estructurales.

Usualmente se designa como hormigón liviano, a aquellos hormigones que poseen estructura porosa, agregados con masa específica inferior a la de los hormigones tradicionales, incorporación de aire o sin agregados finos. Este trabajo comprende sólo hormigones livianos con agregado de poliestireno expandido modificado (MEPS), que se consideren como hormigones livianos de alto desempeño.

II.3.1 DESARROLLO HISTÓRICO DEL HORMIGÓN LIVIANO.

Las primeras indicaciones de aplicación de hormigón liviano, datan de aproximadamente 3000 años (1100 AC), cuando las construcciones precolombinas, que existían en la actual ciudad de El Tajin (México), utilizaban una mezcla en base a piedra pómez, aglomerante de cenizas volcánicas y cal para la construcción de elementos estructurales. Los hormigones livianos también fueron utilizados por los romanos como por ejemplo, el Panteón de Roma que está hecho en base a cal y rocas volcánicas.

El inicio de la utilización de hormigón de cemento portland con agregados livianos, fue en la Primera Guerra Mundial, cuando American Emergency Fleet Building Corporation, construyó embarcaciones con hormigón liviano, con una resistencia a la compresión de 35 Mpa, y masa específica de $1700\text{kg}/\text{m}^3$, sin embargo la resistencia a la compresión de los hormigones tradicionales en esa época era solamente de 15 Mpa. (Holm, Bremner 1994)

A principios de los años 30, el hormigón liviano fue utilizado en la pista superior del puente San Francisco, esto proporcionó una economía en torno a los tres millones de dólares en acero. (Metha y Monteiro 1994).

Durante los años 50 fue el gran momento del hormigón liviano, al utilizarse en la construcción de edificios de gran altura, y luego fue desarrollado para realizar construcciones prefabricadas, que son la mayor ventaja de este tipo de hormigón.

En los años 70, con el gran avance en tecnología de los hormigones y el desarrollo de nuevos materiales componentes, fue mucho más accesible la obtención de hormigones de alta resistencia mecánica y durabilidad. Esos desarrollos no tardaron mucho tiempo en ser utilizados en hormigones livianos, aumentando aun más la utilización de este material en el ámbito de la construcción.

II.3.2 CLASIFICACION DE LOS HORMIGONES LIVIANOS.

Los hormigones livianos son obtenidos por la sustitución total o parcial de agregados tradicionales por agregados livianos, usualmente son clasificados por su masa específica, y se considera hormigón liviano, cuando tienen una densidad seca inferior a 2000 kg/m^3 y una resistencia a la compresión sobre los $17,2 \text{ Mpa.}$, Según el código ACI 318-05 (Building Code Requirements for Structural Concrete)

Los hormigones con agregados livianos se dividen en tres grupos basados en su uso y las propiedades físicas: estructurales, estructurales / aislantes, y de aislamiento. Los rangos de la densidad aparente, conductividad térmica y resistencia a la compresión, se detallan en la Tabla 3.2.3 (página 18).

II.3.2.1 Estructurales

Los hormigones livianos estructurales generalmente contienen agregados a partir de esquistos piropcesados, arcillas, pizarras, escorias expandidas, ceniza suelta expandida, y otros minerales extraídos de fuentes volcánicas porosas. El hormigón liviano estructural se clasifica normalmente por la resistencia a la compresión mínima, que fue establecida conjuntamente por la ASTM para agregados livianos C 330 y el Código ACI 318. La definición del código ACI 318 es de hormigón estructural realizado con áridos livianos, la densidad de equilibrio está determinada por la ASTM a través del “Método de Ensayo para Determinar la Densidad del Hormigón Liviano Estructural” (C 567) no superior a $115 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$ ($1842 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) y la resistencia a la compresión superior a $17,2 \text{ MPa}$ (2500 psi).

Esta es una definición, y no impide que se puedan permitir densidades más altas de equilibrio.

Prácticamente todos los agregados estructurales livianos se producen a partir de materias primas como arcillas, pizarras, cenizas sueltas o escorias de alto horno. Los agregados livianos de origen natural son extraídos de los depósitos volcánicos que incluyen los tipos de piedra pómez y escoria. Los métodos de piropcesamiento incluyen el proceso de horno giratorio (una larga y lenta rotación, cilindros casi horizontales revestidos con materiales refractarios similares a los hornos de cemento), el proceso de sinterización en el que una cama de materias primas, incluido el combustible es transportado por una rejilla móvil bajo capuchas de ignición, y la agitación rápida de la escoria fundida con cantidades controladas de aire o agua. Los agregados livianos estructurales pueden ser fabricados a partir de materias primas como, por ejemplo, pizarras y arcillas blandas que han limitado las aplicaciones estructurales en su estado natural.

II.3.2.2 Estructurales /Aislantes

Existen aplicaciones industriales en que se necesita de un relleno de hormigón aislante y que requiera resistencia a la compresión, la densidad de estos hormigones varía entre las de hormigones estructurales y de aislamiento. Estos concretos pueden ser producidos con alto contenido de aire e incluyen áridos livianos estructurales, o mezclas de arena aislante y agregado liviano, o pueden incorporar tanto agregados livianos estructurales como aislantes. La resistencia a la compresión varía de 3,4 a 17 MPa (500 a 2500 psi) y son comunes con la resistencia térmica que oscila entre la aislante y la del hormigón estructural, según tabla 3.2.3 (página 35).

II.3.2.3 Aislantes

Los hormigones aislantes son hormigones muy livianos no estructurales, empleados principalmente por su alta resistencia térmica, baja densidad y resistencia, para su confección se utilizan agregados como la vermiculita y perlita. Posee densidades, rara vez superior a 800 kg/m³ ($50 \frac{lb}{ft^3}$), la resistencia térmica es alta. Estos concretos no están destinados a ser expuestos a la intemperie y en general tienen una amplia resistencia a la compresión de alrededor de 0,69 a 3,4 MPa (100 a 500 psi).

Clasificación de Hormigones Livianos	Tipos de Agregados Livianos Usados en Hormigon	Rangos de Densidades (Kg/m ³)	Rangos de Resistencias a la Compresión (Mpa)
Estructural	Estructural Grado C330	1440 - 1840	Mayor a 17
Estructural - Aislante	Estructural C330 ó Aislante C332, ó Combinación de ambas	800 - 1440	Mayor a 3,4 hasta 17
Aislante	Aislante Grado C332	240 - 800	Mayor a 0,7 hasta 3,4

Tabla II.3.2.3: Clasificación de agregados livianos naturales para hormigón según utilidad y propiedades físicas
(Fuente: Lamond, 2006)

II.4 AGREGADOS LIVIANOS.

Los hormigones son materiales heterogéneos y sus propiedades dependen esencialmente de las propiedades individuales de sus materiales componentes, y de la compatibilidad entre ellos. Las principales propiedades de los hormigones que son modificadas, por la sustitución de agregados tradicionales por agregados livianos son: masa específica, trabajabilidad, resistencia mecánica, módulo de elasticidad, propiedades térmicas, retracción, etc.

Para la dosificación y producción adecuada de los hormigones livianos estructurales, es fundamental conocer las propiedades de los agregados livianos a utilizar, que pueden variar significativamente, en función de la materia prima utilizada y del proceso de fabricación, es aquí donde se desea marcar diferencia en el presente trabajo debido a que el poliestireno expandido sin modificar posee una capacidad de soporte casi nula.

II.4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS LIVIANOS

II.4.1.1 Agregado Liviano Natural

Son obtenidos a través de la extracción directa de yacimientos, pero su utilización no es muy común debido a la complejidad de obtención de dichos agregados, como también de la variabilidad de sus propiedades, siendo detalladas las más importantes a continuación.

II.4.1.1.1 Estructura Interna y Textura Superficial

Los agregados livianos tienen una densidad de partículas baja, debido a su estructura celular. La estructura celular de las partículas es normalmente desarrollada por el calentamiento de ciertas materias primas, en que la temperatura de los gases envuelve en su interior a la masa pirolástica, provocando la expansión y reteniendo el enfriamiento. Los agregados livianos

contienen un sistema distribuido uniforme de poros, que tienen un rango de tamaño de aproximadamente 5 a 300 μm (0.000040 pulgadas).

Dependiendo de la fuente y el método de producción, los agregados livianos presentan diferencias considerables en la forma de sus partículas y en la textura. Las formas pueden ser cúbica, redondeadas, angulares o irregulares. Las texturas pueden variar desde los poros finos, relativamente con una corteza muy suave, o muy irregular con grandes superficies expuestas de poros. La forma de las partículas y la textura de la superficie inciden directamente en la trabajabilidad, en la razón de agregado grueso y fino, en el contenido de cemento, y en la demanda de agua en la mezcla, así como otras propiedades físicas.(Lamond, *et al.*,2006).

II.4.1.1.2 Densidad Real y Aparente

La densidad real en los agregados, es la relación entre la masa del material y el volumen ocupado por las partículas individuales. Este volumen incluye los poros de las partículas, pero no incluye los espacios vacíos entre ellas. La densidad real de las partículas depende tanto de, la densidad real del material poroso vítreo y el volumen de poros dentro de las partículas, en general aumenta cuando disminuye el tamaño de las partículas. La densidad real de los poros libres de material vítreo puede ser determinada por la pulverización de áridos livianos en una vasija de molienda y luego siguiendo los procedimientos utilizados para la determinación de la densidad real del cemento.

La densidad aparente de los agregados se define como, el cociente entre la masa de una determinada cantidad de material, y el volumen total ocupado por él. Este volumen incluye los vacíos entre ellos, así como de los poros de las partículas. La densidad aparente es una función que depende de la forma de la partícula, densidad, tamaño, granulometrías y contenido de humedad, así como el método de obtención de los materiales (suelos, chancado, rodado), y varía no sólo para los diferentes materiales, sino que para diferentes tamaños y grados de un material en particular. (Lamond, *et al.*,2006).

II.4.1.1.3 Características de Absorción

Debido a su estructura porosa, los áridos livianos absorben más agua que su contraparte de agregados normales. Basado en una prueba de absorción de 24 horas y según lo estipulado en los procedimientos del método de prueba ASTM, gravedad específica y absorción de agregado grueso (C127), y ASTM método de ensayo para la obtención de densidad, densidad relativa y absorción de agregado fino (C 128), los agregados livianos absorben desde un 5% a un 25% más que un agregado seco. Por el contrario, los agregados de peso normal, en general, absorben menos del 2%. La diferencia más importante en las mediciones de contenido de humedad radica

en que para el caso los agregados livianos, la humedad es en gran medida absorbida en el interior de las partículas, mientras que en los agregados de peso normal, dicha humedad es principalmente absorbida como humedad superficial. El reconocimiento de esta diferencia esencial, es importante en la dosificación de la mezcla y en el control en terreno. La velocidad de absorción de los áridos livianos, depende de las características de tamaño de los poros, su conexión y distribución, especialmente las cercanas a la superficie. Los poros cerca de la superficie son fácilmente permeables y fáciles de llenar en las primeras horas de la exposición a la humedad. El interior de los poros, sin embargo, se llenan lentamente, haciendo necesario varios meses de inmersión. Una fracción del interior de los poros que no se encuentran interconectados permanece sin llenar después de años de inmersión.

El agua absorbida internamente en las partículas, no se encuentra disponible inmediatamente para la interacción química con el cemento, y el agua de la mezcla, pero es muy beneficiosa en el mantenimiento del curado en períodos largos, es esencial para la mejora de la hidratación del cemento y el agregado en la zona de contacto.

El procedimiento descrito en la norma ASTM C 127 formula la medición de la densidad en partículas saturadas en un picnómetro, para luego determinar el contenido de humedad absorbida por la muestra, que se ha sumergido en agua durante 24 horas. Con el agregado liviano, es más precisa la obtención del informe en un estado parcialmente saturado, después de 24 horas de remojo, debido a que las partículas no están totalmente saturadas todavía. Después de una inmersión de 24 horas en el agua, la tasa de absorción de la humedad en el agregado liviano será tan bajo que la densidad de las partículas parcialmente saturadas, permanecerá sin cambios durante el tiempo necesario para tomar medidas de peso en el picnómetro. Después de que el contenido de humedad es sabido, la densidad de las partículas en estado seco puede ser directamente calculada.

Siguiendo los procedimientos establecidos, el grado de saturación, esto es, la fracción del volumen de poros ocupados por el agua, generalmente está entre un rango de aproximadamente 25% a 35% de la saturación total teórica, de todos los poros para agregados livianos estructurales.

Desde una perspectiva práctica, y teniendo en cuenta, el hecho de que la mayoría de los hormigones livianos se colocan por bombeo, es habitual la práctica que el lote de áridos livianos, tenga una condición de humedad mayor que el "Valor de absorción", definido por los procedimientos de ASTM (24-h de inmersión). En esta condición la absorción del contenido de humedad será superior al definido arbitrariamente por la ASTM. El grado de saturación necesaria para un adecuado bombeo, se determina por la experiencia práctica en terreno para cada agregado, y puede ser obtenido por el proveedor de áridos livianos.

Debido a la pre-hidratación, existirá siempre una película de agua sobre la superficie de áridos livianos. Al igual que con el hormigón de peso normal, es esencial para evaluar la cantidad

de agua superficial para una determinación exacta del agua de mezclado, para lograr la trabajabilidad deseada y determinar la razón agua/cemento.

Para determinar con precisión la cantidad de agua absorbida, y la cantidad de agua de superficie, es necesario ejecutar el test de humedad de la siguiente manera. Tomar el peso de la humedad para una muestra del lote, después de secarse con una toalla, medir el peso de la superficie de la muestra seca. Realizar la prueba de secado para calcular el contenido de humedad absorbida dentro de la muestra. El agua de superficie (absorbida) en el agregado liviano se determina por la diferencia entre el agua recibida y el contenido de humedad absorbida. (Lamond, et al., 2006).

II.4.1.2 Agregado Liviano Artificial

Son obtenidos en procesos industriales, y normalmente son clasificados en base a la materia prima utilizada en el proceso de fabricación. En el presente trabajo se utilizará como materia prima el poliestireno expandido, el cual está clasificado como un agregado liviano artificial.

II.4.1.2.1 Forma y Textura Superficial

La forma y textura superficial de los agregados livianos artificiales, tienen influencia sobre algunas propiedades importantes de los hormigones, como son su resistencia mecánica, pues está relacionado con la cantidad de agua necesaria para la obtención de una buena trabajabilidad.

La textura y forma de los agregados livianos depende, esencialmente, del proceso de fabricación. Los agregados fabricados por el proceso de sinterización presentan una alta rugosidad, formas angulares y una superficie porosa. Este tipo de agregado proporciona una buena adherencia a la pasta de cemento, en función de la rugosidad de la superficie, así como también presenta altos valores de absorción de agua, en función de la alta porosidad externa. Debido a la forma angular de estos agregados, aumentan la cantidad de agua de la mezcla para la obtención de la trabajabilidad deseada.

Una desventaja de la utilización de agregados ligeros producidos por sinterización es la penetración de pasta de cemento en el exterior de los poros, que puede ir desde 30kg. hasta 100 kg de cemento por metro cúbico de hormigón, lo que aumenta el consumo de cemento y la densidad del hormigón.

Por otra parte, los agregados producidos en los hornos rotatorios, como arcillas dilatadas suelen tener forma esférica y una fina capa exterior con baja porosidad, lo que es posible obtener buena trabajabilidad con bajos coeficientes de agua / cemento. Sin embargo, de acuerdo a la

forma esférica, este tipo de agregado tiene una mayor facilidad de segregación que el producido por la sinterización

II.4.1.2.2 Estructura Interna, Resistencia Mecánica y Modulo de Deformación

La reducción en la densidad del hormigón ligero estructural, se debe a la utilización de los áridos con menor densidad, como las materias primas para los agregados de peso ligero y convencional, presentan valores de densidad del mismo orden de magnitud, se utiliza para incluir una estructura de poros en el agregado para la reducción del índice físico, cambiando así la estructura interna del agregado.

La estructura interna de los agregados livianos, tiene un efecto importante en la resistencia mecánica, y el módulo de deformación. Por la materia prima y proceso de fabricación, los agregados con una estructura muy porosa, es menos resistente que los agregados con una estructura menos porosa. El tamaño y la distribución de los poros, son también, decisivas en la resistencia mecánica de áridos ligeros. Para el mismo grado de porosidad, es interesante observar, que hay una distribución uniforme de los poros pequeños, en lugar de un gran diámetro y pocos poros. La reducción de la porosidad en algunas áreas específicas, también influye en la resistencia mecánica del agregado.

El valor de los módulos de deformación de los agregados de peso ligero puede ser estimado según la ecuación 1.1, que relaciona el módulo de deformación E_c (MPa) y la densidad γ (kg/m³) de áridos ligeros. Los valores de los módulos de deformación de los agregados ligeros utilizados en hormigón estructural varían entre 10 y 18 GPa. (HOLM, 1994)

$$E_c = 0,008 \cdot \gamma^2 \quad (1.1)$$

Los agregados de peso ligero con baja resistencia, tienen poca participación en la transmisión de las tensiones internas en el hormigón. Por lo tanto, cuanto mayor es la diferencia entre los valores de los módulos de deformación de los áridos, y la matriz de cemento, mayor es la diferencia entre la resistencia a la compresión de la pasta de cemento y concreto. El aumento en el módulo de deformación de los áridos ligeros, también aumenta los valores de resistencia a la compresión y el módulo del hormigón. (HOLM,1994)

II.4.1.2.3 Porosidad y Absorción de Agua

Las características de porosidad y absorción de agua de los agregados de peso ligero, afecta significativamente las propiedades del hormigón fresco, y el proceso de hidratación del cemento. La velocidad y la cantidad de agua absorbida por los agregados ligeros dependerá de los factores siguientes: la porosidad, la conectividad de los poros, características de la superficie del agregado y la humedad del mismo antes del mezclado (EUROLIGHTCON, 1999).

Otros factores que pueden influir en la absorción de agua de los agregados, son los aditivos, la temperatura y la presión de bombeo, en el caso de hormigón bombeado. La absorción de agua de los agregados, es proporcional a la consistencia del hormigón, y puede aumentar con el uso de superplastificantes. El uso de agentes ignífugos puede aumentar también, la absorción de agua de los áridos, lo que aumenta el tiempo entre la mezcla, y el inicio del endurecimiento del hormigón. Cuando se utiliza el hormigón bombeado, el conjunto absorbe una cantidad excesiva de agua, debido a las altas presiones utilizadas.

Para los agregados livianos con altos valores de absorción de agua, se recomienda comprobar la validez de saturación, para evitar la pérdida de trabajabilidad de hormigón fresco y evitar la formación de burbujas de aire en todo el conjunto. La pre-saturación de los agregados, aumenta la absorción de agua de ellos, sin embargo, reduce la absorción de agua después de la mezcla.

La gran cantidad de agua absorbida por el agregado ligero, puede ser perjudicial para algunas propiedades del hormigón en estado endurecido, como la contracción por secado, aumento de la densidad y menor resistencia al fuego. Sin embargo, la absorción de agua de los agregados de peso ligero, tiene algunos aspectos positivos, como la mejora de las propiedades de la zona de transición, entre los agregados y la matriz de cemento. Además, el agua absorbida por los agregados livianos es beneficiosa para el curado interno del hormigón.

II.5 PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

El proceso de fabricación del Poliestireno Expandido o EPS consta de las siguientes fases:

- Preexpansión
- Reposo intermedio y estabilización
- Proceso de transformación
- Corte / Mecanizado

II.5.1 PREEXPANSIÓN

La materia prima es introducida en unas máquinas denominadas preexpandidores. El proceso consiste en la expansión de la perla de poliestireno expandido, mediante la aportación de vapor de agua. De esta forma, el agente expansivo que lleva la materia prima, permite que ésta se expanda, bajando por tanto su densidad aparente. El control de la densidad, se realiza mediante el control de distintos parámetros, como la temperatura y del tiempo de exposición, la densidad aparente del material disminuye de unos 630 kg/m³ a densidades que oscilan entre los 10-30.kg/m³.

En el proceso de preexpansión, las perlas compactas de la materia prima se convierten en perlas de plástico celular con pequeñas celdillas cerradas que contienen aire en su interior. (Textos Científicos, 2005)

II.5.2 REPOSO INTERMEDIO Y ESTABILIZACIÓN

Cuando las partículas recién expandidas se enfrían, se crea un vacío interior que es preciso compensar con la penetración de aire por difusión. Para ello, el material se deja reposar en silos ventilados durante un mínimo de 12 horas.

De este modo las perlas alcanzan una mayor estabilidad mecánica y mejoran su capacidad de expansión, lo que resulta ventajoso para la siguiente etapa de transformación. Dependiendo de la densidad aparente del poliestireno expandido a transformar, puede someterse la materia prima preexpandida a una segunda preexpansión, o bien, directamente pasar al proceso de transformación. (Textos Científicos, 2005)

II.5.3 PROCESO DE TRANSFORMACIÓN

II.5.3.1 Bloque

La perla preexpandida, entra en un bloque en el que se ve sometida a un proceso de soldadura, que se consigue mediante su acatamiento a una aportación de vapor de agua, durante un período que varía según el tipo de densidad aparente de la pieza a obtener, proceso realizado en una autoclave, después de un proceso de estabilización sale de la máquina un bloque

II.5.3.2 Moldeado

El moldeado es un proceso similar al del bloque, solo que éste se realiza en una máquina en la cual hay un molde con la forma concreta de la pieza que se va a fabricar.

En este proceso el material se introduce en el molde y es soldado mediante aporte de calor. (Textos Científicos, 2005)

II.5.4 CORTE – MECANIZADO

II.5.4.1. Corte en Recto

Los bloques de poliestireno expandido obtenidos, pueden ser cortados en planchas, como último paso del proceso de fabricación, para dejar el material preparado para servir al consumidor. Dicho proceso se lleva a cabo, mediante la utilización de una mesa de corte, en tres dimensiones en la que hay dispuesto un sistema de hilos calientes, que nos permiten hacer del bloque tantas planchas como sea posible de las medidas requeridas. (Textos Científicos, 2005)

II.5.4.2 Corte en Formas

Cuando es necesario obtener formas más complicadas, el bloque es mecanizado en pantógrafos de control numérico, que permite realizar cortes en dos dimensiones. (Textos Científicos, 2005)

II.6 PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO MODIFICADO

La descripción general de este proceso se muestra en la figura que aparece a continuación:



Figura II.6: Proceso de Producción de Poliestireno Expandido Modificado

(Fuente: Abdulkadir,2009)

Según estudios realizados en Turquía, con el fin de investigar el cambio de volumen, densidad, conductividad térmica y resistencia a la compresión mediante la técnica de tratamiento térmico, una serie de cubos y placas fueron preparados en el laboratorio, de 50mm x 50mm x 50mm, y 300mm x 200mm x 35mm, Se produjo una gran reducción de tamaño al final del tratamiento térmico, todas las muestras de EPS se cortaron más grandes que el de la dimensión estándar del agregado.

Todas las muestras de EPS fueron expuestas a las diferentes temperaturas tales como 100, 110, 120, 130, 140, 150 °C durante 15, 30, 45, 60 y 120 minutos en un horno eléctrico digital controlado. Fué posible reducir el volumen de residuos de EPS a 1/10-1/20 del tamaño original. (Abdulkadir,2009)

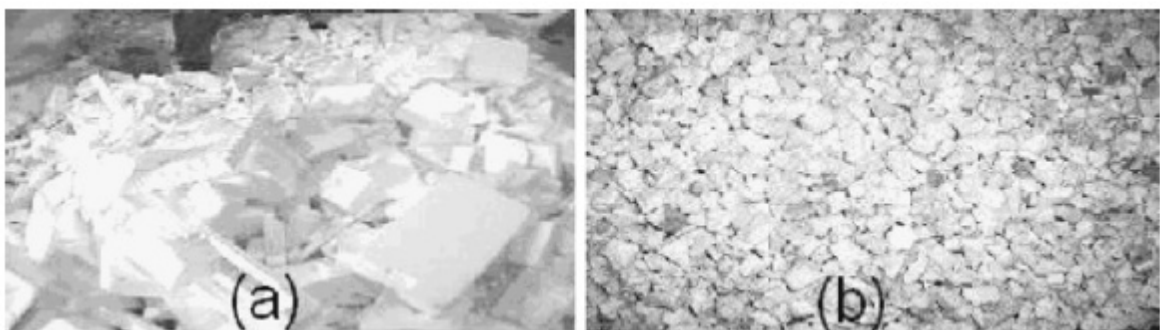


Figura II.6 (a), (b): Cambio de Volumen de Poliestireno Expandido Modificado

(Fuente: Abdulkadir,2009)

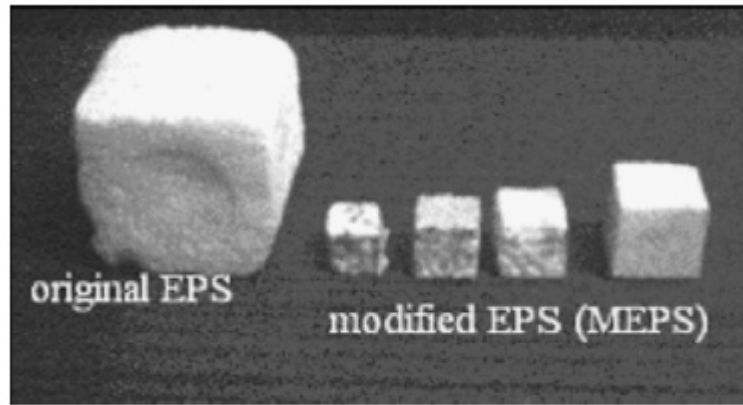


Figura II.6 (c): Comparación de Volúmenes Antes y Después del Tratamiento
(Fuente: Abdulkadir,2009)

Cuando un residuo EPS después del tratamiento térmico es calentado a baja temperatura, se transforma de un estado espumoso a un estado plástico. Superior a 130° C y 15 minutos, la muestra de MEPS tiene una estructura que era demasiado dura y quebradiza. Después de 15 minutos, los valores fueron evaluados de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Cambio del peso y volumen \%} = \frac{m1 - m2}{m2} \cdot 100$$

Donde m1 y m2 son los pesos o el volumen de las muestras de antes y después del tratamiento térmico. Los cambios de peso de los especímenes se ven afectados por el aumento del tratamiento térmico, y es difícil sugerir una relación del cambio de peso de acuerdo a la temperatura de tratamiento térmico.

La densidad del EPS fue casi constante hasta los 100° C por 15 minutos de exposición. La variación de la densidad con la temperatura se presenta en la siguiente fig.:

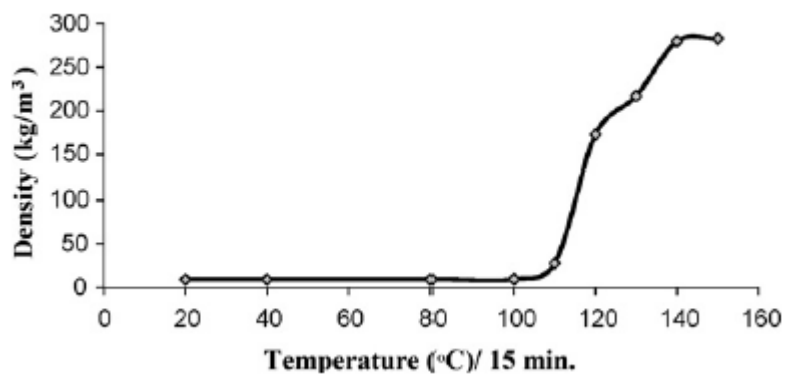


Figura II.6 (d): Grafico de Variación de Densidad Versus Temperatura
(Fuente: Abdulkadir,2009)

A partir de esto se puede observar que la densidad aumenta con el aumento de la temperatura. En 110, 120, 130, 140 y 150° C durante 15 minutos, la densidad de los MEPS aumento de 189%, 1700%, 2070%, 3140% y 3130%, respectivamente. El máximo porcentaje de incremento fue a los 120° C. La máxima densidad se observo a 140° C, pero la estructura de los MEPS fue cambiando completamente y el interior se llena de huecos con la materia fundida. Después de esta temperatura, la densidad era constante e incluso disminuye un poco. Con el hecho de aumentar el tiempo, conduce a una disminución gradual del volumen. Los cambios en el volumen debido a la temperatura de 20 a 80° C durante 15 minutos fueron constantes. (Abdulkadir,2009)

II.6.1 DISPONIBILIDAD DE LOS MEPS MEDIANTE EL TRATAMIENTO TÉRMICO

Los gránulos desmenuzados son producidos por la desintegración mecánica, formando losas inservibles o de mala calidad de EPS reciclado. Las espumas EPS fueron reducidas por chancado manual en pedazos pequeños, de tal manera que su forma y tamaño eran de 3-10 veces superior al de los agregados naturales antes del tratamiento térmico. Se obtuvo gránulos de forma irregular. La trituradora de EPS puede usarse opcionalmente.

Los residuos de espumas triturados EPS fueron sometidos al método de tratamiento por calor para la modificación, se explico antes, 130° C durante 15 minutos, en un horno eléctrico digital controlado. Después de 15 minutos, los materiales de desecho triturados MEPS están disponibles. El volumen de EPS se reduce 1/20 del tamaño original que puede ser visto en la figura siguiente, que obtuvo agregados MEPS, tienen diferentes tamaños y forma por el tratamiento térmico. (Abdulkadir,2009)

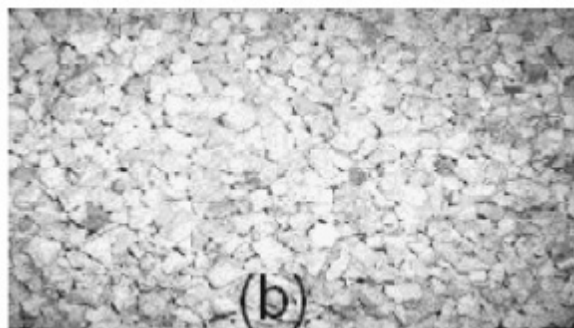


Figura II.6.1: Obtención de MEPS Después del Tratamiento

(Fuente: Abdulkadir,2009)

II.6.2 MÉTODOS UTILIZADOS PARA EVALUAR PROPIEDADES DEL MEPS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

II.6.2.1 Conductividad Térmica de los MEPS

La reducción del consumo de energía en la construcción, la producción de materiales de aislamiento térmico, y la solución de problemas del medio ambiente, como el reciclado de residuos industriales y domésticos, son cada vez mayores problemas. Es importante conocer las propiedades térmicas de este nuevo material, a fin de estudiar su rendimiento en el aislamiento de los edificios. Con el fin de investigar la conductividad térmica, de los agregados de los MEPS, obtenidos para las espumas de EPS tienen una densidad de residuos diferentes. MEPS es altamente resistente al flujo de calor. Con una uniforme estructura de límites de radiación, convención y conducción de transferencia de calor. (Laukaitis, 2005)

II.6.2.2 Investigación de Resistencia a Compresión de los MEPS.

La resistencia a la compresión de las muestras, después del tratamiento térmico se determino sobre los especímenes cúbicos MEPS, sometidos a pruebas estándares de compresión uniaxial en deformaciones de un 10%. , cuando la deformación alcanza el 10%, el fracaso de los ejemplares EPS es aceptada. (Laukaitis, 2005),

II.6.2.3 Absorción de Agua, Densidad, Resistencia de los Agregados MEPS al Ciclo de Hielo - Deshielo

Los MEPS no absorben agua, porque esta compuesto por millones de células cerradas. La relación de absorción de agua de los agregados de MEPS son calculados tanto en peso como por los métodos volumétricos de grado 4/16 mm. La resistencia al hielo-deshielo de los agregados pueden ser evaluados de varias maneras. En este estudio fueron sometidos agregados MEPS a los ciclos de alternancia hielo-deshielo. Después que la muestra fue sometida a 10 ciclos de hielo y deshielo, la muestra se seca hasta tener un peso constante a una temperatura de 60° C. La muestra pasó por un tamiz numero 8. El material que paso por el tamiz numero 8 se calculo como el porcentaje de perdida, basada en el horno original de peso en seco de la muestra antes de la prueba de resistencia al hielo-deshielo se aplico al tamaño total de 8/16 mm MEPS.

Capítulo III. MATERIALES Y ENSAYOS A REALIZAR

III.1 INTRODUCCION

El presente capítulo tiene como objetivo describir los materiales, equipos y métodos utilizados en la realización de probetas de hormigón liviano, con agregado de poliestireno expandido modificado (MEPS), con el fin de obtener las principales propiedades mecánicas de dicho material. Los principales datos serán obtenidos a través de los ensayos a compresión y flexotracción de probetas, con diferentes dosificaciones, variando la proporción de el agregado liviano, que en este caso corresponde a poliestireno expandido modificado en reemplazo del material granular.

III.2 MATERIALES COMPONENTES DEL HORMIGÓN LIVIANO CON POLIESTIRENO EXPANDIDO MODIFICADO.

III.2.1 CEMENTO

El cemento utilizado, fue cemento portland alta resistencia, de cementos Bío-Bío, producto certificado que cumple con las exigencias de la normativa Chilena vigente. (NCh 148 Of68).

De acuerdo a ésta, se clasifica según su composición y resistencia, como cemento clase Siderúrgico, Grado Corriente. El que presenta alta resistencia a temprana edad, lo cual implica una buena reducción de tiempo, en el desarrollo de este estudio. El cemento fue comprado en una misma partida, la cual estaba guardada, en un lugar fresco y seco, para garantizar que no tenga contacto con la humedad.

Según recomendación del fabricante, se pide manipular el cemento en ambientes ventilados, para evitar la inhalación del producto. Se debe cubrir el cuerpo con ropa de trabajo, guantes y anteojos de seguridad. Para mantener el cemento en óptimas condiciones, se debe proteger del aire húmedo.

Se debe guardar en bodegas ventiladas y secas, aisladas del suelo y separado de los muros. El cemento utilizado tenía menos de 60 días de la fecha de envasado registrada en el saco, según ficha técnica del fabricante.

III.2.2 ARIDOS

Se utilizó arena media y gravilla de 1 ½ chancada, comprada en Valdicor, empresa de áridos especializada en venta de estos materiales, la cual estaba limpia de impurezas de materia orgánica. El material fue analizado para obtener su banda, porcentaje de humedad, masa específica aparente, masa unitaria y su curva granulométrica, según exigencias de la normativa chilena vigente.

III.2.3 AGUA

El agua debe cumplir con las condiciones básicas, las mismas requeridas para la construcción de cualquier tipo de hormigón, por ejemplo no debe presentar materia orgánica o presencia de sustancias químicas dañinas, que produzcan oxidación en la armadura u segregación de los áridos, por ejemplo las sales o azúcares. En la construcción de la mezcla se emplea agua potable del LEMCO, ya que el agua de la red pública cumple con los requisitos de Ph, dureza, sólidos en suspensión, materia orgánica etc.

III.2.4 ADITIVOS

De acuerdo a la normativa chilena, los aditivos para hormigones con cemento portland, son productos utilizados en pequeñas cantidades, para modificar algunas de las propiedades de los hormigones.

Dentro de esta especificación, se utilizó un aditivo plastificante, para poder reducir la razón agua cemento, y obtener una mejor trabajabilidad, en la preparación de probetas de ensayo. El aditivo utilizado se llama POLYHEED 715 (aditivo plastificante reductor de agua con tiempo de fraguado normal).

En las especificaciones técnicas del producto se destaca lo siguiente:

- Mejora notablemente la bombeabilidad de las mezclas, incluso al reducir la cantidad de finos de la misma.
- Facilita la colocación y el acabado en hormigones.
- Tiempo de fraguado normal.
- Mayor resistencia a la Flexión y Compresión.
- Menor cantidad de agua necesaria para la trabajabilidad de las mezclas.
- Menor segregación y exudación de las mezclas.

La dosificación del aditivo fue al 0,5% por kg. de cemento.

III.2.5 MATERIAL EN BASE A POLIESTIRENO EXPANDIDO MODIFICADO

Según el enfoque que tiene el presente trabajo, el poliestireno expandido fue adquirido en una obra en construcción, recogiendo todo el material de rechazo para poder reciclarlo y volver a reutilizar este material.



Figura III.2.5.1: Poliestireno Expandido Reciclado.
(Fuente: Elaboración Propia)

El poliestireno expandido, fue triturado y luego puesto en un horno a una temperatura de 120° C por 17 minutos, debido a que según la experiencia adquirida, fue la mejor combinación para el tipo de utilidad que se quería dar.



Figura III.2.5.2: Poliestireno Triturado en Horno Para su Modificación.
(Fuente: Elaboración Propia)



Figura III.2.5.3: Retiro del Poliestireno del Horno, Haciéndose Evidente su Disminución de Tamaño.
(Fuente: Elaboración Propia)

El poliestireno expandido sin modificar tenía una densidad de 20 kg/m^3 , una capacidad de soporte de 12 kg/cm^2 antes de que se deforme un 10%. Sacamos muestras en cubos de 8 cms, para poder ver la variación de volumen densidades y capacidad de soporte.

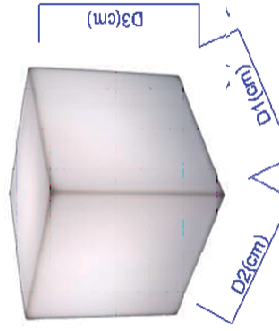
Luego del tratamiento térmico en hornos con temperatura y tiempo controlado se pudo obtener lo siguiente.



FiguraIII.2.5.4: Muestras de Poliestireno Modificado por Temperatura.
(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla III.2.5: Muestras en cubos de 8 cms. de poliestireno y sus dimensiones luego de aplicar temperatura.
(Fuente: Elaboración Propia)

Muestra	Dimensión 1 (cm)	Dimensión 2 (cm)	Dimensión 3 (cm)	Volumen(cm ³)	Peso (gr)	Densidad (gr/cm ³)	Densidad Kg/m ³)	Desviación estándar
1	2,50	3,00	2,30	17,25	5,28	0,31	305,90	295,87
2	2,50	2,50	2,40	15,00	5,15	0,34	343,46	414,44
3	2,50	2,60	2,70	17,55	5,20	0,30	296,31	717,95
4	2,50	2,30	2,50	14,38	4,69	0,33	326,16	9,37
5	2,50	2,50	2,40	15,00	4,79	0,32	319,53	12,74
6	2,50	2,60	2,55	16,58	5,57	0,34	336,27	173,27
7	2,50	2,40	2,40	14,40	4,83	0,34	335,51	154,05
8	2,50	2,60	2,60	16,90	5,30	0,31	313,60	90,23
9	2,40	2,35	2,60	14,66	4,86	0,33	331,17	65,11
Densidad Promedio							323,10	
Desviación estándar							15,54	



Nota:
 Balanza Analítica
 Sartorius cp 2245
 máx.: 220 gr d=0,1 mg

El material granular obtenido, después del tratamiento térmico, tenía características similares a una gravilla chancada. En capacidad de soporte entregó como resultado 83 kg/cm² antes de que se deformara un 10 %.

III.3 Dosificaciones Experimentales:

Los ensayos desarrollados para este estudio, fueron realizados según la Normativa Chilena vigente. Como primera etapa y con el objetivo de caracterizar los materiales a utilizar, fueron desarrollados los ensayos de granulometría, masa específica aparente y unitaria de la grava, arena y poliestireno expandido modificado.

Posteriormente se inicio el proceso de dosificación de los hormigones a estudiar, determinando los índices de sustitución de grava por poliestireno expandido modificado, de esta forma se dejó en claro los volúmenes de cada material necesario para poder realizar las probetas que más tarde serían ensayadas.

Fueron desarrolladas tres tipos de mezclas, más una de referencia, con nueve probetas cada una, lo que dio un total de 36 probetas.

La primera de referencia consta de una mezcla en hormigón tradicional con una cantidad de cemento de $340 \frac{kg}{m^3}$, una razón agua cemento de 0,41 y una cantidad de aditivo igual al 0,5% del peso de cemento.

Las otras mezclas se desarrollaron, dejando de manera constante la razón agua cemento y la cantidad de aditivo y solo se fue variando la cantidad de poliestireno expandido modificado, en reemplazo de la gravilla de 1 ½ “, la primera reemplazó un 30% del volumen de gravilla, la siguiente un 50% y la ultima un 70%.

III.4 PLANIFICACION Y PREPARACION DE ENSAYOS

Todo el material de poliestireno expandido modificado utilizado, fue guardado y mantenido en un ambiente seco y libre de humedad. El cemento fue mantenido en su embalaje de fábrica y protegido contra la humedad ambiente. La gravilla y arena utilizadas, fue mantenida en sacos plásticos.

Para la producción de mezclas con el uso de poliestireno expandido modificado, el agregado medio fue reemplazado en porcentajes de 30%, 50% y 70% respectivamente.

El material granular de poliestireno expandido modificado, presentó una forma bastante homogénea, con una superficie estriada, porosa, liviana, de geometría irregular similar a la grava chancada.



Figura 4: Material granular de poliestireno expandido modificado.
(Fuente: Elaboración Propia)

III.4.1 CONFECCION DE PROBETAS

Las dosificaciones experimentales fueron desarrolladas dejando constante la relación agua/cemento y la cantidad de aditivo plastificante, sin embargo esta mezcla posee una alta cantidad de cemento y fue escogido debido a dos hipótesis:

La primera, que la mayor cantidad de cemento puede compensar la eventual pérdida de resistencia en función al reemplazo gradual del material mineral por poliestireno expandido modificado, la segunda hipótesis, considerando la posibilidad de encontrar una alta resistencia y evitar que el material de poliestireno expandido modificado se segregue fácilmente contaminando el medio ambiente.

Los materiales componentes del hormigón, fueron mezclados en una betonera facilitada por el LEMCO, con una capacidad de 125 litros., de baja revolución y velocidad constante.

Primero se colocó el 50% del agua requerida, luego el arena, después el cemento, el material granular medio (poliestireno expandido modificado y grava de 1 1/2”), para finalizar con el resto de porcentaje de agua con el aditivo. Después de esto, la betonera trabajó en forma constante, durante 2 minutos, para obtener una mezcla homogénea, de ahí se dejó descansar la mezcla durante 2 minutos, para después vaciar dentro de los moldajes, previamente revestidos con desmoldante. El moldaje fue relleno en tres capas de forma lenta y con un pisón se ejecutaron

10 golpes por capa, de esta forma evitar que queden burbujas de aire y a la vez evitar la segregación del material liviano



Figura 4.1.(a): Moldes Metálicos de 15x 15 cms. Provistos de Desmoldante
(Fuente: Silva, 2007)



Figura 4.1.(b): Betonera de Baja Revolución en Confección de Mezcla
(Fuente: Elaboración Propia)



Figura 4.1.(c): Llenado y Rotulación de Moldajes Para Probetas de Ensayo.
(Fuente: Elaboración Propia)

III.4.2 DESMOLDE DE PROBETAS

Las probetas de la serie A, serie B y serie C, fueron desmoldadas a las 48 horas respectivamente, dejando las probetas de la Serie D por siete días antes de desmoldar.



Figura 4.2.(a): Desmolde de Probetas de Hormigón.
(Fuente: Silva, 2007)

III.4.3 CURADO

Todas las probetas cúbicas para ensayos de compresión axial y ensayos de flexocompresión, fueron desmoldadas a las 48 horas, excepto las que poseen un 70% de poliestireno expandido modificado, debido a que el material no absorbe agua, fue mucho más lento el proceso de endurecimiento inicial, por lo cual se tuvo que desmoldar a los siete días.

Luego de el desmolde de las probetas, todas fueron llevadas a las piscinas de curado del laboratorio Lemco de la Universidad Austral de Chile, donde permanecieron hasta el día correspondiente a ensayar.



Figura 4.3: Curado de Probetas en Piscina del LEMCO.
(Fuente: Elaboración Propia)

III.5 ENSAYOS

III.5.1 DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRIA

Este ensayo fue realizado siguiendo la norma NCh 165 Of77, la cual establece los índices para el material fino y granular de origen pétreo y establece los porcentajes retenidos según cada tamiz.

III.5.2 DETERMINACIÓN DE MASA ESPECIFICA APARENTE.

Este ensayo fue realizado siguiendo la norma NCh 1116 Of77, la cual establece los índices para el material fino y granular.

III.5.3 DETERMINACION DE DENSIDAD REAL Y NETA Y LA ABSORCION DE AGUA.

El presente ensayo fue realizado siguiendo las indicaciones descritas en la Norma NCh 1117 Of.77

El procedimiento consiste en determinar la masa de una muestra pesándola al aire, en estado seco y en estado saturado superficialmente seco. Luego determinar su volumen por diferencia entre las pesadas al aire ambiente y sumergida en agua. Conocidas la masa y su volumen se calcula las densidades real y neta y la absorción de agua, en función de los valores obtenidos para las diferentes condiciones de pesada

III.5.4 DETERMINACION DE RESISTENCIA A COMPRESION AXIAL

Este ensayo fue realizado siguiendo la Norma NCh 1017 Of77 y NCh 1037 Of 77. Los materiales del hormigón fueron mezclados en una betonera de velocidad constante facilitada por el LEMCO descrita anteriormente, antes de ser moldeados los moldes fueron untados con desmoldante para facilitar el trabajo posterior.

Las probetas en estado fresco fueron enrasadas para dejar su superficie lisa para que se ejecute de mejor forma el ensayo y exista una mejor distribución de cargas, al ensayarla en una prensa hidráulica del laboratorio.



Figura 5.4.1: Prensa Hidráulica Para Ensayo a Compresión.
(Fuente: Elaboración Propia)



Figura 5.4.2: Ensayo a Compresión de Probetas de Hormigón.
(Fuente: Elaboración Propia)

III.5.5 DETERMINACION DE RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN

El ensayo fue realizado siguiendo la norma NCh 1038 Of77. Donde se establecen los procedimientos para ensayar las probetas prismáticas simplemente apoyadas y obtenidas según la norma NCh 1017 Of 77.



Figura 5.5.1: Prensa Hidráulica Para Ensayo a Tracción por Flexión.
(Fuente: Elaboración Propia)



Figura 5.5.2: Probetas Prismáticas para Ensayo a Tracción por Flexión.
(Fuente: Elaboración Propia)

IV RESULTADOS

IV.1 CARACTERIZACIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO MODIFICADO

La tabla IV.1 presenta los resultados del ensayo de granulometría del poliestireno expandido modificado y su módulo de finura.

Granulometría Poliestireno Modificado	
Masa Seca (gr)	2874,36
Masa Lavada y Seca (gr)	2858,02

ASTM	mm	M. Ret gr.	% Ret Parcial	% Que Pasa
3"	80			
2 1/2"	63			
2"	50			
1 1/2"	40			
1"	25			
3/4"	20			100,00
1/2"	12,5	1250,09	43,74	56,26
3/8"	10	632,48	22,13	34,13
Nº4	5	564,76	19,76	14,37
Nº8	2,5	14,87	0,52	13,85
Nº16	1,25	213,49	7,47	6,38
Nº30	0,63	60,88	2,13	4,25
Nº50	0,315	32,01	1,12	3,13
Nº100	0,16	85,45	2,99	0,14
Residuo		0,00	0,00	
Total masa final (mf) (gr)		28,58		
Variación [(100xmf)/mic]		0,00		
Observaciones		% de Fino 0,6		

Cálculo del Módulo de Finura Poliestireno Mod	
Suma serie Preferida	232,51
Módulo de Finura	7,67

IV.1 Distribución Granulométrica de Poliestireno Expandido Modificado

(Fuente: Elaboración Propia)

IV.2.1 CARACTERIZACION DEL ARENA

La tabla IV.2.1 presenta los resultados del ensayo de granulometría del arena y la determinación del módulo de finura

Granulometría Arena	
Masa Seca (gr)	980,2
Masa Lavada y Seca (gr)	947,18

ASTM	mm	M. Ret gr.	% Ret Parcial	% Que Pasa
3"	80			
2 1/2"	63			
2"	50			
1 1/2"	40			
1"	25			
3/4"	20			
1/2"	12,5			
3/8"	10			100,00
Nº4	5	52,38	5,34	95,00
Nº8	2,5	209,75	21,40	73,00
Nº16	1,25	160,41	16,37	57,00
Nº30	0,63	253,59	25,87	31,00
Nº50	0,315	194,10	19,80	11,00
Nº100	0,16	56,93	5,81	5,40
Residuo		18,66	1,90	
Total masa final (mf) (gr)		945,82		
Variación [(100xmf)/mic]		0,00		
Observaciones		M. Org. Nivel 1 (cumple) % de Fino 3,4		

Cálculo del Módulo de Finura Arena	
Suma serie Preferida	272,4
Módulo de Finura	3,28

IV.2.1 Distribución Granulométrica del Arena.

(Fuente: Elaboración Propia)

IV.2.2 CARACTERIZACION DE LA GRAVILLA

La tabla IV.2.2 presenta los resultados del ensayo de granulometría de la gravilla y la determinación del módulo de finura.

Granulometría Gravilla	
Masa Seca (gr)	9878
Masa Lavada y Seca (gr)	9835

ASTM	mm	M. Ret gr.	% Ret Parcial	% Que Pasa
3"	80			
2 1/2"	63			
2"	50			
1 1/2"	40			
1"	25			
3/4"	20			100,00
1/2"	12,5	5889,00	59,62	40,00
3/8"	10	2868,00	29,03	11,00
Nº4	5	1003,00	10,15	1,00
Nº8	2,5	0,00	0,00	1,00
Nº16	1,25	0,00	0,00	1,00
Nº30	0,63	0,00	0,00	1,00
Nº50	0,315	0,00	0,00	1,00
Nº100	0,16	72,00	0,73	0,50
Residuo		0,00	0,00	
Total masa final (mf) (gr)		98,32		
Variación [(100xmf)/mic]		0,00		
Observaciones		% de Fino 0,4		

Cálculo del Módulo de Finura Gravilla	
Suma serie Preferida	316,50
Módulo de Finura	6,84

IV.2.2 Distribución Granulométrica de la Gravilla.

(Fuente: Elaboración Propia)

IV.3 CLASIFICACIÓN DE SERIES DE PROBETAS CÚBICAS.

La serie de tablas IV.3 presenta la clasificación de probetas de acuerdo a su dosificación y masa específica.

Serie	Probeta	Cemento (kg)	Grava (lts)	Arena (lts)	Pol Mod (lts)	Razón a/c	Aditivo (lts)	Masa Esp Prob Cub 15cm	Masa Esp(kg/m ³)
A	A1	340	408	336	0	0,4	1,7	8,26	2447,41
	A2	340	408	336	0	0,4	1,7	8,17	2420,74
	A3	340	408	336	0	0,4	1,7	8,33	2468,15
	A4	340	408	336	0	0,4	1,7	8,26	2447,41
	A5	340	408	336	0	0,4	1,7	8,01	2373,33
	A6	340	408	336	0	0,4	1,7	8,11	2402,96
	A7	340	408	336	0	0,4	1,7	8,31	2462,22
	A8	340	408	336	0	0,4	1,7	8,32	2465,19
	A9	340	408	336	0	0,4	1,7	8,33	2468,15
Promedios Generales								8,23	2439,51
Desviación Estandar								0,11	33,55

*Pol Mod= Poliestireno Expandido Modificado

*Masa Esp Probeta= Masa Específica de Probeta de 15 cms

IV.3.(a) Clasificación de Probetas: Dosificación, Masa Específica Serie A

(Fuente: Elaboración Propia)

Serie	Probeta	Cemento (kg)	Grava (lts)	Arena (lts)	Pol Mod (lts)	Razón a/c	Aditivo (lts)	Masa Esp Prob Cub 15cm	Masa Esp(kg/m ³)
B 30% Reemplazo por Poliestireno Expandido Modificado	B1	340	286	336	122	0,4	1,7	7,32	2168,89
	B2	340	286	336	122	0,4	1,7	7,21	2136,30
	B3	340	286	336	122	0,4	1,7	7,51	2225,19
	B4	340	286	336	122	0,4	1,7	7,37	2183,70
	B5	340	286	336	122	0,4	1,7	7,49	2219,26
	B6	340	286	336	122	0,4	1,7	7,21	2136,30
	B7	340	286	336	122	0,4	1,7	7,37	2183,70
	B8	340	286	336	122	0,4	1,7	7,28	2157,04
	B9	340	286	336	122	0,4	1,7	6,87	2035,56
Promedios Generales								7,29	2160,66
Desviación Estandar								0,19	56,54

*Pol Mod= Poliestireno Expandido Modificado

*Masa Esp Probeta= Masa Específica de Probeta de 15 cms

IV.3.(b) Clasificación de Probetas: Dosificación, Masa Específica Serie B

(Fuente: Elaboración Propia)

Serie	Probeta	Cemento (kg)	Grava (lts)	Arena (lts)	Pol Mod (lts)	Razón a/c	Aditivo (lts)	Masa Esp Prob Cub 15cm	Masa Esp(kg/m ³)
C 50% Reemplazo por Poliestireno Expandido Modificado	C1	340	204	336	204	0,4	1,7	6,20	1837,04
	C2	340	204	336	204	0,4	1,7	6,78	2008,89
	C3	340	204	336	204	0,4	1,7	6,98	2068,15
	C4	340	204	336	204	0,4	1,7	6,34	1878,52
	C5	340	204	336	204	0,4	1,7	6,27	1857,78
	C6	340	204	336	204	0,4	1,7	6,42	1902,22
	C7	340	204	336	204	0,4	1,7	6,74	1997,04
	C8	340	204	336	204	0,4	1,7	6,28	1860,74
	C9	340	204	336	204	0,4	1,7	6,59	1952,59
Promedios Generales								6,51	1929,22
Desviación Estandar								0,27	80,92

*Pol Mod= Poliestireno Expandido Modificado

*Masa Esp Probeta= Masa Específica de Probeta de 15 cms

IV.3.(c) Clasificación de Probetas: Dosificación, Masa Específica Serie C

(Fuente: Elaboración Propia)

Serie	Probeta	Cemento (kg)	Grava (lts)	Arena (lts)	Pol Mod (lts)	Razón a/c	Aditivo (lts)	Masa Esp Prob Cub 15cm	Masa Esp(kg/m ³)
D 70% Reemplazo por Poliestireno Expandido Modificado	D1	340	122	336	408	0,4	1,7	6,20	1837,04
	D2	340	122	336	408	0,4	1,7	5,67	1680,00
	D3	340	122	336	408	0,4	1,7	5,32	1576,30
	D4	340	122	336	408	0,4	1,7	5,83	1727,41
	D5	340	122	336	408	0,4	1,7	5,62	1665,19
	D6	340	122	336	408	0,4	1,7	5,80	1718,52
	D7	340	122	336	408	0,4	1,7	6,01	1780,74
	D8	340	122	336	408	0,4	1,7	6,20	1837,04
	D9	340	122	336	408	0,4	1,7	6,17	1828,15
Promedios Generales								5,87	1738,93
Desviación Estandar								0,30	90,05

*Pol Mod= Poliestireno Expandido Modificado

*Masa Esp Probeta= Masa Específica de Probeta de 15 cms

IV.3.(d) Clasificación de Probetas: Dosificación, Masa Específica Serie D

(Fuente: Elaboración Propia)

IV.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN AXIAL (Cuerpos de prueba cúbicos).

Las series de tablas IV.4 representan los resultados de los ensayos a compresión axial y su masa específica.

La cantidad de cemento, se mantuvo constante en todas las dosificaciones, como también la razón agua cemento y solamente fue variando el volumen de material agregado grueso natural reemplazándose en cantidades controladas por poliestireno expandido modificado.

Todos los ensayos fueron realizados en el laboratorio LEMCO de la Universidad Austral de Chile, y se corrigieron los resultados según el factor estadístico propio de la prensa utilizada para el presente ensayo.

La serie A presenta las probetas realizadas sin presencia de poliestireno expandido modificado, de modo de obtener un patrón de resistencia con un hormigón tradicional. Se realizaron tres ensayos a los 7 días en probetas A1, A2, A3, a los 14 días en probetas A4, A5, A6 y 28 días en probetas A7, A8, A9 respectivamente.

Serie	Probeta	Masa Esp Prob Cub 15cm	Masa Esp(kg/m ³)	Resistencia a los 7 Días (Mpa)	Resistencia a los 14 Días (Mpa)	Resistencia a los 28 Días (Mpa)
A	A1	8,26	2447,41	17,87	-	-
	A2	8,17	2420,74	17,71	-	-
	A3	8,33	2468,15	17,83	-	-
	A4	8,26	2447,41	-	22,60	-
	A5	8,01	2373,33	-	21,40	-
	A6	8,11	2402,96	-	21,20	-
	A7	8,31	2462,22	-	-	25,63
	A8	8,32	2465,19	-	-	24,50
	A9	8,33	2468,15	-	-	26,70
Promedios Generales		8,23	2440	18	22	26
Desviación Estandar		0,11	33,55	0,08	0,76	1,10

IV.4.(a) Resultados ensayo a Compresión Serie A

(Fuente: Elaboración Propia)

La serie B presenta las probetas con una presencia de un 30% de poliestireno expandido en reemplazo del árido natural grueso. Se realizó 3 ensayos de probetas a los 7 días en probetas B1, B2, B3, a los 14 días en probetas B4, B5, B6 y 28 días en probetas B7, B8 y B9 respectivamente.

Serie	Probeta	Masa Esp Prob Cub 15cm	Masa Esp(kg/m ³)	Resistencia a los 7 Días (Mpa)	Resistencia a los 14 Días (Mpa)	Resistencia a los 28 Días (Mpa)
B 30% Reemplazo por Poliestireno Expandido Modificado	B1	7,32	2168,89	14,62	-	-
	B2	7,21	2136,30	14,30	-	-
	B3	7,51	2225,19	13,85	-	-
	B4	7,37	2183,70	-	16,52	-
	B5	7,49	2219,26	-	18,46	-
	B6	7,21	2136,30	-	16,74	-
	B7	7,37	2183,70	-	-	22,12
	B8	7,28	2157,04	-	-	23,13
	B9	6,87	2035,56	-	-	21,40
Promedios Generales		7,29	2161	14	17	22
Desviación Estandar		0,19	56,54	0,39	1,06	0,87

IV.4.(b) Resultados ensayo a Compresión Serie B

(Fuente: Elaboración Propia)

La serie C presenta las probetas con presencia de un 50% de poliestireno expandido modificado en reemplazo del volumen total de árido natural grueso.

Se realizó el ensayo a los 7 días en probetas C1, C2, C3, a los 14 días en probetas C4, C5, C6 y a los 28 días en probetas C7, C8, C9.

Serie	Probeta	Masa Esp Prob Cub 15cm	Masa Esp(kg/m ³)	Resistencia a los 7 Días (Mpa)	Resistencia a los 14 Días (Mpa)	Resistencia a los 28 Días (Mpa)
C 50% Reemplazo por Poliestireno Expandido Modificado	C1	6,20	1837,04	12,62	-	-
	C2	6,78	2008,89	9,48	-	-
	C3	6,98	2068,15	11,20	-	-
	C4	6,34	1878,52	-	12,80	-
	C5	6,27	1857,78	-	13,73	-
	C6	6,42	1902,22	-	14,32	-
	C7	6,74	1997,04	-	-	18,80
	C8	6,28	1860,74	-	-	16,80
	C9	6,59	1952,59	-	-	17,30
Promedios Generales		6,51	1929	11	14	18
Desviación Estandar		0,27	80,92	1,57	0,77	1,04

IV.4.(c) Resultados ensayo a Compresión Serie C

(Fuente: Elaboración Propia)

La serie D presenta las probetas confeccionadas con una presencia de un 70% de poliestireno expandido modificado en reemplazo del volumen total del árido natural grueso.

Se realizó un ensayo a los 7 días (probeta D1), debido a la poca resistencia del hormigón, esta dosificación se caracterizó por tener un lento proceso de fraguado, ya que el poliestireno expandido modificado no absorbe agua, luego se realizaron 4 ensayos a los 14 días en probetas D3, D4, D5, D6 y 28 días en probetas D2, D7, D8, D9 respectivamente.

Serie	Probeta	Masa Esp Prob Cub 15cm	Masa Esp(kg/m ³)	Resistencia a los 7 Días (Mpa)	Resistencia a los 14 Días (Mpa)	Resistencia a los 28 Días (Mpa)
D 70% Reemplazo por Poliestireno Expandido Modificado	D1	6,20	1837,04	4,10	-	-
	D2	5,67	1680,00	-	-	16,60
	D3	5,32	1576,30	-	13,10	-
	D4	5,83	1727,41	-	10,50	-
	D5	5,62	1665,19	-	12,10	-
	D6	5,80	1718,52	-	11,45	-
	D7	6,01	1780,74	-	-	16,70
	D8	6,20	1837,04	-	-	18,10
	D9	6,17	1828,15	-	-	15,40
Promedios Generales		5,87	1739	4	12	17
Desviación Estandar		0,30	90,05		1,09	1,10

IV.4.(d) Resultados Ensayo a Compresión Serie D

(Fuente: Elaboración Propia)

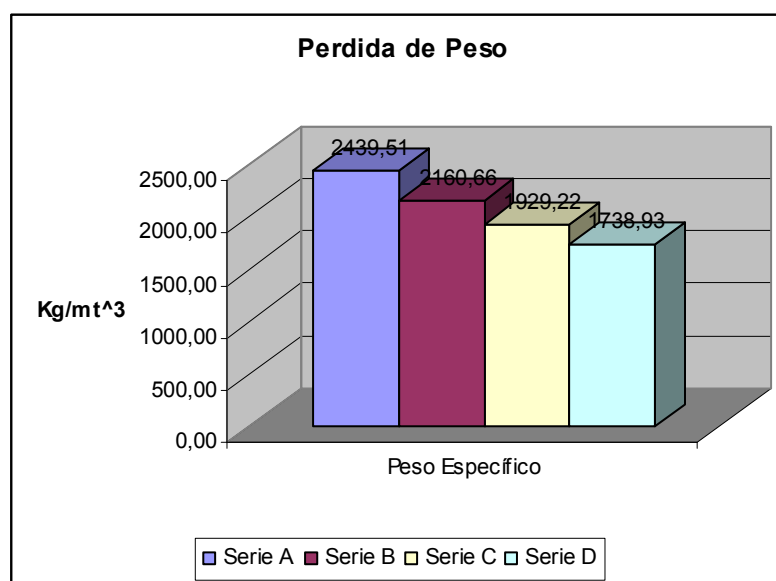
La última serie de ensayos que se consideró en este trabajo fue la de la serie D, debido a que el presente estudio solamente contempla hormigones livianos de alta resistencia, cuyo valor en resistencias a la compresión debe ser superior a los 17,2 Mpa.

IV.5 REDUCCIÓN DE MASA ESPECÍFICA Y RESISTENCIAS A COMPRESIÓN AXIAL

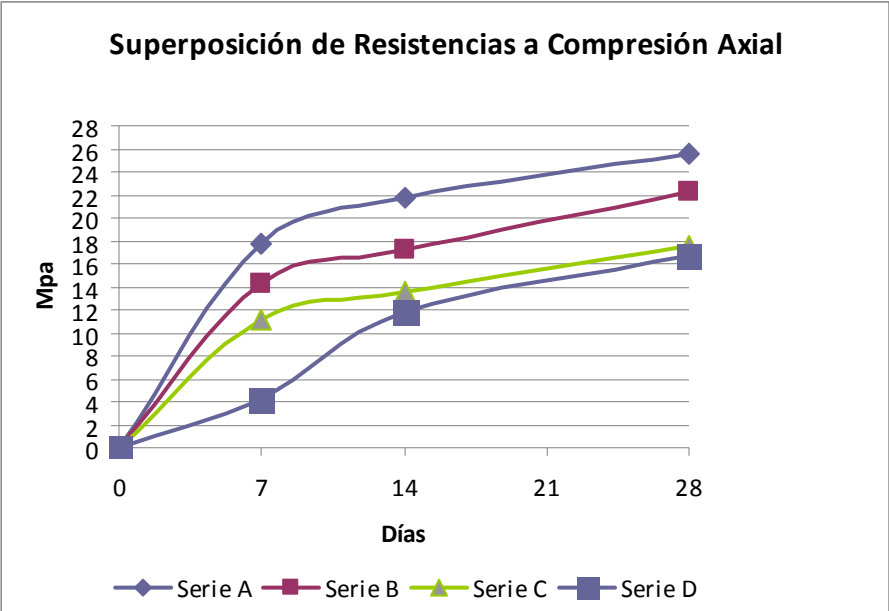
La tabla IV.5 presenta los resultados comparativos, de los porcentajes de reducciones de masa específica de las mezclas realizadas, y de los porcentajes de pérdidas relativas de resistencia a compresión axial.

Serie	Día de Ensayo	Masa Esp(kg/m ³)	Pérdida de Masa (%)	Resistencia Promedio (Mpa) Compresión Axial	Pérdida de Resistencia (%) Comp. Axial
A	7	2440	-	18	-
B	7	2161	0,11	14	0,20
C	7	1929	0,21	11	0,38
D	7	1739	0,29	4	0,77
A	14	2440	-	22	-
B	14	2161	0,11	17	0,21
C	14	1929	0,21	14	0,37
D	14	1739	0,29	12	0,46
A	28	2440	-	26	-
B	28	2161	0,11	22	0,13
C	28	1929	0,21	18	0,31
D	28	1739	0,29	17	0,35

IV.5.1.1: Pérdida de Masa Específica y Pérdida de Resistencia a Compresión Axial, Porcentual
(Fuente: Elaboración Propia)



IV.5.1.2: Pérdida de Masa Específica Por Series
(Fuente: Elaboración Propia)



IV.5.1.3: Aumento de Resistencia Versus Días.

(Fuente: Elaboración Propia)

IV.6 RESISTENCIA TRACCIÓN POR FLEXIÓN (Cuerpos Prismáticos).

La tabla IV.6 representa los resultados de los ensayos a tracción por flexión y sus masas específicas.

Las dosificaciones son las mismas utilizadas anteriormente para el ensayo a compresión.

Todos los ensayos fueron realizados en el laboratorio LEMCO de la Universidad Austral de Chile, y se corrigieron los resultados según el factor estadístico propio de la prensa utilizada para el presente ensayo.

La serie A presenta las probetas realizadas sin presencia de poliestireno expandido modificado, de modo de obtener un patrón de resistencia con un hormigón tradicional. Se realizaron los ensayos a los 28 días.

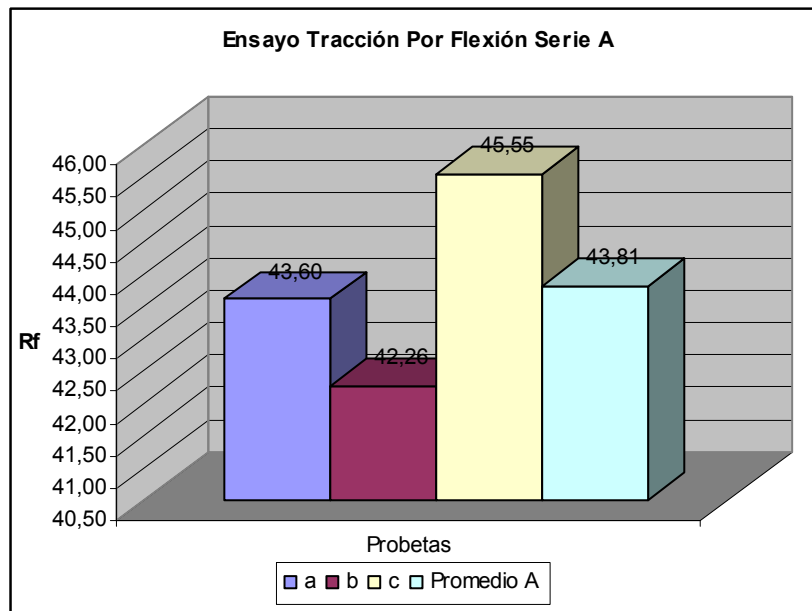
Serie-% Muestra	Numeración	Tiempo (seg)	Peso (gr)	Peso Correg. (gr)	a1 (mm)	a1 Correg. (mm)	a2 (mm)	a2 Correg. (mm)	b1 (mm)	b1 Correg. (mm)	b2 (mm)	b2 Correg. (mm)	b3 (mm)	b3 Correg. (mm)
A-0%	a	320	28600	28,59	530	530	539	439	142	144	150	150	149	150
A-0%	b	318	29370	29,36	532	531	540	540	144	143	152	152	150	150
A-0%	c	337	31660	31,65	531	531	538	537	143	143	150	150	150	150
B-30%	a	310	23710	23,7	530	530	531	530	140	139	150	150	140	140
B-30%	b	305	24740	24,74	531	532	533	532	139	140	150	151	147	147
B-30%	c	327	23750	23,75	531	532	531	531	143	144	151	152	150	150
C-50%	a	302	21020	21,01	530	531	531	531	155	156	150	150	145	145
C-50%	b	328	22070	22,06	530	530	533	533	154	155	152	152	147	147
C-50%	c	316	21870	21,86	532	533	531	531	152	154	150	150	147	147
D-70%	a	300	20020	20,01	532	533	532	533	150	152	145	146	145	146
D-70%	b	352	18650	18,64	533	534	535	534	149	151	147	147	145	145
D-70%	c	362	19730	19,72	531	532	533	533	145	148	150	150	147	147

Serie- % Muestra	Numeración	h1 (mm)	h1 Correg. (mm)	h2 (mm)	h2 Correg. (mm)	h3 (mm)	h3 Correg. (mm)	Sep. Apoyo Probeta Apoyo 1	Sep. Apoyo Probeta Apoyo 2	Luz Ensayo (mm)	Carga (KN)	Carga Correg.	Edad	Rf (kgf/cm ²)
A-0%	a	151	151	151	151	153	153	25	25	450	32,5	31,4	28 días	44
A-0%	b	150	150	150	150	150	150	25	25	450	31,5	30,4	28 días	42
A-0%	c	150	150	150	150	151	151	25	25	450	33,5	32,4	28 días	46
B-30%	a	151	151	152	152	151	151	25	25	450	28,5	27,4	28 días	38
B-30%	b	150	150	152	152	152	151	25	25	450	29,5	28,4	28 días	40
B-30%	c	151	151	151	151	150	150	25	25	450	27,5	26,4	28 días	37
C-50%	a	145	145	148	148	149	150	25	25	450	27,0	25,9	28 días	39
C-50%	b	146	146	148	148	149	150	25	25	450	27,5	26,4	28 días	39
C-50%	c	148	148	150	150	149	151	25	25	450	28,5	27,4	28 días	40
D-70%	a	152	152	152	151	155	154	25	25	450	23,5	22,4	28 días	32
D-70%	b	150	150	150	150	149	48	25	25	450	23,5	22,4	28 días	33
D-70%	c	150	150	150	150	149	148	25	25	450	24,5	23,4	28 días	33

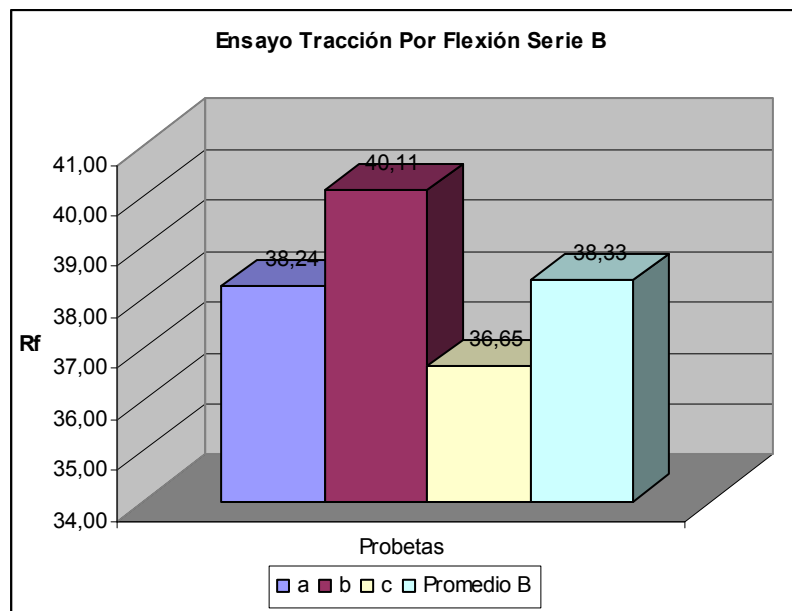
IV.6.1: Ensayo de Tracción por Flexión

(Fuente: Elaboración Propia)

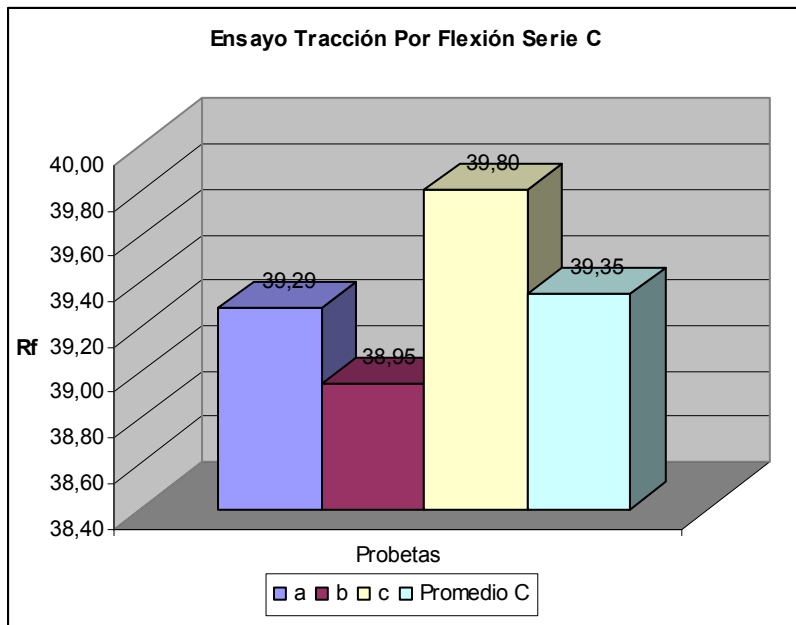
A continuación se detallan los gráficos de resistencias a tracción por flexión, de las series empleadas, posteriormente sus medias respectivas y las pérdidas de resistencias en porcentaje.



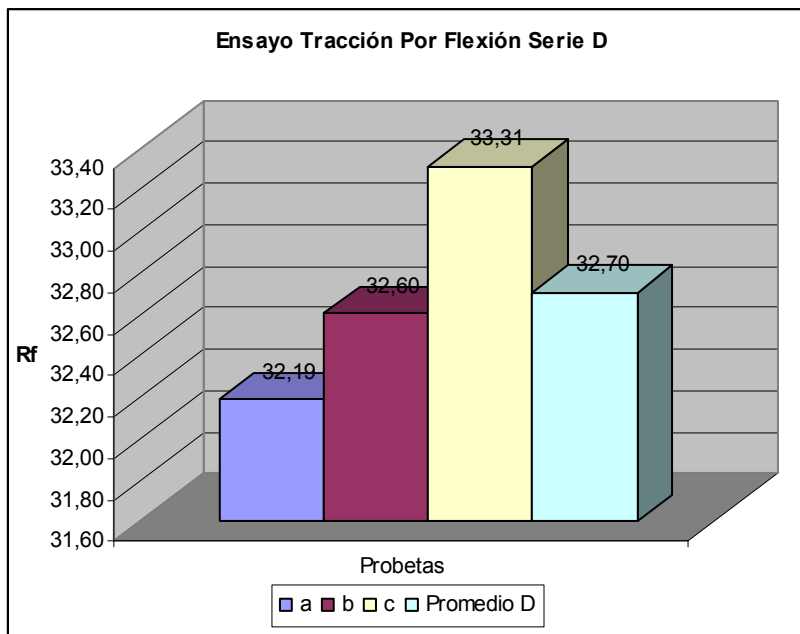
IV.6.1.1: Ensayo de Tracción por Flexión Serie A
(Fuente: Elaboración Propia)



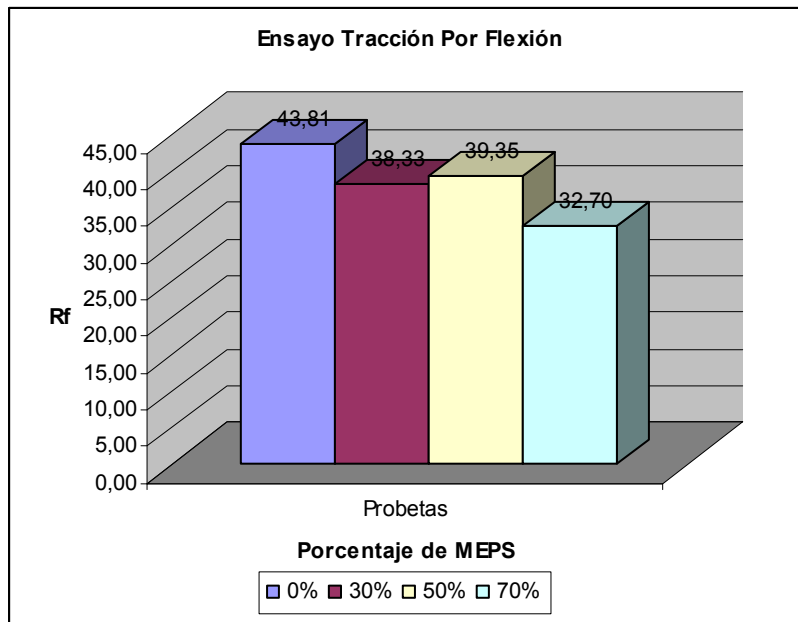
IV.6.1.2: Ensayo de Tracción por Flexión Serie B
(Fuente: Elaboración Propia)



IV.6.1.3: Ensayo de Tracción por Flexión Serie C
(Fuente: Elaboración Propia)



IV.6.1.4: Ensayo de Tracción por Flexión Serie D
(Fuente: Elaboración Propia)



IV.6.1.5: Ensayo de Tracción por Flexión Promedios de Series
(Fuente: Elaboración Propia)

Serie	Promedio de Resistencia a la Flexotracción (kgf/cm ²)	Desviación Estandar	Perdida de Resistencia (%)
A	44	1,65	-
B	38	1,73	12,49
C	39	0,43	10,18
D	33	0,57	25,35

IV.6.2: Ensayo de Tracción por Flexión, Resistencias y Pérdidas Promedios
(Fuente: Elaboración Propia)

IV.7 ASPECTOS VISUALES

En este ítem se dispone de algunas imágenes que ayudarán a evaluar la disposición de los granos de poliestireno expandido modificado en el interior de las probetas.

Este procedimiento, un poco rudimentario, permite verificar que los granos de poliestireno expandido modificado se encuentran distribuidos de forma homogénea y sin segregación si se trabaja de forma adecuada, eliminando la hipótesis de que por ser un material extremadamente liviano, no permanecieran bien distribuidos.

Además se puede ver una pequeña ocurrencia de vacíos probablemente producidos por:

- En la liberación de energía en el proceso de densificación de las mezclas
- Exceso de vibración
- Por el efecto de que los granos de poliestireno expandido modificado, por ser extremadamente elásticos, tienden a retornar a su formato original después de la compactación.

Se puede verificar de igual manera que existió una buena adherencia entre la pasta de cemento y el poliestireno expandido modificado, trabajando de manera conjunta sin segregación de ellos.



Figura 7.1: Probetas Cúbicas de Hormigón Para Ensayo a Compresión.
(Fuente: Elaboración Propia)



Figura 7.2: Probetas Rechazadas Por Presencia de Nidos.
(Fuente: Elaboración Propia)



(a)



(b)

Figura 7.3: Probetas de Hormigón.
(a) Presencia de Segregación de Material Liviano,
(b) Material Liviano en Forma Homogénea.
(Fuente: Elaboración Propia)

V ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis referente al comportamiento de las diferentes mezclas en relación a los ensayos realizados en laboratorio.

V.1 Comportamiento Relativo a Resistencia de Compresión Axial.

Se puede concluir que la adición de forma gradual de poliestireno expandido modificado, afecta directamente en la resistencia a compresión axial, disminuyendo fuertemente en las series C y D (50% y 70% de poliestireno expandido modificado respectivamente), llegando cerca de un 35% de pérdida de resistencia a compresión axial.

En las mezclas de la serie D, se puede ver que la mezcla en estudio, no alcanza a adquirir resistencias a temprana edad, debido a que el poliestireno expandido modificado no absorbe agua en el proceso de fraguado, estando un 77% bajo la resistencia de referencia de la serie A, pero a la vez el hormigón, al pasar los días, sigue tomando una mayor resistencia de manera más acelerada, alcanzando a estar solo un 35% más bajo que la mezcla referencial de la serie A, a los 28 días.

Las mezclas de la serie C (50% de reemplazo de gravilla por poliestireno expandido modificado), se puede tomar como el límite de un hormigón liviano de alta resistencia, debido a que superan los 17,2 Mpa, solicitados por el código ACI 318-05 (Building Code Requirements for Structural Concrete) y a la vez se puede observar que tenemos un hormigón un 21% más liviano que un hormigón tradicional, lo que se puede expresar en cerca de $500 \frac{Kg}{m^3}$ menos, que sin lugar a dudas ayuda considerablemente en la economía de la estructura por peso propio.

V.2 Comportamiento Relativo a Resistencia A Tracción por Flexión.

Al realizar el ensayo de tracción por flexión se puede observar lo siguiente:

La adición de forma gradual de poliestireno expandido modificado, en reemplazo del material natural granular, afecta directamente en las resistencias de tracción por flexión, donde se presenta la mayor pérdida de resistencia es en la serie D, con un 70% de presencia de MEPS, obteniéndose una resistencia de $32,7 \frac{kgf}{cm^2}$ afectando en una pérdida aproximada de un 25%, en comparación con la serie A (serie patrón).

La serie C, presenta una mayor resistencia a la tracción por flexión en comparación con la serie B, esto puede decir que el hormigón con MEPS en un 50%, presenta un mejor rendimiento en el conjunto completo de materiales.

VI CONCLUSIONES

A partir de los resultados y la experiencia desarrollada en el presente trabajo se puede concluir lo siguiente:

1° El hormigón diseñado y estudiado en el presente trabajo, solamente podría utilizarse para elementos prefabricados debido al cono utilizado (Cono 2), lo cual implica que tenemos como limitante su trabajabilidad.

2° El poliestireno expandido modificado, posee un gran potencial para ser utilizado como agregado liviano para hormigones, a través de un estudio más detallado se pueden conocer aún más sus propiedades, transformándolo en un material reciclable y económico.

3° Puede considerarse el poliestireno expandido modificado, como un nuevo material para hormigones livianos de alta resistencia, debido a que se obtuvieron valores muy altos, comparados con hormigones tradicionales con presencia de poliestireno expandido sin modificar.

4° Todas las mezclas con presencia de poliestireno expandido modificado, presentaron buena cohesión, y consistencia adecuada para su utilización, manteniendo su trabajabilidad, por un tiempo más prolongado que un hormigón normal.

5° El uso de poliestireno expandido modificado en reemplazo de el agregado grueso natural, aun cuando, estos sean bien combinados con material fino puede ofrecer una banda granulométrica, que puede entregar resistencias adecuadas a diversas aplicaciones, en un inicio no estructurales.

6° La granulometría, y la forma estriada y chancada del poliestireno expandido modificado, permite una buena adherencia al hormigón, sin presencia de desprendimientos, segregación o una mala distribución dentro del hormigón ya endurecido.

7° No hubo necesidad de utilizar algún tratamiento químico o físico en el poliestireno expandido modificado para que pudiese ofrecer una mejor adherencia al hormigón, esto implica una buena economía en los procesos de construcción.

8° Con el aumento de cantidad de poliestireno expandido modificado disminuye considerablemente la resistencia a compresión axial en los primeros días (7 y 14 días), pero luego

posee una curva más acelerada en alcanzar resistencias altas, debido a que el poliestireno expandido modificado no absorbe agua.

9° El límite para obtener un hormigón liviano de alta resistencia, con la dosificación estudiada, puede definirse cercana a un 70% de poliestireno expandido modificado en reemplazo de material granular, obteniendo un 35% menos de resistencia a compresión axial (16,7 Mpa).

10° El hormigón con una alta presencia de poliestireno expandido modificado, se presenta como un material adecuado para estructuras que especifiquen una alta capacidad a la resistencia de impactos debido a su aumento en el módulo de elasticidad secante.

11° La presencia de poliestireno expandido modificado en reemplazo del material granular, produjo una disminución en las densidades muy considerables, obteniendo fácilmente un hormigón liviano de alta resistencia.

12° La posibilidad de reciclar el poliestireno expandido a gran escala, para la producción de poliestireno expandido modificado, ayuda de gran manera a la reducción de contaminación para el medio ambiente, destinando esos residuos a un nuevo material de construcción.

13° La serie C, tiene un mejor rendimiento a la flexotracción que la serie B, estando bajo un 10% en comparación con la serie patrón ($39,35 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$), además la serie C, se presenta como la dosificación en la cual aún según sus propiedades se puede considerar como un hormigón liviano de alto desempeño.

14° Según las series ensayadas, se puede concluir que se obtuvo un hormigón liviano de alto desempeño, con poliestireno expandido modificado, con una presencia cercana al 70%, en reemplazo del agregado natural granular, alcanzándose una resistencia a la compresión de 16,7 Mpa, y una resistencia a la Flexotracción de $32,7 \text{ kgf/cm}^2$, con una masa específica cercana a 1700 Kg/m^3 , reduciendo cerca de un 29 % el peso propio, a un hormigón tradicional, ambos valores son de suma importancia, ya que se alcanzaron resistencias no conocidas en hormigones livianos, que tengan como materia prima poliestireno expandido.

BIBLIOGRAFIA

- ABDULKADIR, Kan; DEMIRBOGA, Ramazan. 2009 . A New Technique of Processing For Waste-Expanded Polystyrene Foams as Aggregates. Turkey.
- ACI 318-05. Building Code Requirements For Structural Concrete.
- AGUILAR, Rebeca. 2007. “Determinación de la Influencia de las Nanomoléculas de Sílice en el Concreto Frente a un Factor que Afecta su Durabilidad” Tesis. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 15 p.
- Batista Leite, Mônica, 2001, Tese de Doutorado Avaliação de Propiedades Mecânicas de Concretos produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição, Universidade Federale Do Río Do Sul.
- DEMIRBOGA, Ramazan. 2009. “A novel material for lightweight concrete production”, Cement & Concrete Composites. Turkey.
- EUROLIGHTCON. 2000, Project BE96-3942/R2. Light Weight Aggregate Concrete. Materials Properties, State – Of – The. 111p
- EUROLIGHTCON. 1999. Project BE96-3942/R4. Light Weight Aggregate Concrete. Methods for testing fresh lightweight aggregate concrete.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R5. Light Weight Aggregate Concrete. A rational mix design method for LWAC using typical UK materials.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R6. Light Weight Aggregate Concrete. Properties of Lytag-based concrete mixtures strength class B15-B55.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R7. Light Weight Aggregate Concrete. Grading and composition of the aggregate.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R8. Light Weight Aggregate Concrete. Properties of lightweight concretes containing Lytag and Liapor, March 2000

- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R9. Light Weight Aggregate Concrete. Technical and economic mixture optimisation of high strength LWAC, March 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R10. Light Weight Aggregate Concrete. Paste optimisation based on flow properties and compressive strength, March 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R11. Light Weight Aggregate Concrete. Pumping of LWAC based on expanded clay in Europe, March 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R12. Light Weight Aggregate Concrete. Applicability of the particle-matrix model to LWAC, March 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R13. Light Weight Aggregate Concrete. Large-scale chloride penetration test on LWAC-beams exposed to thermal and hygral cycles, March 2000.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R14. Light Weight Aggregate Concrete. Structural LWAC. Specification and guideline for materials and production, May 2000.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R15. Light Weight Aggregate Concrete. Light Weight Aggregates, May 2000.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R16. Light Weight Aggregate Concrete. In-situ tests on existing lightweight aggregate concrete structures, May 2000.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R17. Light Weight Aggregate Concrete. Properties of LWAC made with natural lightweight aggregates, May 2000.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R18. Light Weight Aggregate Concrete. Durability of LWAC made with natural lightweight aggregates, May 2000.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R19. Light Weight Aggregate Concrete. Evaluation of the early age cracking of LWAC, May 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R20. Light Weight Aggregate Concrete. The effect of the moisture history on the water absorption of LWA, May 2000

- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R21. Light Weight Aggregate Concrete. Stability and pumpability of LWAC. Test Methods, May 2000.
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R22. Light Weight Aggregate Concrete. The economic potential of LWAC in c.i.p. concrete bridges, May 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R23. Light Weight Aggregate Concrete. Mechanical properties of LWAC, May 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R24. Light Weight Aggregate Concrete. Prefabricated bridges, May 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R25. Light Weight Aggregate Concrete. Chemical stability, wear resistance and freeze-thaw resistance of LWAC, May 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R26. Light Weight Aggregate Concrete. Recycling lightweight aggregate concrete, May 2000
- EUROLIGHTCON. 2000. Project BE96-3942/R27. Light Weight Aggregate Concrete. Mechanical properties of LWAC compared with both NWC and HSC, May 2000
- FREITA, Messias; ARRAUJO, Katia. 2004. “Otimização da Produção e das Propriedades do Concreto Celular Espumoso Orgânico e Inorgânico com Adicto a Cinasita e Rejeito Plástico” XXIV Encontro Nac. De Eng. De Produção, Florianópolis, SC, Brasil.
- Ficha Técnica de Perlas de Poliestireno, Santa Cruz de Tenerife. www.tecnicashm.com
- GALVEZ, D; ROCCO, V. 2007. Tecnología del Hormigón. Chile. (Disponibile en: ico.ucentral.cl/educon/cursos/icos405/archivo1_16_03_07.ppt) (Consultado Abril 2009).
- HOLM, T. A.; BREMNER, T. W. 1994. “High Strength Lightweight Aggregate Concrete,” Capítulo 10, High Performance Concrete and Applications, Londres.
- LAMOND, J; PIELERT, J. 2006. Significance Of Test And Properties Of Concrete & Concrete Making – Materials. ASTM 169D, 548-560p

- LAUKAITIS, Antanas; ZURAUSKAS, Rimvydas. 2005. The Effect Of Foam Polystyrene Granules On Cement Composite Properties. Cement And Concrete Composites, Pág 27, 41-47.
- MEHTA, K; MONTEIRO, J.M. 1994. Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais. PINI. São Paulo.
- Norma Chilena, NCh170 Of85 “Hormigón – Requisitos generales”
- Norma Chilena, NCh148 Of68 “Cemento – Terminología, calificación y especificaciones generales”.
- Norma Chilena, NCh163 Of79 “Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales”
- Norma Chilena, NCh1498 Of82. “Hormigón - Agua de amasado - Requisitos”.
- Norma Chilena, NCh165 Of 77. ”Hormigón Requisitos Generales”.
- Norma Chilena, NCh1116. Of 77. “Áridos para Morteros y Hormigones, Determinación de la Densidad Aparente”.
- Norma Chilena, NCh1117. Of 77,”Aridos para Morteros y Hormigones, Determinación de la densidad Real y Neta y la absorción de agua en las gravas”.
- Norma Chilena, NCh1239. Of 77, “Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas”.
- Norma Chilena, NCh 1037 Of 77, “Hormigón- Ensayo de Compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”
- Norma Chilena, NCh 1038 Of 77, “Hormigón – Ensayo de Tracción por Flexión”.
- ROSSIGNOLO, Adriano. 2003. “Concreto Leve de Alto Desempenho Modificado com SB para Pre-fabricados Esbeltos-Dosagem, Produção, Propriedades e Microestrutura”, Escola de Engenharia de Saõ Carlos, Instituto de Física de Saõ Carlos, Instituto de Quimica de Saõ Carlos, Universidade de Saõ Paulo.

- SILVA, B. 2004. “Betão Leve Estrutural Usando Agregados de Argila Expandida, FEUP Porto.
- SUMIE, Paula. 2008, “Concretos Especiais-Propiedades, Materiais e Aplicações”, UNESP, Campus de BAURU, Facultad de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil.
- TEXTOS CIENTIFICOS. 2005. Producción de Poliestireno Expandido. <<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietireno/produccion>>. (Abril 2009).
- UNIVERSIDAD CATOLICA DEL NORTE, Laboratorio de Hormigón. (Disponible en: <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/TECNOLOGIA%201.htm>)(Consultado en Abril, 2009)
- VAITKUS, Saulius; LAUKAITIS, Antanas; GNIPAS, Ivanas ; KERŠULIS, Vladislovas; VĖJELIS, Sigitas. 2006. Experimental Analysis of Structure and Deformation Mechanisms of Expanded Polystyrene (EPS) Slabs. Vol 12. N°4. Lithuania.

ANEXOS

ANEXO A: Dosificación de Serie A

1.1.- Resistencia Característica:

Hormigón H25

80% Nivel de Confianza

Cono 2

1.2.- Desviación Estándar: (s)

$S = 8 \text{ Mpa}$ (Tabla 25, Anexo C, Nch 170 Of. 85)

1.3.- Factor Estadístico: (t) (80% Nivel de Confianza)

$t = 0,842$ (Tabla 24, Anexo C, Nch 170 Of. 85)

1.4.- Margen Calculado:

$$M = t \cdot s = 0,842 \cdot 8 = 6,736 \approx 7 \text{ Mpa.}$$

1.5.- Resistencia Media de Dosificación:

$$R_{med} = 32 \text{ Mpa.}$$

1.6.- Tipo de Cemento :

Alta Resistencia

1.7.- Tipo de Árido:

Grueso: Gravilla de 1 ½", Chancada, PE= 2,6; DA 1,45

Fino: Arena, Chancada, PE = 2,7; D.A.= 1,6

1.8.- Aditivo:

Reductor de agua Fluidificante.

1.9.- Razón A/C por resistencia:

0,54 (Tabla 3, Nch 170 Of. 85)

1.10.-Máxima razón A/C por durabilidad:

0,40 (Tabla 4, Nch 170 Of. 85)

Se utiliza el menor, por lo tanto Razón A/C= 0,40.

2.1.- Tipo de Construcción:

Probetas de Prueba.

2.2.- Trabajabilidad:

Cono 2, Hormigón sin armar. (Tabla 5, Nch 170, Of. 85)

2.3.- Tamaño Máximo del árido:

Gravilla de 1 ½ = 40 mm

2.4.- Reducción Agua Cemento:

17 Lts.- (Aditivo)

2.5 Contenido de Aire Atrapado:

10 Lts., Para áridos de tamaño máximo nominal de 40 mm. (Tabla 23 Nch 170 Of. 85)

2.6.- Dosis Agua Libre:

150 Lts.- para tamaño máximo nominal de 40 mm.- (Tabla 22, Nch 170 Of. 85)

3.1- Dosis de Cemento:

$$Cemento = \frac{(150-17)}{0,40} = 332,5 \frac{Kgs}{m^3}$$

3.2.- Dosis de Cemento a utilizar:

$$Vol_{cem} = 340 \frac{Kgs.}{m^3}$$

3.3.- Volumen de Cemento a Utilizar:

$$Vol_{cem} = \frac{340}{3} = 113,3 \frac{Lts.}{m^3}$$

4.1.- Arena: Módulo de Finura = 3,28.-

$$4.2.- Dosis de Gravilla = 730 \cdot 1,45 = 1058,5 \approx 1060 \frac{kgs}{m^3}$$

$$4.3.- Volumen Real de Grava = \frac{1060}{2,6} = 408 \frac{Lts}{m^3}.$$

$$4.4.- Volumen Real de Arena = 1000 - (150 - 17 + 10 + 113 + 408) = 336 Lts.$$

$$4.5.- Dosis de Arena = 336 \cdot 2,7 = 907 \frac{Kgs}{m^3}.$$

Por lo tanto, dosificación de Serie A, queda propuesta como:

Cemento:	113,3 kgs.	} Válido para 1 m ³
Agua:	133 Lts.	
Arena:	907 Kgs.	
Gravilla:	1060 Kgs.	
Aditivo:	17 Lts	

ANEXO B: ENSAYOS DE ÁRIDOS

A continuación se presentan otros resultados de ensayos realizados a los áridos.

DETERMINACIONES			ARENA		Promedio
Ma	Masa del matraz con agua corregida	grs.	658,47	662,72	
Mn	Masa del matraz con agua + muestra corregida	grs.	762,46	766,37	
B	Masa del árido SSS corregido	grs.	167,19	166,4	
C	Masa del árido seco 3ª det. Corregida	grs.	163,84	163,36	
D	Ma+B-Mn	grs.	63,20	62,75	
E	Ma+C-Mn	grs.	59,85	59,71	
F	Masa agua de absorción (B-C)	grs.	3,35	3,04	
G	Dens. Real Árido SSS (B:D)x1000	kg/m3	2645	2652	2649
H	Dens. Real Árido Seco (C:D)x1000	kg/m3	2592	2603	2598
I	Dens. Neta (C:E) x1000	kg/m3	2738	2736	2737
J	Absorción de agua (F:C)x100	%	2,00	1,90	2,00

PORCENTAJE DE HUECOS			ARENA
K	Densidad aparente según Nch 1116	kg/m3	1599
L	Porcentaje de huecos (H-K):H x100	%	38,5

DETERMINACIONES			GRAVILLA		Promedio
A	Masa del árido sumergido corregido	kg.	2802,00	2875	
B	Masa del del árido SSS corregido	kg.	4475,00	4584	
C	Masa del árido seco 3ª det. Corregida	kg.	4410,00	4517	
D	Masa agua desplazada (B-A)	kg.	1673,00	1709	
E	Masa agua despl. - agua abs. (C-A)	kg.	1608,00	1642	
F	Masa agua de absorción (B-C)	kg.	65,00	67,00	
G	Dens. Real Árido SSS (B:D)x1000	kg.	2675,00	2682	2679
H	Dens. Real Árido Seco (C:D)x1000	kg/m3	2636	2643	2640
I	Dens. Neta (C:E) x1000	kg/m3	2743	2751	2747
J	Absorción de agua (F:C)x100	%	1,50	1,50	1,50

PORCENTAJE DE HUECOS			GRAVILLA
K	Densidad aparente según Nch 1116	kg/m3	1444
L	Porcentaje de huecos (H-K):H x100	%	45,3

	Masa material +med. Vol. Corregida (kg) (1)	Masa medida corregida (kg) (2)	Masa del árido (kg) (3)= (1-2)	Volúmen de la medida volumétrica (m3) (4)	Densidad aparente (3/4) (kg/m3)
ARENA	7,742	2,861	4,881	0,003046	1602
	7,72	2,861	4,859	0,003046	1595
				PROMEDIO	1599
GRAVILLA	21,14	6,66	14,48	0,01003	1444
	21,13	6,66	14,47	0,01003	1443
				PROMEDIO	1444

