



**Universidad  
de Valparaíso**  
CHILE

**Facultad de Ingeniería  
Escuela de Construcción Civil**

**“Evaluación de la influencia de la incorporación  
de PET reciclado en la retracción hidráulica en  
hormigón fabricados con perlas de poliestireno  
expandido ”**

Por

**Francisca Daniela Torres Salinas**

Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la  
Construcción y al Título de Ingeniero Constructor

Profesor Guía: Andrés Jamet Aguilar

Diciembre, 2015.

*Dedicado a mis padres, hermanos, nina y tatas, tanto a los que  
tengo aún con vida, como a los que están en el cielo.*

## AGRADECIMIENTOS

Al profesor Andrés Jamet, por su innegable ayuda en todo este trabajo de investigación; por su amabilidad, tiempo, dedicación y por todos los conocimientos que adquirí durante este tiempo gracias a su experiencia.

A mi familia, por su gran apoyo en todo este tiempo, por su amor en los momentos difíciles, por creer en mis capacidades para el buen desempeño de esta investigación y por entregarme los recursos necesarios en todo momento para la buena ejecución de este trabajo.

A Pablo, por su inmenso amor, apoyo, paciencia y comprensión; por estar presente en todos los momentos en que necesité fuerzas para continuar, por alentarme a seguir adelante día a día.

A mi amiga Gisela, por su amistad durante todos estos años, y por su apoyo durante esta etapa de nuestras vidas.

A mis amistades, familiares y a todos aquellos que de una u otra forma me alentaron con su cariño en este proceso.

A los laboratistas Aldo y Don Victor, por su buena disposición cuando necesité su ayuda en la ejecución de los ensayos.

A todos ustedes, mil gracias de corazón...

**INDICE GENERAL**

AGRADECIMIENTOS.....	iii
INDICE DE FIGURAS .....	vii
INDICE DE TABLAS .....	x
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiv
CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Objetivos de la investigación.....	2
1.3 Alcances de la investigación.....	2
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Metodología de la investigación .....	4
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....	6

2.1 Generalidades del hormigón .....	6
2.1.1 Hormigón en estado fresco .....	7
2.1.2 Hormigón en estado endurecido .....	8
2.4 Generalidades del hormigón liviano .....	9
2.4.1 Hormigón con áridos livianos.....	12
2.5 Generalidades del poliestireno .....	13
2.5.1 Química del poliestireno .....	13
2.6 Poliestireno expandido .....	14
2.6.1 Proceso de producción.....	14
2.6.2 Propiedades.....	14
2.7 Hormigón con agregados de plástico reciclado .....	15
2.8 El plástico y su reciclaje .....	16
2.8.1 El PET y su reciclaje .....	17
2.9 Retracción .....	18
2.9.1 Tipos de retracción.....	18
2.9.2 Factores que afectan la retracción hidráulica .....	21
2.9.3 Fisuración causada por retracción hidráulica.....	30
2.9.4 Cuantificación de la retracción hidráulica .....	30
CAPITULO III: DISEÑO EXPERIMENTAL .....	32
3.1 Generalidades .....	32
3.2 Definición de variables .....	32
3.2.1 Variables independientes.....	32
3.2.2 Variables dependientes.....	33
3.3 Factorial de experimento .....	33
3.4 Ensayos aplicados a probetas de HL .....	35
3.4.1 Resistencia a la compresión .....	35
3.4.2 Retracción hidráulica.....	36
3.5 Metodología de trabajo .....	37
3.5.1 Retracción libre .....	37
3.5.2 Ensayo de compresión .....	39
CAPITULO IV: DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	40
4.1 Generalidades .....	40

4.2 Materiales a utilizar.....	40
4.2.1 Cemento.....	40
4.2.2 Agua.....	40
4.2.3 Áridos.....	40
4.2.4 PET reciclado.....	41
4.2.5 Perlas de poliestireno expandido.....	42
4.3 Propiedades de los áridos.....	42
4.3.1 Densidad gravilla.....	42
4.3.2 Densidad arena.....	45
4.3.3 Densidad PET.....	46
4.3.4 Densidad Perlas de poliestireno expandido.....	47
4.3.5 Granulometrías.....	48
4.4 Dosificación de hormigones.....	49
4.4.1 Consideraciones.....	49
4.4.2 Dosificación hormigón patrón.....	50
4.4.3 Dosificación hormigón con adición de PET y perlas de poliestireno expandido.....	50
4.5 Elaboración de hormigones y confección de probetas.....	52
4.5.1 Retracción libre.....	53
4.5.2. Resistencia a compresión.....	55
CAPITULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
5.1 Generalidades.....	56
5.2 Hormigón en estado fresco.....	56
5.2.1 Docilidad del hormigón.....	56
5.3 Ensayo de retracción libre.....	59
5.3.1 Retracción hidráulica.....	60
5.4 Análisis estadístico de resultados de retracción hidráulica.....	63
5.5 Pérdida de peso y densidad de hormigones.....	77
5.6 Resistencia a compresión.....	82
5.7 Análisis estadístico de resultados de resistencia a la compresión.....	85
CAPITULO VI: CONCLUSIONES.....	90
6.1 Generalidades.....	90
6.2 Relacionado con el objetivo general e hipótesis.....	90

6.3 Relacionado con los objetivos específicos .....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	91

### INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: Diagrama de metodología de investigación .....	5
FIGURA 2.1: Proceso de polimerización vinílica por radicales libres.....	14
FIGURA 2.2: Relación entre retracción y pérdida de agua.....	20
FIGURA 2.3: Creep y retracción de hormigones elaborados con cementos de diferente finura .....	22
FIGURA 2.4: Relación entre el contenido de agua del hormigón fresco y la retracción por secado..	23
FIGURA 2.5: Relación entre el contenido de agua, contenido de cemento y razón a/c, con la retracción del hormigón curado a 28 días y secado a 450 días. ....	24
FIGURA 2.6: Influencia del contenido de agregado del hormigón sobre la relación de la retracción del hormigón a la retracción de la pasta pura de cemento. ....	25
FIGURA 2.7: Influencia de la relación a/c y el contenido de agregado sobre la retracción.....	26
FIGURA 2.8: Relación entre la retracción y el tiempo para hormigones almacenados a diferentes humedades relativas. ....	27
FIGURA 2.9: Influencia del tiempo de exposición y tamaño del espécimen en el coeficiente de la retracción por secado. ....	28
FIGURA 3.1: Prensa Universal .....	35
FIGURA 3.2: Equipo medidor de cambios de longitud .....	36
FIGURA 4.1: PET reciclado .....	41

FIGURA 4.2: Perlas de poliestireno expandido .....	42
FIGURA 4.3: Granulometría.....	49
FIGURA 4.4: Método de asentamiento de cono de Abrams para la determinación de la docilidad...	53
FIGURA 4.5: Equipo digital, cámara de secado .....	54
FIGURA 4.6: Curado por inmersión en agua con cal.....	55
FIGURA 5.1: Asentamiento de cono en hormigones .....	57
FIGURA 5.2: Medición de probeta de hormigón H-20-0-G.....	59
FIGURA 5.3: Expansión y Retracción hidráulica en hormigones con PET grueso .....	61
FIGURA 5.4: Expansión y Retracción hidráulica en hormigones con PET fino.....	62
FIGURA 5.5: Gráfica de probabilidad normal Día 11 y 20% PPE.....	66
FIGURA 5.6: Gráfica de probabilidad normal Día 14 y 20% PPE.....	66
FIGURA 5.7: Gráfica de probabilidad normal Día 21 y 20% PPE.....	66
FIGURA 5.8: Gráfica de probabilidad normal Día 28 y 20% PPE.....	66
FIGURA 5.9: Gráfica de probabilidad normal Día 35 y 20% PPE.....	66
FIGURA 5.10: Gráfica de probabilidad normal Día 42 y 20% PPE.....	66
FIGURA 5.11: Gráfica de probabilidad normal Día 49 y 20% PPE.....	67
FIGURA 5.12: Gráfica de probabilidad normal Día 56 y 20% PPE.....	67
FIGURA 5.13: Gráfica de probabilidad normal Día 70 y 20% PPE.....	67
FIGURA 5.14: Gráfica de probabilidad normal Día 90 y 20% PPE.....	67
FIGURA 5.15: Análisis de varianza Día 11 y 20% PPE.....	68
FIGURA 5.16: Análisis de varianza Día 14 y 20% PPE.....	84
FIGURA 5.17: Análisis de varianza Día 21 y 20% PPE.....	68
FIGURA 5.18: Análisis de varianza Día 28 y 20% PPE.....	69
FIGURA 5.19: Análisis de varianza Día 35 y 20% PPE.....	69
FIGURA 5.20: Análisis de varianza Día 42 y 20% PPE.....	69
FIGURA 5.21: Análisis de varianza Día 49 y 20% PPE.....	70
FIGURA 5.22: Análisis de varianza Día 56 y 20% PPE.....	70
FIGURA 5.23: Análisis de varianza Día 70 y 20% PPE.....	22
FIGURA 5.24: Análisis de varianza Día 90 y 20% PPE.....	23
FIGURA 5.25: Gráfica de probabilidad normal Día 11 y 40% PPE.....	71
FIGURA 5.26: Gráfica de probabilidad normal Día 14 y 40% PPE.....	71
FIGURA 5.27: Gráfica de probabilidad normal Día 21 y 40% PPE.....	72
FIGURA 5.28: Gráfica de probabilidad normal Día 28 y 40% PPE.....	72
FIGURA 5.29: Gráfica de probabilidad normal Día 35 y 40% PPE.....	72
FIGURA 5.30: Gráfica de probabilidad normal Día 42 y 40% PPE.....	72
FIGURA 5.31: Gráfica de probabilidad normal Día 49 y 40% PPE.....	72
FIGURA 5.32: Gráfica de probabilidad normal Día 56 y 40% PPE.....	72
FIGURA 5.33: Gráfica de probabilidad normal Día 70 y 40% PPE.....	73

FIGURA 5.34: Gráfica de probabilidad normal Día 90 y 40% PPE.....	73
FIGURA 5.35: Análisis de varianza Día 11 y 40% PPE.....	73
FIGURA 5.36: Análisis de varianza Día 14 y 40% PPE.....	74
FIGURA 5.37: Análisis de varianza Día 21 y 40% PPE.....	74
FIGURA 5.38: Análisis de varianza Día 28 y 40% PPE.....	74
FIGURA 5.39: Análisis de varianza Día 35 y 40% PPE.....	75
FIGURA 5.40: Análisis de varianza Día 42 y 40% PPE.....	75
FIGURA 5.41: Análisis de varianza Día 49 y 40% PPE.....	75
FIGURA 5.42: Análisis de varianza Día 56 y 40% PPE.....	76
FIGURA 5.43: Análisis de varianza Día 70 y 40% PPE.....	76
FIGURA 5.44: Análisis de varianza Día 90 y 40% PPE.....	76
FIGURA 5.45: Variación del peso en hormigones .....	79
FIGURA 5.46: Variación de densidad en hormigones .....	81
FIGURA 5.47: Resistencia a compresión de hormigones. ....	83
FIGURA 5.48: Variación porcentual de la resistencia a compresión .....	84
FIGURA 5.49: Gráfica de probabilidad normal resistencia a la compresión 20% PPE .....	87
FIGURA 5.50: Gráfica de probabilidad normal resistencia a la compresión 40% PPE .....	87
FIGURA 5.51: Análisis de varianza resistencia a la compresión 20% PPE. ....	87
FIGURA 5.52: Análisis de varianza resistencia a la compresión 40% PPE .....	88
FIGURA 5.53: Interacción resistencia a la compresión v/s cantidad PET para 20% PPE. ....	89
FIGURA 5.54: Interacción resistencia a la compresión v/s cantidad PET para 40% PPE .....	89

## INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: Retracción hidráulica medida a diferentes tiempos de secado .....	34
TABLA 3.1: Factorial de experimento .....	34
TABLA 3.2: Planificación ensayo de retracción libre .....	37
TABLA 4.1: Densidad aparente suelta gravilla .....	43
TABLA 4.2: Densidad aparente compactada gravilla .....	43
TABLA 4.3: Densidades y absorción gravilla .....	44
TABLA 4.4: Densidad aparente suelta arena .....	45
TABLA 4.5: Densidad aparente compactada arena .....	45
TABLA 4.6: Densidades y absorción arena .....	46
TABLA 4.7: Densidad aparente suelta PET .....	47
TABLA 4.8: Densidad aparente compactada PET .....	47
TABLA 4.9: Densidad aparente suelta PPE .....	48
TABLA 4.10: Árido Combinado .....	48
TABLA 4.11: Dosificación hormigón patrón .....	50
TABLA 4.12: Dosificación hormigón con 20% PPE y 0%,25% y 50% PET Grueso.....	50
TABLA 4.13: Dosificación hormigón con 20% PPE y 0%,25% y 50% PET Fino .....	51
TABLA 4.14: Dosificación hormigón con 40% PPE y 0%,25% y 50% PET Grueso.....	51

TABLA 4.15: Dosificación hormigón con 40% PPE y 0%,25% y 50% PET Fino .....	51
TABLA 5.1: Nomenclatura hormigones .....	56
TABLA 5.2: Asentamiento de cono .....	57
TABLA 5.3: Variación asentamiento en hormigones .....	58
TABLA 5.4: Expansión y Retracción Hidráulica de los hormigones hasta día 35 .....	60
TABLA 5.5: Expansión y Retracción Hidráulica de los hormigones hasta día 90 .....	60
TABLA 5.6: Tabla general de retracción en software DesignExpert para hormigones con 20% de PPE .....	64
TABLA 5.7: Tabla general de retracción en software DesignExpert para hormigones con 40% de PPE .....	65
TABLA 5.8: Pérdida de peso promedio en hormigones hasta día 28 .....	77
TABLA 5.9: Pérdida de peso promedio en hormigones hasta día 90 .....	78
TABLA 5.10: Pérdida de densidad promedio en hormigones hasta día 28.....	80
TABLA 5.11: Pérdida de densidad promedio en hormigones hasta día 90.....	80
TABLA 5.12: Resistencia compresión promedio de hormigones .....	82
TABLA 5.13: Variaciones de resistencia a compresión de los diferentes hormigones. ....	84
TABLA 5.14: Tabla general de resistencia a la compresión en software DesignExpert para hormigones con 20% de PPE .....	85
TABLA 5.15: Tabla general de resistencia a la compresión en software DesignExpert para hormigones con 40% de PPE .....	86

## RESUMEN

La retracción hidráulica es una de las limitaciones más importantes que tiene el hormigón, y se define como la deformación del hormigón, ya sea en estado fresco o endurecido, producido por la pérdida paulatina del agua en la mezcla de hormigón. Al producirse la pérdida de agua se produce una deformación impuesta, la cual genera tensiones internas de tracción y conlleva a la fisuración por tracción, lo que se presenta durante las primeras horas a través de una disminución de volumen del hormigón en el proceso de fraguado; o en el hormigón endurecido días o meses después.

Diversos son los factores que afectan en la velocidad y magnitud de la retracción hidráulica, entre los cuales se encuentran factores de dosificación, factores ambientales a los que está sometido el hormigón o factores de ejecución y diseño del mismo. La presente investigación se basa en un factor de dosificación, y se trata de la influencia del contenido y tamaño del agregado; en donde se hizo un reemplazo del árido fino por perlas de poliestireno expandido (PPE) y a su vez, el contenido de perlas fue reemplazado por PET reciclado, en distintos porcentajes y tamaños.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la influencia que tiene la incorporación de PET reciclado en contenidos y tamaños variables en la retracción hidráulica de hormigones fabricados con distintas cantidades de perlas de poliestireno expandido. Para esto se evaluaron dos

porcentajes de PPE (20% y 40%) y dos porcentajes (25% y 50%) y tamaños (grueso y fino) de PET reciclado.

Mediante un diseño factorial se determinó estudiar doce hormigones, más un hormigón patrón, en los cuales se midió docilidad, retracción hidráulica y resistencia a la compresión, con el fin de identificar el efecto que tiene la incorporación de PET reciclado en el hormigón.

Los resultados obtenidos permitieron concluir que la incorporación de los distintos porcentajes y tamaños de PET reciclado aumentaron los niveles de retracción hidráulica. Mientras que la resistencia a la compresión disminuyó a medida que aumentaba el contenido de PET reciclado, siendo el PET fino, el que produjo una menor resistencia a la compresión.

Palabras claves: Hormigón, Retracción hidráulica, agregado, perlas de poliestireno expandido, PET reciclado.

## ABSTRACT

Hydraulic shrinkage is one of the most important limitations of the concrete, and is defined as the deformation of the concrete, either fresh or hardened, produced by the gradual loss of water in the concrete mix. The water loss occur an imposed deformation occurs, which generates internal tensile and leads to tension cracking, which occurs during the first hours through a concrete volume decrease in the setting process; or in hardened concrete days or months later.

Various factors that affect the speed and magnitude of the hydraulic retraction, including dosage factors, environmental factors to which it is subject or concrete execution and design factors are the same. This research is based on a dosage factor and is influenced by the content and aggregate size; where he became a fine aggregate replacement for expanded polystyrene beads (EPP) and in turn, the content of beads was replaced by recycled PET in different proportions and sizes.

This research aims to evaluate the influence of the addition of recycled PET content and varying sizes in the hydraulic shrinkage of concrete made with different quantities of expanded polystyrene beads. For this two percentages of PPE (20% and 40%) and two percentages (25% and 50%) and sizes (coarse and fine) of recycled PET they were evaluated.

Using a factorial design study determined twelve concrete, a pattern more concrete, in which docility, hydraulic shrinkage and compressive strength was measured in order to identify the effect of incorporation of recycled PET in the concrete.

The results led to the conclusion that the incorporation of the various percentages and sizes of PET recycling levels increased hydraulic shrinkage. While the compressive strength decreased with increasing the content of recycled PET, PET being thin, which produced a lower compressive strength.

Keywords: concrete, hydraulic shrinnkage, aggregate, expanded polystyrene beads, recycled PET

## **CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES**

### **1.1 Planteamiento del problema**

Dentro de la gama de hormigones que se encuentran en el mercado de la construcción, se encuentra el llamado hormigón liviano, el cual se define en el documento ACI 213R (1987) como aquel que cuenta con una densidad en estado seco al aire menor a  $1850 \text{ kg/m}^3$ . Este tipo de hormigones se obtiene principalmente con el reemplazo de manera parcial o total del árido de densidad normal por áridos livianos.

Los hormigones con áridos livianos han sido utilizados en gran cantidad de aplicaciones desde la segunda mitad del siglo XX, transformándose en una alternativa muy conveniente respecto a los hormigones convencionales, debido principalmente a las ventajas derivadas de la obtención de estructuras con un menor peso propio. Al ser un material con menor densidad que el hormigón convencional trae consigo ventajas tales como la disminución del tamaño de fundaciones, edificaciones de mayor altura, tecnologías de prefabricación, mejor aislamiento térmico, mayor resistencia al fuego, etc. (Videla, C. y López, M., 2000).

Dentro de las desventajas de los hormigones livianos, se encuentra que poseen un nivel superior de retracción hidráulica en comparación con hormigones tradicionales, debido por ejemplo, al poco contenido de árido grueso, ya que cuanto menor sea el tamaño del árido, mayor será la retracción del hormigón. Varela y Aguilar en 1999 encontraron una reducción en la retracción hidráulica de un 17% en hormigones confeccionados con cemento nacional y un tamaño máximo nominal de 40 mm., con respecto a hormigones confeccionados con el mismo tipo de cemento pero con un tamaño máximo nominal de 20 mm.

La retracción hidráulica es una de las limitaciones más importantes que tiene el hormigón, el cual es un fenómeno físico que se produce por la pérdida de humedad del hormigón ya sea en estado fresco o endurecido, la cual genera una deformación que produce tensiones internas de tracción, las que provocan fisuración por tracción. A su vez, estas fisuras además de ocasionar un daño estético, afectan a la serviciabilidad y durabilidad del hormigón (Ocampo, 2013). Diversos son los factores que afectan a la retracción del hormigón, tanto en su magnitud como velocidad, tales como la dosificación, el diseño o condiciones ambientales a las que se somete el hormigón. Para los factores de dosificación se considera la cantidad y tipo de cemento, dosis de agua, relación agua/cemento, aditivos o adiciones y tamaño y distribución de los áridos, siendo este último punto, fundamental en la presente investigación, ya que se hará un reemplazo parcial de arena por perlas de poliestireno expandido y PET reciclado, con ello, se busca determinar los niveles de retracción hidráulica del hormigón liviano,

elaborado con cemento, arena, áridos y poliestireno expandido en perlas, mediante la incorporación de PET reciclado.

El PET (Tereftalato de polietileno) es un tipo de plástico utilizado mayormente en los envases de bebidas, en especial de agua y en textiles. Es uno de los plásticos más reciclados en Europa y Estados Unidos por ser menos perjudicial que otros tipos de plástico como el PVC, por este motivo se ha incrementado su utilización en trabajos de investigación. Estudios anteriores demostraron que para un hormigón convencional, el PET reciclado aumentó los niveles de retracción hidráulica, por lo que a mayor cantidad de PET, mayores fueron los resultados en la retracción (Palma, 2014). Sin embargo, al poseer el PET un módulo de elasticidad mayor que el de las perlas de poliestireno expandido, se cree que al reemplazar porcentajes de perlas de poliestireno expandido por PET reciclado, disminuirá los valores de la retracción hidráulica de los hormigones livianos estructurales.

## **1.2 Objetivos de la investigación**

### **1.2.1 Objetivo general:**

Evaluar la influencia que tiene la incorporación de PET reciclado en contenidos y tamaños variables en la retracción hidráulica de hormigones fabricados con distintas cantidades de perlas de poliestireno expandido.

### **1.2.2 Objetivos específicos:**

- Determinar la influencia de distintos porcentajes y tamaños de PET reciclado incorporados a la mezcla del hormigón confeccionado con distintos porcentajes de perlas de poliestireno expandido, sobre su retracción hidráulica.
- Identificar cambios en las propiedades mecánicas que puede efectuar el PET reciclado en el hormigón modificado con perlas de poliestireno expandido.

## **1.3 Alcances de la investigación**

- El PET reciclado fue obtenido de la planta recicladora RINOPLAST, de la región de Valparaíso.
- Las perlas de poliestireno expandido reemplazarán a la arena en cantidades de 20% y 40% en volumen.
- El PET reciclado reemplazará a las perlas de poliestireno expandido en cantidades de 25% y 50% en volumen.
- Se utilizó cemento portland puzolánico grado corriente según NCh 148 Of.68

- El agua utilizada fue del tipo potable, libre de contaminación según NCh 1498 Of.82
- Se utilizaron áridos procedentes del río Aconcagua según NCh 164 Of.76
- Los ensayos fueron realizados en los laboratorios de la escuela de construcción civil de la Universidad de Valparaíso.
- El estudio de retracción hidráulica fue evaluado a un plazo máximo de 90 días.

## **1.4 Hipótesis**

La incorporación de PET reciclado como sustituto de las perlas de poliestireno expandido, disminuirá la retracción hidráulica del hormigón.

## 1.5 Metodología de la investigación

En la figura 1.1 se muestra la metodología de trabajo que se empleará para determinar el efecto que produce el PET reciclado en la retracción hidráulica de hormigones dividido en tres etapas, las cuales son:

a) Etapa I

Esta primera etapa se basa en el estudio bibliográfico sobre la retracción hidráulica del hormigón, para posteriormente identificar el efecto que tiene este tipo de hormigón al aplicar PET reciclado. Junto con eso, se hace una revisión bibliográfica sobre la normativa de hormigones livianos para el posterior diseño de la mezcla.

Se suma en esta etapa la definición de los objetivos y alcances de esta investigación.

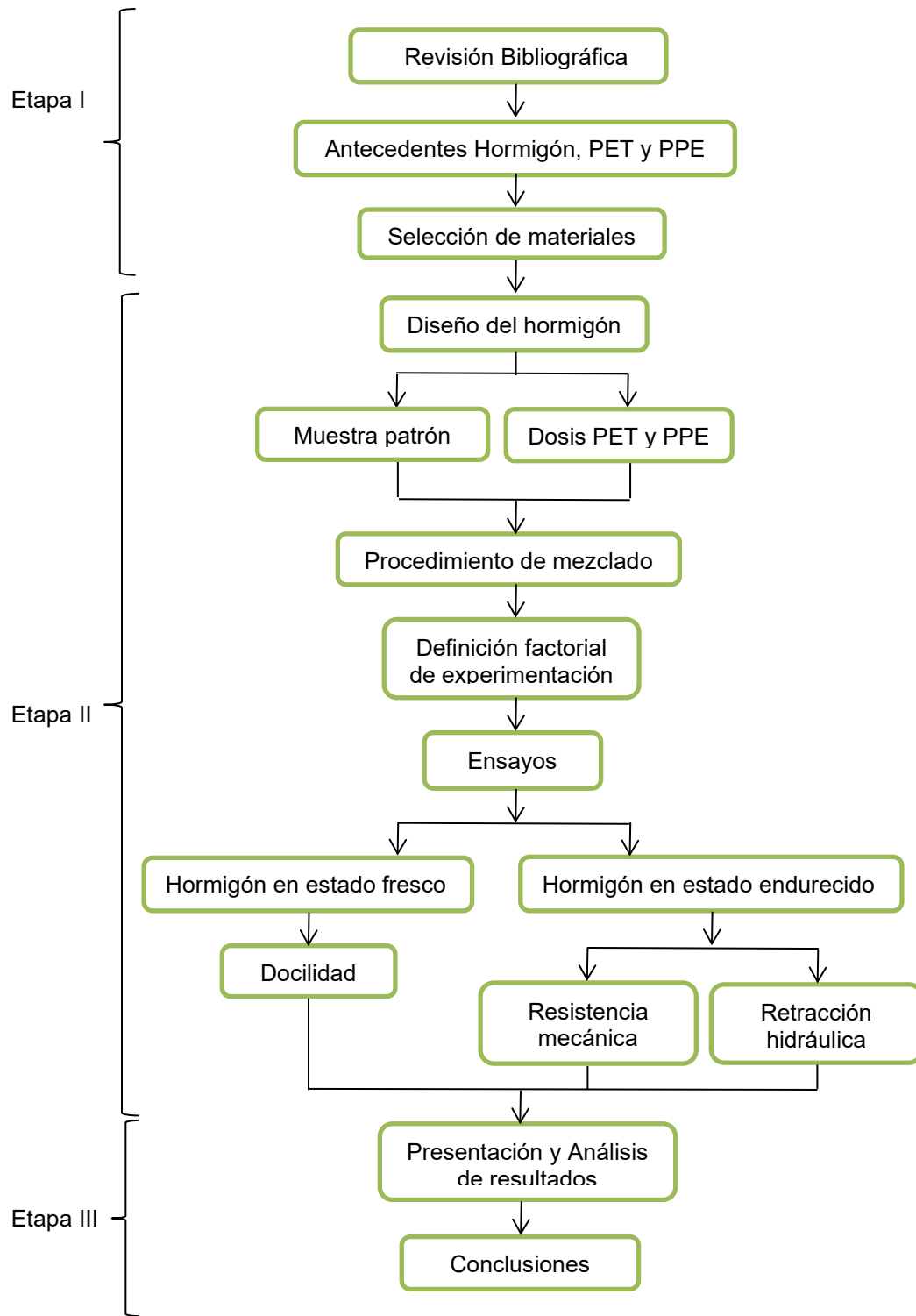
b) Etapa II

Luego de obtener el diseño de la mezcla, se lleva a cabo la elaboración de probetas de hormigón, donde se elabora una muestra patrón sin la incorporación de PET reciclado ni perlas de poliestireno expandido (PPE). Las demás probetas se elaboran con distintos porcentajes de PET reciclado y PPE. A todas estas muestras se les aplicarán ensayos de resistencia a la compresión y retracción libre.

c) Etapa III

Se entregan y estudian los resultados para elaborar las conclusiones de esta investigación.

En la Figura 1.1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología de trabajo que se empleará en esta investigación.



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 1.1: Diagrama de metodología de investigación

## **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Generalidades del hormigón**

El hormigón es un material artificial que resulta de la mezcla de áridos, cemento y agua; el cemento actúa como aglutinante y el agua proporciona el medio de hidratación de la mezcla. Al unir estos dos componentes forman una pasta de cemento que tiene la función de separar las partículas de áridos, adherirse fuertemente a ellos y llenar los vacíos.

Al entrar en contacto el agua con el cemento, este se hidrata e inicia complejas reacciones químicas que, con el transcurso de las horas, derivan en el fraguado y endurecimiento progresivo del hormigón; obteniéndose así un material de consistencia pétreo.

Las propiedades y características del hormigón dependen en gran parte de las proporciones de los componentes de la mezcla, además de las condiciones de humedad y temperatura; durante los procesos de fabricación, fraguado y curado.

En algunas ocasiones para mejorar las propiedades del hormigón se agregan otros componentes, como por ejemplo aditivos químicos, micro sílices o adiciones, con el fin de aumentar la trabajabilidad, resistencia, impermeabilidad, entre otras. Por otro lado también se pueden reemplazar sus componentes básicos por elementos con características especiales como son los agregados livianos, agregados pesados o fibras.

La calidad del hormigón depende fundamentalmente de la calidad de la pasta de cemento y de los agregados, como también la mezcla entre ambos. Un hormigón es elaborado correctamente cuando cada partícula de los agregados es cubierta completamente por la pasta de cemento; y cuando ésta llena todos los espacios que hay entre las partículas. En consecuencia, la calidad del hormigón es influenciada fuertemente por la cantidad de agua utilizada respecto de la cantidad de cemento (Kosmatka et al, 2004).

El hormigón se ha transformado en un importante elemento estructural debido a que es un material maleable, lo que permite que adquiera varias formas y de dimensiones variables. Todo esto gracias a su consistencia plástica en estado fresco.

La principal característica estructural del hormigón es su excelente resistencia a los esfuerzos de compresión, sin embargo su resistencia a la tracción y al esfuerzo cortante es relativamente baja. Para compensar este problema se refuerza el hormigón con barras de acero, lo que permite que obtenga una mejor resistencia ante estos esfuerzos; a esta aleación se le llama hormigón armado.

En este capítulo se indican las propiedades que posee el hormigón en sus diferentes estados, posteriormente se hace referencia a una de las principales patologías que afecta al hormigón; la retracción.

### 2.1.1 Hormigón en estado fresco

El hormigón en estado fresco se define como hormigón en estado plástico, lo que permite al hormigón ser transportado, colocado en un molde para adquirir alguna forma deseada, y terminado con suficiente facilidad sin que haya segregación; todo esto define al hormigón como “trabajable”, sin embargo Neville (1996) señala que esta definición es muy ambigua para ser asignada a una de las propiedades importantes del hormigón, por lo que postula lo siguiente:

#### a) Trabajabilidad

La trabajabilidad que se quiera otorgar al hormigón, va a depender fundamentalmente de los métodos de compactación disponibles. No obstante una trabajabilidad deseada para una considerable masa de hormigón, no necesariamente va a ser la misma para hormigones con secciones delgadas, inaccesibles, o muy reforzadas.

Por estas razones es que la trabajabilidad debiese definirse como una propiedad física del hormigón, y no asociarla a ciertas características o condiciones de una determinada obra de construcción.

Otra expresión que también se emplea para describir el hormigón en estado fresco, es la consistencia; éste término se refiere básicamente a la firmeza de una sustancia o la capacidad que tiene para fluir.

En el caso del hormigón, la consistencia toma en cuenta el grado de humedad que este tenga, ya que dentro de ciertos límites, los hormigones con más porcentajes de humedad son más trabajables que los hormigones más secos. Sin embargo para hormigones con una misma consistencia, la trabajabilidad puede variar.

#### b) Segregación

La segregación se define como la separación de los componentes de una mezcla heterogénea, de modo que la distribución de ellos deje de ser uniforme. En el caso del hormigón las principales causas que producen la segregación son las diferencias de tamaños y densidades que posee cada uno de los componentes de la mezcla.

Existen dos formas de segregación en el hormigón, la primera es cuando las partículas gruesas tienden a asentarse más que las partículas finas, y la segunda ocurre cuando se separa la lechada de la mezcla. Para evitar o controlar este fenómeno se recomienda escoger una granulometría adecuada y tener un manejo cuidadoso del hormigón.

#### c) Exudación

La exudación es un tipo de segregación en el cual una parte del agua de la mezcla tiende a ascender a la superficie de un hormigón recién colocado. Por lo tanto se trata de un caso de sumersión de las partículas; asimismo Powers (1939) postula que la exudación se puede considerar como un caso especial de segregación.

Como consecuencia de la exudación, es el elevado porcentaje de humedad que queda en la parte superior de la masa de hormigón. Si una fina capa de agua quedase atrapada entre la superficie de contacto hormigón- hormigón, provocará que el elemento de hormigón sea poroso, débil y poco durable. Por otra parte, si el agua de exudación vuelve a mezclarse en el hormigón durante la terminación de su superficie, esta área quedará débil al desgaste.

Si la evaporación de agua de la superficie es más rápida que la velocidad de exudación, pueden producirse grietas plásticas de contracción en el hormigón.

### 2.1.2 Hormigón en estado endurecido

El hormigón experimenta un proceso de endurecimiento progresivo, que transforma el material plástico en un material sólido, producto de un complejo proceso físico-químico de larga duración.

En esta etapa las propiedades del hormigón evolucionan con el tiempo, y dependen en gran parte de las características y proporciones de los componentes; además de las condiciones ambientales a las que estará expuesto durante su vida útil.

Las propiedades más importantes del hormigón en su etapa de endurecimiento son la resistencia, permeabilidad y durabilidad, las cuales se describen a continuación.

#### a) Resistencia

Se define resistencia como la capacidad que tiene el hormigón de resistir cargas por unidad de área.

La resistencia que se desee obtener en el hormigón depende en gran parte del diseño de la mezcla, la cual está en función principalmente de la relación agua/cemento; de modo que disminuye esta relación, la resistencia aumenta.

b) Permeabilidad

Se considera al hormigón como un material permeable, ya que permite el escurrimiento de agua a través de su masa.

El grado de permeabilidad del hormigón depende de su constitución, estando normalmente comprendido su coeficiente de permeabilidad entre  $10^{-6}$  y  $10^{-10}$  cm/seg.

c) Durabilidad

Es la capacidad del hormigón de resistir el paso del tiempo sin perder sus otras propiedades. La durabilidad del hormigón depende de los agentes que pueden agredir el material, por ejemplo mecánicos (impactos o choques, vibraciones, sobrecargas), físicos (ciclos de hielo-deshielo, que son grandes diferencias térmicas o fuego), químicos (terrenos agresivos, contaminación atmosférica o filtración de agua) o biológicos (vegetación o microorganismos).

Los que mayor daño producen al hormigón son el agua, las sales que arrastra, el calor o variaciones bruscas de temperatura y agentes contaminantes.

## 2.4 Generalidades del hormigón liviano

Los hormigones livianos se definen en el documento ACI 213R (1987) como aquellos que poseen una densidad en estado seco al aire menor a 1850 Kg/m<sup>3</sup> y se obtienen principalmente con el reemplazo de manera parcial o total del árido de densidad normal por áridos livianos.

Los primeros hormigones livianos utilizados para construir edificaciones surgieron en el Imperio Romano en los años 20 a.C. Estos primeros hormigones eran resultado de la mezcla de cementos puzolánicos con materiales de baja densidad como piedra pómez. Entre las obras realizadas con este tipo de hormigón destacan: La cúpula del Panteón de Agripa (25 a.C.), los arcos del Coliseo Romano (70 d.C.), las bóvedas de las Termas de Caracalla (212 d.C.) y los nervios de la bóveda de la Basílica de Majencio (306 d.C.), con luces mayores a 25 metros. Ya en la edad moderna, con los avances en

la tecnología se experimenta con nuevos tipos de agregados livianos como las arcillas, pizarras y escorias expandidas procedentes de plantas industriales, o con agregados artificiales plásticos como el poliestireno, y agregados ricos en sílice como la cascarilla de arroz.

Un hormigón liviano trae consigo un gran número de ventajas, si se compara con un hormigón convencional (Videla, C. y López, M., 2000), entre ellas cabe destacar:

a) Disminución el tamaño de las fundaciones:

Una estructura más liviana requiere de fundaciones de menor dimensión. Esto trae consigo un ahorro importante de insumos y tiempo debido al menor trabajo en el movimiento de tierras y volumen de hormigón colocado. Por otra parte, se posibilita la construcción en suelos de escasa capacidad soportante manteniendo un tamaño de fundaciones adecuado.

b) Edificaciones de mayor altura:

Uno de los principales objetivos de los materiales de construcción es entregar la mayor capacidad resistente al menor peso posible. Los hormigones livianos estructurales presentan una razón resistencia/peso muy superior al hormigón tradicional, lo que permite la construcción de edificaciones de hormigón de mayor altura. Como consecuencia de lo anterior, los hormigones livianos posibilitan la fabricación de vigas y losas de mayor luz, ya que la pérdida de capacidad soportante que podría experimentar por el uso de áridos más livianos, es proporcionalmente menor a la disminución de densidad.

c) Desarrollo de tecnologías de prefabricación:

Cabe destacar que un material de menor peso abre grandes posibilidades con respecto al desarrollo de prefabricación, pues se reducen de manera considerable los costos de transporte y montaje, principales costos asociados a esta tecnología.

d) Disminución de fuerzas sísmicas:

Las fuerzas sísmicas son fuerzas de tipo inercial, es decir, están íntimamente ligadas a la masa de la estructura. Es así como la utilización de hormigones livianos permite reducir fuertemente este tipo de fuerzas, lo que a su vez implica una economía en la cantidad de acero estructural y en las secciones de hormigón.

## e) Mejor aislamiento térmico:

Los hormigones livianos poseen una conductividad térmica y acústica considerablemente menor que los hormigones convencionales. Es posible obtener valores entre 15 y 20 % de la conductividad térmica de un hormigón convencional. Esto trae consigo dos puntos importantes: Ahorro en tiempo y materiales por la obtención de paneles de una sola pieza, con un aislamiento térmico adecuado, sin necesidad de recurrir a la combinación de varios materiales y ahorro en calefacción ya que al contar con una barrera térmica eficiente, hace posible un importante ahorro en el consumo de energía utilizado en la calefacción del inmueble.

## f) Potencial de reciclaje:

En la actualidad la conservación del medio ambiente ha cobrado una gran importancia, más aún si se considera la escasez de recursos pétreos y el gran impacto ambiental que tiene la explotación de éstos. Muchos áridos livianos artificiales son fabricados con desechos de otras industrias, por lo que su utilización no requiere de explotación de recursos naturales.

## g) Mayor resistencia al fuego:

Los hormigones livianos también se caracterizan por tener una magnífica resistencia al fuego, mejor que un hormigón convencional. Esto se debe, entre otras cosas, a que su coeficiente de conductividad térmica es mucho menor que el del hormigón tradicional, lo que retarda el proceso de propagación del fuego y la combustión misma.

## h) Mayor deformabilidad térmica:

Los hormigones livianos tienen asociado a su baja densidad un bajo coeficiente de dilatación térmica, lo que significa un menor cambio dimensional frente a cambios de temperatura. Se debe mencionar que las propiedades del hormigón con áridos livianos dependen en gran medida de la cantidad y propiedades del árido particular que se esté utilizando.

Gran parte de su desarrollo se ha concentrado en la Arcilla y Pizarra expandidas, áridos con los que se han logrado las mejores propiedades mecánicas.

Entre sus principales limitaciones se encuentra su baja resistencia y su alta retracción Hidráulica, por lo que debe ser importante tener en cuenta estos aspectos al contemplar su uso.

## 2.4.1 Hormigón con áridos livianos

Los áridos livianos utilizados en los hormigones livianos pueden tener dos orígenes:

- Origen natural
- Producidos artificialmente

### 2.4.1.1 Hormigón liviano con áridos de origen natural

Son los hormigones livianos confeccionados con áridos en los cual el aire está atrapado en forma natural, por ejemplo en rocas de origen volcánico, como las lavas o piedra pómez, y también los originados de los desechos de la madera, como la viruta y el aserrín. Las densidades obtenidas de los áridos de origen volcánico son más bien altas, rondando del límite de aceptación de la densidad para hormigones livianos.

### 2.4.1.2 Hormigón liviano con áridos de origen artificial

Los áridos livianos de origen artificial corresponden a materiales especiales, los que al ser sometidos a tratamientos térmicos, producen liberación de gases en su interior, por lo que se expanden disminuyendo su densidad. Un ejemplo de este tipo de áridos es el poliestireno expandido, el cual será utilizado en la confección de las mezclas de prueba de esta tesis. El uso de áridos livianos de origen artificial permite obtener densidades menores que los de origen natural y también mayores resistencias.

## 2.5 Generalidades del poliestireno

El poliestireno (PS) es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno monómero. Existen cuatro tipos principales: el PS cristal o GPPS (del inglés: General Purpose Polystyrene), que es transparente, rígido y quebradizo; el poliestireno de alto impacto o HIPS (del inglés: High Impact Polystyrene), resistente al impacto y opaco blanquecino, el poliestireno expandido o EPS (del inglés: Expandable Polystyrene; PSE en francés), muy ligero, y el poliestireno extruido, similar al expandido pero más denso e impermeable. Las aplicaciones principales del PS antichoque y el PS cristal son la fabricación de envases mediante extrusión-termoformado, y de objetos diversos mediante moldeo por inyección. Las formas expandida y extruida se emplean principalmente como aislantes térmicos en construcción y para formar coquillas de protección en los embalajes de objetos frágiles para protegerlos. El EPS también es utilizado para la producción de cajas de pescado o neveras para el transporte de vacunas, por su capacidad aislante.

La primera producción industrial de poliestireno cristal fue realizada por BASF, en Alemania, en 1930. El PS expandido y el PS antichoque fueron inventados en las décadas siguientes. Desde entonces los procesos de producción han mejorado sustancialmente y el poliestireno ha dado lugar a una industria sólidamente establecida. Con una demanda mundial de unos 10,6 millones de toneladas al año (dato de 2000, excluye el poliestireno expandido), el poliestireno es hoy el cuarto plástico más consumido, por detrás del polietileno, el polipropileno y el PVC.

### 2.5.1 Química del poliestireno

A escala industrial, el poliestireno se prepara calentando el etilbenceno en presencia de un catalizador para dar lugar al estireno. La polimerización del estireno requiere la presencia de una pequeña cantidad de un iniciador, entre los que se encuentran los peróxidos, que opera rompiéndose para generar un radical libre (Figura 2.1), este se une a una molécula de monómero, formando así otro radical libre más grande, que a su vez se une a otra molécula de monómero y así sucesivamente. Este proceso en cadena finalizará por combinación de dos radicales, sean ambos radicales polímeros o bien radical polímero y otro radical del iniciador, o por abstracción de un átomo de hidrógeno de otra molécula.



FIGURA 2.1: Proceso de polimerización vinílica por radicales libres

Fuente: Revista CENIC, 2004.

## 2.6 Poliestireno expandido

El poliestireno expandido es un material plástico espumado derivado del poliestireno y se usa comúnmente en el sector de envase y la construcción. En Latinoamérica se le conoce por distintos nombres, generalmente derivados del nombre del fabricante. En Chile generalmente se le dice “Plumavit”, pero en el área de la construcción se le conoce por el nombre de “Aislapol”, ya que este es el fabricante de poliestireno más antiguo en Chile.

### 2.6.1 Proceso de producción

Su fabricación comienza a partir de compuestos del poliestireno en forma de perlititas que contienen un agente expansor (habitualmente pentano). Luego las perlititas se someten a una pre-expansión y son conducidas a silos para su almacenamiento y reposo. Posterior a eso son llevadas a las máquinas de moldeo donde se le aplica energía térmica, haciendo que el agente expansor de las perlititas se caliente y éstas aumenten de volumen, a la vez que el polímero se plastifica. Durante el proceso el material se adapta al molde que lo contiene.

### 2.6.2 Propiedades

Su propiedad más característica es su higiene, ya que es inmune al ataque de microorganismos por lo que no se pudre ni descompone, lo que lo convierte en un material idóneo para el envase de productos frescos.

Otra propiedad importante es su baja densidad, resistencia a la humedad y capacidad de absorción de impactos, por lo que también se usa para envasar elementos frágiles como electrodomésticos, componentes eléctricos etc.

En el sector de la construcción su principal propiedad, aparte de su ligereza, es su capacidad como aislante térmico y acústico, utilizándose como tal en fachadas, cubiertas, suelos etc. El poliestireno expandido es reutilizable en el 100 % para usarlo en la fabricación del mismo material y también es reciclable para obtener materias primas para la fabricación de otros materiales. Puede ser incinerado de manera segura ya que sólo emite vapor de agua y dióxido de carbono.

Dentro de sus propiedades negativas se encuentra que no es un material biodegradable, la naturaleza solo puede dividir su estructura en moléculas mínimas, pero no biodegradarlo. El principal método de reciclaje para el poliestireno expandido consiste en despedazar mecánicamente el material para mezclarlo con material nuevo y formar bloques de poliestireno expandido que pueden contener hasta un 50 % de material reciclado.

## **2.7 Hormigón con agregados de plástico reciclado**

Debido a la creciente preocupación medioambiental y la constante búsqueda de materiales más amigables con el ecosistema, los áridos han sido reemplazados en los hormigones por materiales sintéticos procedentes de desechos, centrándose en el plástico reciclado y su uso en hormigones, se han aumentado los estudios y ensayos realizados a este tipo de hormigones, aun así la información disponible es escasa por lo que se considera importante realizar avances en este punto (Gaggino, 2008).

Los estudios más relevantes registran variadas cantidades de reemplazo de plástico por sus agregados pero presentan conclusiones similares. Alesmar et ál (2008) realizaron en Venezuela estudios de la utilización de PET como reemplazo de áridos en mezclas de morteros y hormigones con porcentajes de 5%, 10% y 15% en relación del peso de sus áridos, concluyó que al agregar PET a una mezcla de concreto se pierde un poco de resistencia y se podría utilizar como mezcla para bloques u otros elementos que no soporten cargas importantes.

Por otra parte en Brasil, Modro et al (2009) estudiaron hormigones con una mezcla de cemento portland y residuos PET con porcentajes de incorporación de 10%, 20%, 30% y 40% en volumen y concluyó que para todas sus probetas hubo una disminución en su resistencia mecánica en relación al hormigón patrón (sin contenido de residuos plásticos) y se relaciona sin duda a la interacción

química entre el polímero y la matriz de cemento, pero principalmente debido a la baja resistencia mecánica intrínseca de los polímeros con respecto a los agregados minerales que son mucho más fuertes mecánicamente.

Iglesias (2011) estudió las propiedades mecánicas y de permeabilidad de hormigones con plástico reciclados en sustitución de sus áridos, específicamente utilizó las tapas de botellas (compuestas por polipropileno) para remplazar el árido grueso y PET reciclado triturado para remplazar parte de la arena. Ocupó porcentajes de 10%, 15% y 20% en remplazo de volumen aparente de sus áridos en donde concluyó que se observa una baja en la trabajabilidad de la mezcla, una baja en las resistencias mecánicas de compresión y flexotracción, la permeabilidad también resultó afectada, ya que esta aumentó a mayor cantidad de plástico reciclado en las mezclas estudiadas.

Por último, Costa (2012) realizó estudios de hormigones con dosificaciones a utilizar de 10%, 25%, 50% y 70% de plástico reciclado de PVC y de 25% y 70% de plástico reciclado con contenido de carbono de remplazo en relación a su volumen y concluye que no resulta ventajoso en cuanto a las resistencias del hormigón pero si resulta ventajoso en cuanto a sus aportes térmicos, pero si se trata de elementos de construcción que soporten carga ligera, se pueden conseguir buenos resultados.

## **2.8 El plástico y su reciclaje**

Nuestro país es el segundo consumidor en Latinoamérica, después de México, con 44,23 kilos por cápita de productos plásticos, según datos del año 2012, los cuales indican que Latinoamérica presenta un consumo de productos plásticos bajo los 25 kilos por año y una tasa promedio anual de crecimiento de alrededor de un 7% (Asipla, 2012).

Por otra parte el consumo nacional se concentra fundamentalmente en las áreas de Envases (52.1%), aplicaciones de uso industrial (14.4%), Construcción (14%), Minería (8%), y el restante (11.5%) se reparte entre Menaje, Agricultura, Transporte, Espuma, entre otros.

Hablando específicamente de los desechos plásticos y su reciclado, alrededor de un 7% del peso total de la basura doméstica es plástico y ocupa entre un 20% y 30% de los depósitos de basura en las naciones industrializadas. Cabe mencionar también que el plástico usado muy poco se recicla y existen cerca de 50 tipos diferentes de plástico, pero incluso los más utilizados registran unos índices de reciclaje bastante bajos. En la Unión Europea se recicla entre el 7 y el 8% del plástico (Arandes et ál, 2004).

### 2.8.1 El PET y su reciclaje

El polietileno tereftalato (PET) es un tipo de plástico que compone la mayoría de envases y en el mundo cada año se fabrican cerca de 207 millones de toneladas de este material y tarda más de 150 años en descomponerse.

Entre sus principales características destacan: baja densidad, resistencia mecánica a la compresión, alto grado de transparencia y brillo, resistencia a esfuerzos permanentes y al desgaste, impermeable, alta resistencia química, buenas propiedades térmicas, posee una gran indeformabilidad al calor, alta resistencia al plegado, baja absorción de humedad y lo más importante es 100% reciclable. Este tipo de plástico es uno de los materiales más útiles en la vida cotidiana y por lo mismo, uno de los que genera más contaminación en el mundo (Alesmar et al, 2008).

Existen diversas alternativas con las cuales se puede reciclar el PET, sin embargo las más utilizada es el proceso mecánico, este proceso comienza con una recogida selectiva que tiene como objetivo obtener un producto más limpio, mediante la eliminación de impurezas de otros materiales. La selección se hace de manera automática o manual, es basada en una serie de criterios: color, materiales plásticos (eliminación de PE, PP, PVC) son seleccionados solo las botellas de refrescos y agua, también son eliminados los materiales metálicos. Posteriormente este material es triturado, lo que tiene como objetivo reducir los envases de tamaño, usualmente este proceso es realizado en molinos de cuchillas (Maldonado y Medina, 2008). El tamaño final puede variar de una instalación a otra, aunque lo habitual es obtener una escama menor de 10 mm y que esta se encuentre libre de polvo, luego de esto se procede con el lavado, para este proceso se puede usar agua, tensoactivos y/o sosa diluida a una temperatura que puede ser variable (frío, temperatura ambiente, lavado medio aprox. A 40°C o lavado en caliente a una temperatura de 70°C a 90°C. Al realizar el lavado se estarán eliminando contaminantes de tipo orgánicos entre ellos tierra, arena presentes en la superficie de la escama, etc. Finalmente la escama limpia es sometida a extrusión con temperatura y presión para la obtención de un producto final (Maldonado y Medina, 2008).

El producto triturado que se obtiene una vez reciclado, se puede utilizar en muebles, alfombras, fibras textiles, piezas de automóvil y en nuevos envases de alimentos.

El PET es el plástico reciclado más utilizado en estudios de hormigones con sustituciones de sus áridos, ya que no solo permite reciclar y reutilizar un material contaminante, si no que por otra parte se extraería menor cantidad de material pétreo de canteras, evitando la degradación de paisajes (Costa, 2012).

## 2.9 Retracción

La retracción se define como la deformación del hormigón, ya sea en estado fresco o endurecido, y se presenta durante las primeras horas a través de una disminución de volumen del hormigón en el proceso de fraguado; o en el hormigón endurecido días o meses después. La retracción se produce por la pérdida paulatina del agua en la mezcla de hormigón (Cedeño et. Al, 2009). Al producirse la pérdida de agua se produce una deformación impuesta, la cual genera tensiones internas de tracción y conlleva a la fisuración por retracción.

Existen cinco tipos de retracción, las cuales son: retracción plástica, retracción autógena, retracción por secado, retracción térmica y retracción por carbonatación. Esta investigación se basará en la retracción hidráulica, que es considerada particularmente como una de las principales causas de agrietamiento en la construcción en hormigón (Videla y Aguilar, 1999).

### 2.9.1 Tipos de retracción

#### 2.9.1.1 Retracción plástica

Se produce cuando la pasta de cemento es plástica y experimenta una retracción volumétrica, cuya magnitud es del orden de 1% del volumen total del cemento deshidratado (García, 2011). Esta reducción se conoce como retracción plástica, porque se presenta mientras el hormigón está todavía en estado plástico y aún no ha adquirido resistencias significativas, la pérdida de agua por evaporación de la superficie del hormigón agrava la retracción plástica y puede llevar a un agrietamiento superficial. Sin embargo, si se evita por completo la evaporación inmediatamente después de la colocación del hormigón, se elimina el agrietamiento.

#### 2.9.1.2 Retracción autógena

La retracción autógena se diferencia de los otros tipos de retracción, ya que no se atribuye a la pérdida de agua, sino que a la reducción de volumen que ésta experimenta al combinarse químicamente con el cemento. Esta reducción de volumen, de no existir aportes de agua externos que permitan compensarla, da origen a poros de vacío en la masa del hormigón y en consecuencia a fuerzas capilares capaces de generar retracción. El orden de magnitud de la retracción por autodesecamiento, en hormigones normales, de acuerdo a Neville (1995) varía entre 50 y 100 micrones por metro, no es necesario tomarla en cuenta como factor separado de la retracción por secado que normalmente incluye aquella retracción causada por cambios autógenos.

### 2.9.1.3 Retracción por carbonatación

La retracción por carbonatación es producida por la reacción del CO<sub>2</sub> atmosférico, que penetra y se disuelve en el agua que contienen los capilares, con el hidróxido de calcio contenido en la solución, para formar carbonato de calcio más agua (Giani et al, 2008). Esta combinación química tiene un carácter contractivo ya que disuelve el agua que contiene los capilares, por lo cual el espesor de hormigón afectado por él disminuye su volumen inicial, generándose la denominada retracción por carbonatación. En general, el espesor afectado es pequeño, alcanzando sólo algunos milímetros a la superficie en contacto con el aire. Sin embargo, por el confinamiento que produce el hormigón interior adyacente, esa capa queda sometida a tensiones de tracción, pudiendo fisurarse.

### 2.9.1.4 Retracción térmica

El hormigón puede experimentar variaciones de volumen causadas por la temperatura y puede llegar a ser importante durante los primeros días después de la colocación del hormigón, donde el calor producido por la hidratación del cemento aumenta la temperatura del hormigón, durante el enfriado subsiguiente, el hormigón experimenta una retracción que crea un esfuerzo tensor en el hormigón (Castaño, 2009).

En general, no conllevan riesgos estructurales y deben ser estudiados caso por caso, por ser atípicos.

### 2.9.1.5 Retracción hidráulica

La retracción hidráulica, también denominada retracción por secado, se origina en sí, por el secado de la mezcla, lo que con lleva a la pérdida paulatina de agua por poros y capilares en la mezcla de hormigones o morteros.

Mehta (2006, Op cit, García, 2011) señala más precisamente que la retracción hidráulica se produce debido a un gradiente higrométrico con el aire circundante, si el entorno cuenta con una humedad relativa menor que la presente en el interior del hormigón, este material tiende a contraerse, produciendo el fenómeno de retracción. Al cambiar las características del medio y este se encuentre más húmedo, el gradiente de humedad cambia de signo y la probeta aumenta su volumen (hinchamiento). Como se dijo con anterioridad este cambio de volumen genera fuerzas de tracción en el interior de la mezcla, produciendo fisuras y grietas, por lo que los estudios para predecir con certeza la deformación producida por retracción hidráulica son de suma importancia para que las estructuras no presenten problemas de durabilidad y serviciabilidad, ya que generan un impacto técnico,

económico y de calidad en las obras de construcción en hormigón (Videla y Aguilar, 2005b). A edades tempranas es importante el proceso de curado en una obra de hormigón ya que de no existir aportes de agua externos que permitan compensar la pérdida de agua, en un principio, da origen a poros de vacío en la masa del hormigón y, en consecuencia, a fuerzas capilares capaces de generar retracción en una temprana edad (Giani et al, 2008).

En otras palabras la retracción hidráulica está relacionada principalmente con la remoción del agua absorbida de la pasta de cemento hidratada y, como se menciona con anterioridad, la gradiente de humedad con el medio ambiente es la responsable de este fenómeno.

En la Figura 2.2 se puede apreciar la relación entre el peso de pérdida de agua y la retracción. Para pastas puras, es decir sin áridos, las cantidades son proporcionales ya que no hay agua capilar y solamente se elimina el agua absorbida. Los hormigones que contienen alguna cantidad de agua en los poros de los agregados o en grandes cavidades (vacíos) presentan una variación mayor en la forma de las curvas de pérdida de agua-retracción (Munizaga, 2009).

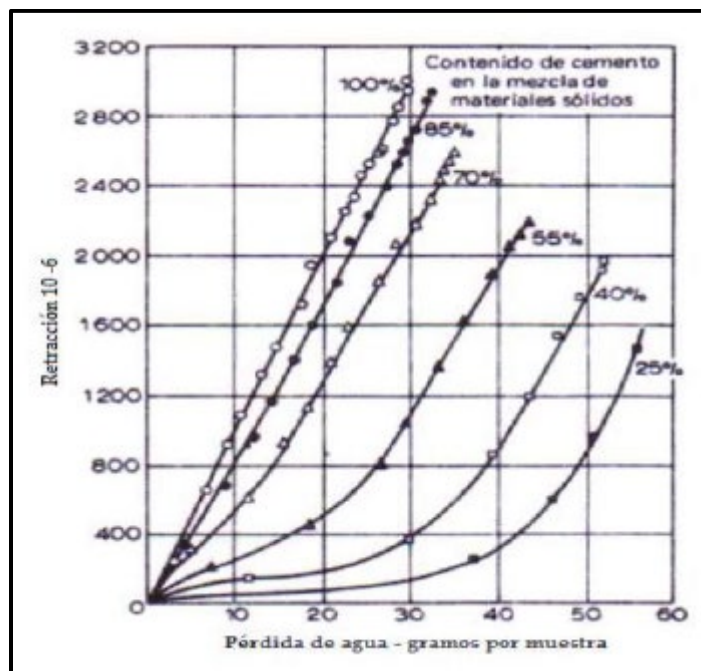


FIGURA 2.2: Relación entre retracción y pérdida de agua

Fuente: Neville, 1995.

## 2.9.2 Factores que afectan la retracción hidráulica

Al momento de estudiar la retracción hidráulica o por secado hay que tener en cuenta que diversos son los factores que afectan este fenómeno, en esta sección se analizan los más influyentes.

### 2.9.2.1 Tipo de cemento

Según Neville (1995) las propiedades del cemento tienen poca influencia sobre la retracción del hormigón. La influencia de la finura del cemento resulta sensible tan solo para la fracción gruesa con partículas más gruesas que  $75\ \mu\text{m}$ . (No. 200), que al tener comparativamente poca hidratación, actúa respectivamente como agregado. En los demás casos un cemento más fino no aumentará la retracción del hormigón, esto se observa en la Figura 2.3 en donde la retracción se comporta de manera similar para diferentes finuras de cementos estudiados.

Sin embargo, el Instituto Americano del cemento (ACI 209, 1999), mediante su investigación realizada sobre pastas que fueron elaboradas con 183 tipos de cementos diferentes, demuestra que la composición química del cemento utilizado tendría una incidencia considerable en la magnitud de la retracción hidráulica, ya que esta disminuiría cuando el contenido de ferroatuminatotetracálcico ( $C_4AF$ ) aumenta o bien cuando el contenido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) es bajo.

Investigaciones realizadas en Chile por Videla y Aguilar (2000) y posteriormente corroboradas en 2001, analizaron la influencia que tienen los diferentes tipos de cementos nacionales sobre la retracción hidráulica del hormigón, llegando a la conclusión de que, con cementos Portland puzolánicos se presenta una rápida retracción inicial que tiende a reducirse y estabilizarse con el tiempo, mientras que con cementos Portland puros, la retracción inicial es más lenta pero se mantiene en el tiempo.

En lo referente a la finura del cemento, el Comité ACI 224 indica que los cementos más finos presentan mayor retracción hidráulica, pero que su importancia sería secundaria en comparación con otras variables. Sin embargo, Neville (1996) sostiene que la finura del cemento es importante sólo para una cantidad relevante de partículas con tamaño mayor a  $75\ \mu$  (malla 200 ASTM), situación que se explica considerando que los granos de cemento se hidratan en forma gradual desde la superficie hacia el interior del grano, por lo que en granos de mayor tamaño la superficie hidratada se transforma en una capa semipermeable que reduce la velocidad de hidratación del agua hacia el núcleo. Como los granos no hidratados se comportan como inertes que limitan la libre deformación y paralelamente existe un menor volumen de pasta sujeta a deformación, es lógico pensar que la presencia de granos más gruesos debe reducir la magnitud de la retracción existente.

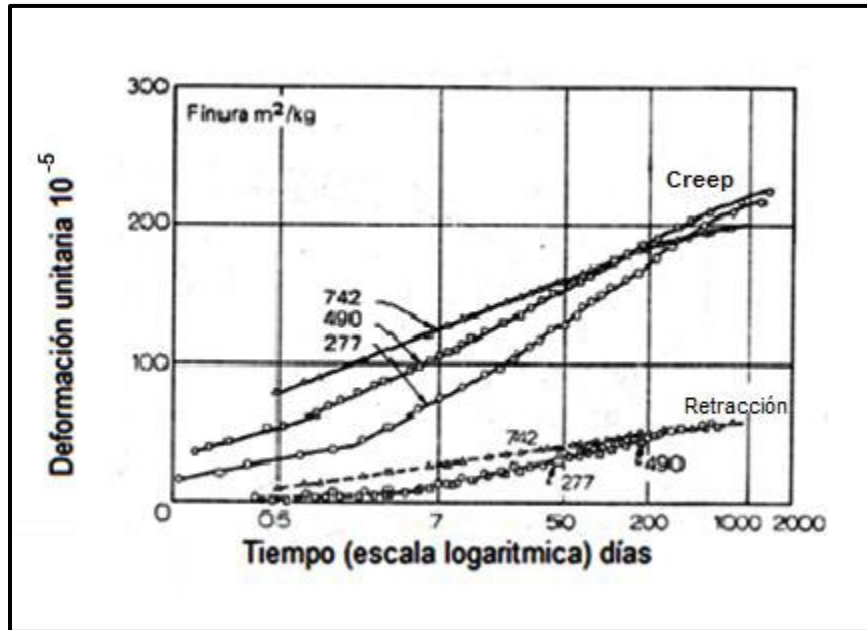


FIGURA 2.3: Creep y retracción de hormigones elaborados con cementsos de diferente finura

Fuente: Neville, 1995.

### 2.9.2.2 Contenido de agua y relación agua/cemento

El contenido de agua afecta también a la retracción del hormigón, porque se reduce la cantidad de agregado restrictivo. Por lo tanto, el contenido de agua de la mezcla indicará generalmente la cantidad previsible de retracción, pero el contenido de agua no es un factor primordial (Neville, 1995). Por esto mismo a mayor razón agua/cemento mayor es la retracción hidráulica ya que establece la cantidad de agua evaporable en la pasta de cemento y la velocidad con que el agua puede llegar a la superficie expuesta (Neville, 1995). Esto se puede ver en la Figura 2.4, en donde una mayor cantidad de agua presente en la mezcla se relaciona directamente con el aumento de la retracción.

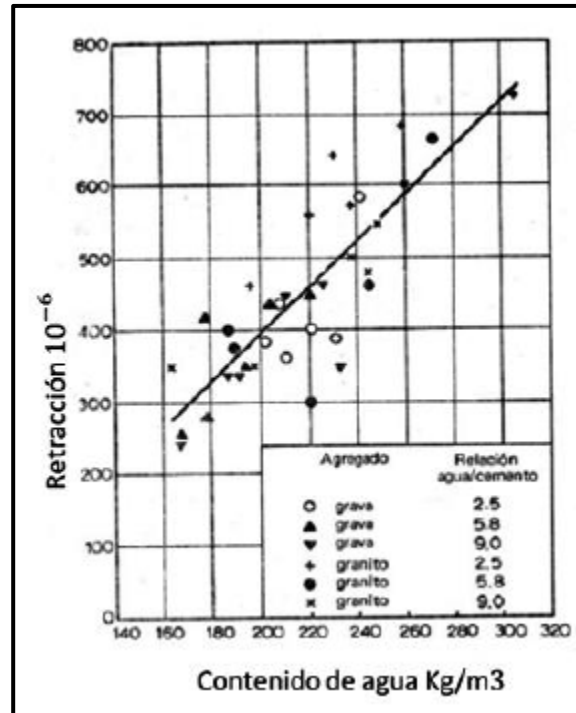


FIGURA 2.4: Relación entre el contenido de agua del hormigón fresco y la retracción por secado.

Fuente: Neville, 1995.

Si la retracción hidráulica del hormigón está en función de la cantidad de agua evaporable en poros y capilares de la pasta de cemento, es el volumen de agua de amasado la condicionante de la retracción hidráulica, más que la relación agua/cemento.

La influencia conjunta del contenido de agua, contenido de cemento y relación a/c sobre la retracción aparece en la Figura 2.5, en donde se observa que a mayores razones de agua cemento, hay mayores valores de retracción.

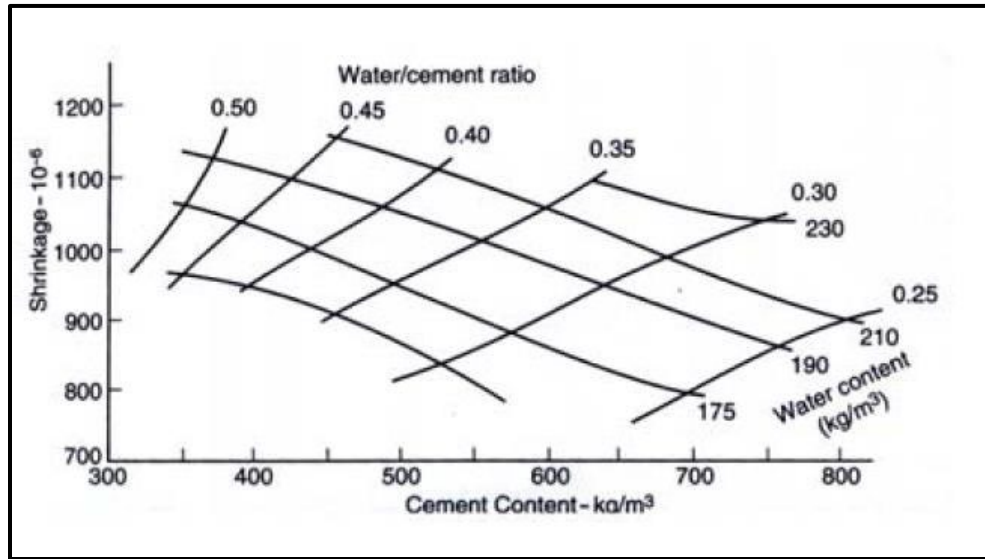


FIGURA 2.5: Relación entre el contenido de agua, contenido de cemento y razón a/c, con la retracción del hormigón curado a 28 días y secado a 450 días.

Fuente: Neville, 1995.

### 2.9.2.3 Agregado

Los áridos al no manifestar cambios significativos en su tamaño, poseen una gran importancia en la estabilidad volumétrica de la mezcla, ya que estos restringen la libre retracción de la pasta de cemento y un mayor porcentaje de estos en el hormigón permite usar una mezcla más pobre, y por lo tanto, se produce una retracción menor, Shah (1994, Op Cit, Castaño 2009) observa que un mayor contenido de áridos y con buenas características, como dureza, baja absorción, densidad alta, y superficie rugosa, favorecen el control de la retracción, puesto que restringen las deformaciones que se presentan en la pasta de cemento.

En estudios recientes, Moon (2005, Op Cit, Castaño 2009) expresa que la retracción además del volumen relativo de árido y la rigidez del mismo, depende también de la forma del árido y el espacio entre partículas.

En la Figura 2.6 se puede apreciar que si aumenta el contenido de agregado grueso se incrementa en el volumen del hormigón, entonces la retracción se reduce.

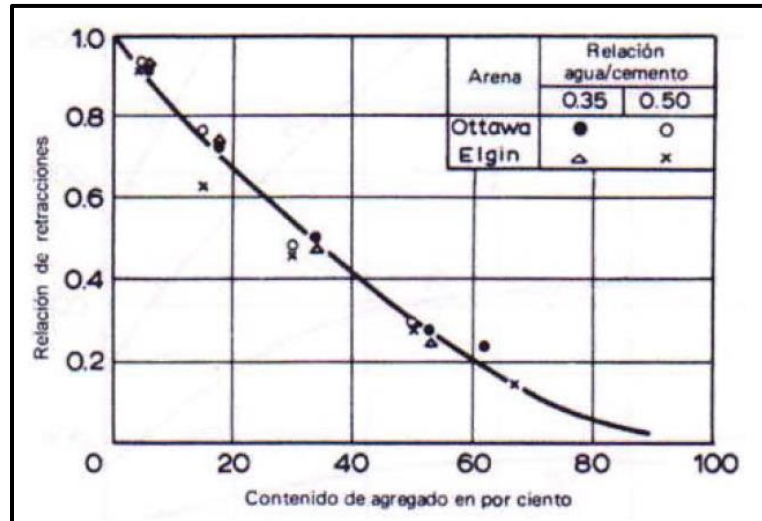


FIGURA 2.6: Influencia del contenido de agregado del hormigón sobre la relación de la retracción del hormigón a la retracción de la pasta pura de cemento.

Fuente: Neville, 1995.

La relación de la retracción del hormigón, a la retracción de la pasta de cemento, depende del contenido de áridos del hormigón, la cual está dada por la siguiente fórmula (Swayze, 1942).

$$S_c = S_p (1 - a)^n$$

Donde:  $S_c$  es la retracción hidráulica.

$S_p$  es la retracción de la pasta.

$a$  es el contenido de árido de la mezcla.

$n$  es un valor experimental que fluctúa entre 1.2 y 1.7

De la fórmula se puede deducir que al aumentar el contenido del árido, disminuye la retracción del hormigón.

La influencia de la relación agua/cemento y del contenido de agregado, pueden combinarse en una sola gráfica, esto se puede ver en la Figura 2.7 y se aprecia que a menor cantidad de áridos se produce mayor retracción en las mezclas. Se debe tener en cuenta que los valores dados para la retracción corresponden al secado en clima templado.

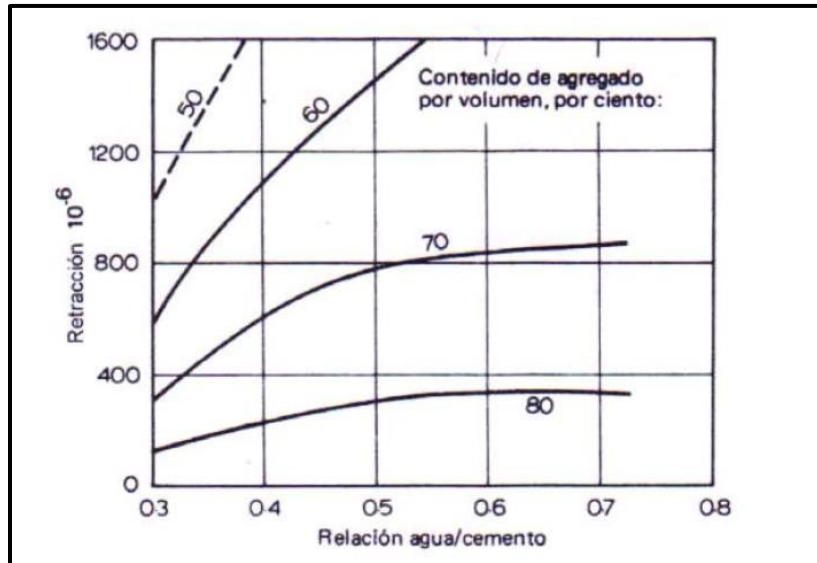


FIGURA 2.7: Influencia de la relación a/c y el contenido de agregado sobre la retracción.

Fuente: Neville, 1995.

Como los áridos conforman el esqueleto del hormigón, las características que ellos posean influyen de gran manera en los valores de retracción. Es decir, si se utilizan áridos más rígidos (de mayor módulo elástico), si se aumenta el tamaño máximo utilizado o si se incrementa el contenido de áridos gruesos; se disminuirá la retracción hidráulica en el hormigón (Solás y Giani, 2010).

Investigadores como Videla y Aguilar (1999) demostraron que para una misma docilidad, aumentar el tamaño máximo de los áridos permite reducir la superficie específica del árido; y es consecuencia, los requerimientos de agua y cemento. Esto a su vez aumenta el contenido de inertes por unidad de volumen del hormigón, lo que se traduce en un incremento de la restricción interna, y por lo tanto una menor retracción.

#### 2.9.2.4 Aditivos y adiciones

Los aditivos del hormigón tales como el cloruro de calcio y las adiciones como la escoria granulada y las puzolanas, tienden a incrementar el volumen de los poros finos en el producto de hidratación del cemento, al igual que los aditivos reductores de agua y los retardantes de fraguado, que son capaces de afectar una mejor dispersión de las partículas del cemento anhidro en el agua, ya que la retracción por secado en el hormigón está asociada directamente con el agua retenida por los pequeños poros en el rango de 3 a 20 nm. Los hormigones que contienen aditivos capaces de refinar los poros, generalmente muestran una retracción por secado más alta (Munizaga, 2011).

### 2.9.2.5 Curado

El curado prolongado con humedad retrasa la retracción, pero el efecto del curado sobre la magnitud de retracción y fisuramiento a largo plazo es pequeño, aunque bastante complejo. En lo que se refiere a la pasta de cemento, el curado prolongado provoca una retracción final mayor, pero la pasta se vuelve más fuerte con el tiempo y resulta capaz de resistir la tendencia a contraerse sin fisurarse.

En general según Neville (1995), los resultados de varias investigaciones sobre este aspecto se contradicen pero en general se manifiesta que el periodo de curado no es un factor importante en la retracción.

### 2.9.2.6 Humedad del ambiente

La humedad relativa ambiente afecta mucho la magnitud de retracción del hormigón, como se ve, por ejemplo, en la Figura 2.8 ya que a una menor humedad relativa, la mezcla suda más agua al medio ambiente. Por lo tanto el hormigón colocado en aire "seco" (no saturado) se retrae, pero se expande en agua o en aire con humedad relativa del 100%, siempre que no exista retracción autógena.

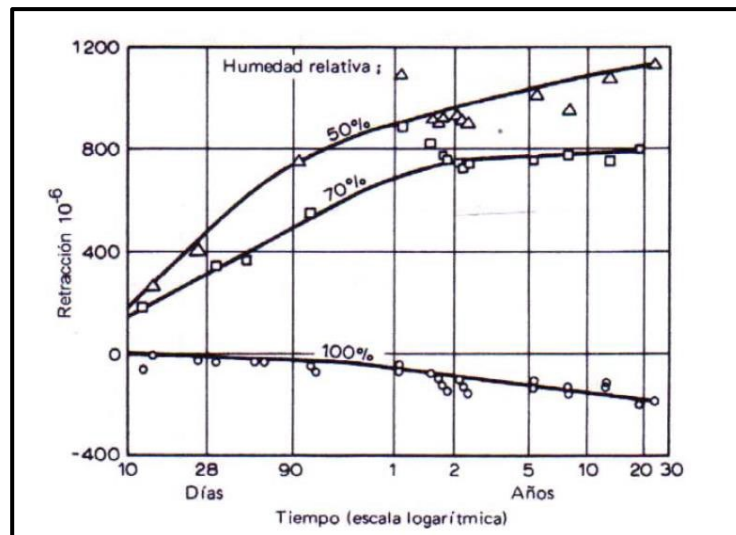


FIGURA 2.8: Relación entre la retracción y el tiempo para hormigones almacenados a diferentes humedades relativas.

Fuente: Neville, 1995.

### 2.9.2.7 Geometría del elemento

A una humedad relativa de almacenamiento constante, tanto el tamaño como la forma de un elemento de hormigón determinan la magnitud de la retracción por secado. Es conveniente expresar los parámetros de tamaño y la forma por una simple expresión como el espesor efectivo o espesor teórico, que es igual al área de la sección dividida por el semi-perímetro en contacto con la atmósfera. Las relaciones entre el espesor teórico ( $h_0$ ) y la retracción por secado se ilustran en la Figura 2.9 donde se observa que en las muestras con un  $h_0$  menor, mayor coeficiente de retracción, ya que es mayor la superficie en contacto con la atmósfera menor.

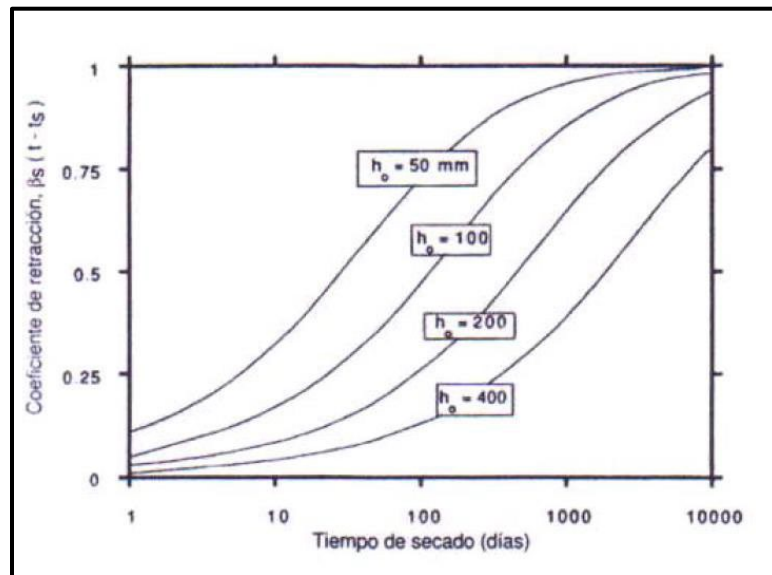


FIGURA 2.9: Influencia del tiempo de exposición y tamaño del espécimen en el coeficiente de la retracción por secado.

Fuente: Mehta, P. Kumar y Monteiro, Paulo J. M. 1998.

Según Neville (1995) el tamaño del elemento influye en el último valor de retracción a obtener, ya que en elementos pequeños la velocidad de desarrollo de la retracción es mayor que en elementos grandes y el efecto de la forma del elemento estructural también influye sobre la retracción, pero su influencia es secundaria.

En este trabajo investigativo, se medirá retracción hidráulica a una edad de 90 días, con ello se logra medir aproximadamente un 91% de la retracción total, dato que se obtiene del estudio de Carlos Videla, Juan P. Covarrubias y Cristian Masana, denominado "Calibración de modelos de predicción de la retracción hidráulica a hormigones fabricados con cementos chilenos" (2001), el cual evalúa y destaca la necesidad de calibrar los modelos de predicción de retracción hidráulica existentes a

condiciones locales. El programa experimental ejecutado incluyó 8 mezclas de hormigón de similar resistencia, fabricadas con cemento Portland y Portland Puzolánico. Los ensayos se realizaron en 72 probetas y la retracción hidráulica fue medida hasta los 448 días de secado, analizándose el efecto del tipo de cemento, asentamiento de cono, tamaño máximo del árido y dimensiones de la probeta.

Los resultados obtenidos de la retracción en los distintos tiempos de secado se pueden observar en la siguiente tabla (Tabla 2.1).

TABLA 2.1: Retracción hidráulica medida a diferentes tiempos de secado (mm/m)

Identificación del hormigón	Probeta (mm)	esh,1	esh,2	esh,5	esh,7	esh,14	esh,28	esh,56	esh,83	esh,112	esh,224	esh,360	esh,448
P-20/6-1	100x100x500	0,0649	0,0837	0,1560	0,1926	0,2659	0,4380	0,6024	0,7054	0,7774	0,8806	0,9179	0,9299
	75x75x285	0,0860	0,1153	0,1720	0,2180	0,3573	0,5373	0,7200	0,7520	0,8147	0,8153	0,8467	0,8747
P-40/6-1	100x100x500	0,0768	0,0938	0,1525	0,1888	0,2514	0,3779	0,5199	0,6150	0,6759	0,7877	0,8226	0,8328
	75x75x285	0,0880	0,1093	0,1613	0,1967	0,2940	0,4280	0,5900	0,6140	0,6780	0,6887	0,7587	0,7840
P-20/12-1	100x100x500	0,0402	0,0583	0,0935	0,1192	0,1837	0,4174	0,5371	0,6362	0,7243	0,8473	0,8723	0,8806
	75x75x285	0,0687	0,0947	0,1947	0,2367	0,3673	0,5615	0,6927	0,7673	0,8547	0,8860	0,9067	0,9253
P-40/12-1	100x100x500	0,0364	0,0375	0,0556	0,0616	0,1435	0,3333	0,4498	0,5534	0,6096	0,7020	0,7404	0,7685
	75x75x285	0,0390	0,0880	0,1270	0,1930	0,2570	0,4420	0,5490	0,6120	0,6770	0,7240	0,7360	0,7800
PP-20/6-1	100x100x500	0,0766	0,1029	0,1252	0,1949	0,3161	0,4681	0,6400	0,7141	0,7877	0,9248	0,9676	0,9670
	75x75x285	0,1407	0,1607	0,2633	0,3147	0,4660	0,5620	0,6973	0,7660	0,8233	0,8933	0,9700	0,9740
PP-20/6-2	100x100x500	0,0362	0,0777	0,1601	0,1897	0,3154	0,5004	0,6382	0,8379	0,8384	0,9536	0,9893	0,9889
	75x75x285	0,1113	0,1187	0,2607	0,3127	0,4913	0,7253	0,8967	0,9620	0,9700	1,0087	1,0340	1,0513
PP-40/6-1	100x100x500	0,0629	0,0902	0,0828	0,1431	0,2618	0,3871	0,4864	0,5362	0,6475	0,7708	0,8005	0,8016
	75x75x285	0,1120	0,1373	0,2627	0,2973	0,4347	0,5200	0,6053	0,6500	0,7000	0,7707	0,7620	0,7907
PP-40/6-2	100x100x500	0,0533	0,0797	0,1592	0,1978	0,3020	0,4911	0,6159	0,8007	0,8145	0,8879	0,9082	0,9118
	75x75x285	0,0800	0,1360	0,2880	0,3320	0,5240	0,6720	0,8160	0,9040	0,8960	0,9360	0,9600	0,9840
PP-20/12-1	100x100x500	0,0688	0,0793	0,1509	0,1793	0,2612	0,5556	0,7194	0,8246	0,9038	1,0147	1,0669	1,0746
	75x75x285	0,0753	0,1207	0,2153	0,2693	0,4453	0,7000	0,8593	0,9333	1,0180	1,0760	1,0840	1,1320
PP-20/12-2	100x100x500	0,0328	0,0596	0,1654	0,2793	0,4554	0,6230	0,8187	0,9333	0,9824	0,9873	1,0078	1,0495
	75x75x285	0,0573	0,0940	0,2207	0,2720	0,4633	0,7080	0,9213	1,0353	1,0647	1,2273	1,2287	1,2307
PP-40/12-1	100x100x500	0,0417	0,0480	0,0795	0,0810	0,1455	0,4072	0,5315	0,6129	0,6830	0,7708	0,7978	0,8141
	75x75x285	0,0567	0,0907	0,1960	0,2493	0,4053	0,6293	0,7553	0,8313	0,9080	0,9400	0,9753	0,9860
PP-40/12-2	100x100x500	0,0301	0,0480	0,1592	0,2431	0,3846	0,5040	0,6462	0,7310	0,7634	0,8243	0,8774	0,8866
	75x75x285	0,0760	0,1080	0,2113	0,2820	0,4420	0,6333	0,8053	0,8900	0,9607	0,9667	1,0073	1,0193

Fuente: Carlos Videla, Juan P. Covarrubias, Cristian Masana "Calibración de modelos de predicción de la retracción hidráulica a hormigones fabricados con cementos chilenos", 2001.

Con los resultados obtenidos de la tabla anterior para las probetas de dimensión de 75x75x285 (mm) (dimensión de las probetas de este trabajo investigativo), se halló el valor de la retracción

medida a los 90 días de secado, para luego comparar con los 448 días de secado de esta investigación, lo que arrojó un valor aproximado del 91% de la retracción total medida.

### 2.9.3 Fisuración causada por retracción hidráulica

Las fisuras de retracción por secado, suelen tener una anchura constante y un trazado limpio sin entrecruzarse ni ramificarse. Comúnmente estas fisuras de retracción son muy estrechas, del orden de 0,05 a 0,1 mm de anchura y es frecuente que no tengan más de 0,02 mm. Tampoco son profundas y suelen penetrar en el hormigón de 4 a 10 mm.

Pueden aparecer a partir de las dos o tres semanas desde el vaciado del hormigón, pero el riesgo de su aparición persiste en condiciones normales hasta un año, retardándose a veces hasta los dos y tres años, en función de las condiciones de sequedad atmosférica.

En este tipo de fisuración juegan un papel importante la rigidez del elemento estructural y sobre todo, la del conjunto estructural que le afecta.

### 2.9.4 Cuantificación de la retracción hidráulica

Con el pasar de los años se han perfeccionado las técnicas para medir la retracción tanto en las de medición directa como indirectas, esto debido a la incorporación de nuevas tecnologías dedicadas al estudio de materiales de construcción fomentado por la necesidad de perfeccionarlos para ampliar su uso bajo distintos tipos de situaciones ambientales y también requerimientos de servicio de la estructura.

#### 2.9.4.1 Método de medición directa

Retracción hidráulica o por secado según norma chilena NCh.2221 Of.2010 "Hormigón y mortero- Método de ensayo- Determinación de cambios de longitud", establece un procedimiento de ensayo que permite determinar los cambios de longitud de morteros y hormigones debido a factores externos distintos a la aplicación de fuerzas y a cambios de temperatura. La medición del cambio de longitud permite determinar la expansión o contracción volumétrica potencial de un mortero u hormigón.

La norma se basa en la confección de probetas prismáticas, cuyas dimensiones varían de acuerdo al tamaño del árido utilizado para la mezcla, es por esto que se consideran tres moldes de probetas distintas de ensayo, las cuales son:

- Para morteros y pastas de cemento la dimensión del molde es: 25 x 25 x 285 milímetros.
- Para hormigones con árido de tamaño máximo nominal (Dn) menor o igual a 50 milímetros: 100 x 100 x 285 milímetros.
- Para hormigones con árido de tamaño máximo absoluto (Da) menor o igual a 25 milímetros se puede usar probetas de 75 x 75 x 285 milímetros.

Cada probeta debe tener una longitud efectiva de  $250 \pm 2,5$  mm. Esta longitud es la distancia entre los extremos internos de los topes de acero inoxidable.

En los extremos de cada probeta deben ir dos insertos empotrados, que tienen la función de fijar la probeta al instrumento de medición, llamado “medidor de longitud”

Las probetas junto con los insertos son colocados en el instrumento de medición, el cual posee un soporte metálico que permite apoyar las probetas, además sostiene un dial micrométrico que permite efectuar lecturas de las variaciones de longitud que experimenta la probeta.

Luego de haber realizado las lecturas, se debe calcular el cambio de longitud de probeta expresada en milímetros por metro (mm/m).

## CAPITULO III: DISEÑO EXPERIMENTAL

### 3.1 Generalidades

Se presenta en este capítulo el diseño experimental que se utilizará para llevar a cabo el experimento, definiendo las variables independientes y dependientes. Con estas variables se obtuvo el factorial del experimento, el que determina la cantidad y tipos de hormigón a confeccionar.

### 3.2 Definición de variables

#### 3.2.1 Variables independientes

Las variables independientes de esta investigación corresponden a:

- a) Cantidad de perlas de poliestireno expandido:

Es una variable numérica, cuyos niveles para esta investigación corresponden a 0, 20 y 40%, para que según revisión bibliográfica, cumplan con la resistencia mínima a la compresión de un hormigón liviano estructural, como reemplazo del árido fino.

- b) Cantidad de PET reciclado:

Es una variable numérica que se utilizará en cantidades de 10% y 20% como reemplazo de la cantidad de perlas de poliestireno expandido.

- c) Tamaño de PET reciclado:

Es una variable categórica, cuyos tamaños utilizados para esta investigación serán dos, uno fino y otro grueso debido a que la planta recicladora RINOPLAST, tiene a disposición esos dos tamaños para la comercialización.

- d) Tiempo:

Es una variable numérica, cuyos niveles para esta investigación irán desde 0 a 90 días de secado.

### 3.2.2 Variables dependientes

Se definen estas variables, como las variables a investigar, que son retracción hidráulica y resistencia a la compresión.

a) Retracción libre

Este ensayo determina variación longitudinal en un tiempo determinado de una probeta prismática de hormigón a una temperatura y humedad relativa controlada; ensayo que se realizará según lo indicado en la NCh. 2221 Of.2010 “Hormigón y morteros – Determinación de cambios de longitud”.

b) Propiedades mecánicas

Para este trabajo investigativo se evaluará en forma complementaria, la resistencia a la compresión según lo indicado en la NCh. 1037 Of.77 “Hormigón- Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”.

### 3.3 Factorial de experimento

Una vez determinadas las variables, se elabora el diseño experimental de la investigación, la cual determina la cantidad de hormigones a fabricar con distintas cantidades de perlas de poliestireno expandido, de PET reciclado y distintos tamaños del mismo.

La tabla 3.1 muestra las variables independientes con las diferentes cantidades y la combinación entre ellas.

TABLA 3.1: Factorial de experimento

	Cantidad PPE	0%						20%						40%								
	Cantidad PET	0%		25%		50%		0%		25%		50%		0%		25%		50%				
	Tamaño PET	--	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F		
TIEMPO (DÍAS)	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	11	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	14	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	21	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	28	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y	X,Y
	35	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	42	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	49	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	56	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	70	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: Elaboración propia

Donde:

X : 3 Repeticiones de ensayo Retracción libre

Y : 3 Repeticiones de ensayo Resistencia a la Compresión

G : PET grueso

F : PET fino

Se elaborarán 12 hormigones distintos más un hormigón patrón, el cual tendrá 0% de cantidad de perlas de poliestireno expandido y 0% de PET reciclado. Para cada hormigón se elaborarán 3 probetas de compresión y 3 para retracción, dando un total de 78 probetas.

## 3.4 Ensayos aplicados a probetas de HL

### 3.4.1 Resistencia a la compresión

Este ensayo se realizará según lo establecido en la norma NCh. 1037 Of. 77 “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas” en probetas cúbicas de 15 cm.

Para llevar a cabo este ensayo se utilizará una prensa universal de las dependencias de la Universidad de Valparaíso, equipo que se muestra en la Figura 3.1.



FIGURA 3.1: Prensa Universal

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.2 Retracción hidráulica

Este ensayo se realizará según lo establecido en la norma NCh. 2221 Of. 2010 “Hormigón y morteros - Determinación de cambios de longitud”, el cual permite cuantificar la deformación unitaria a una edad controlada de una probeta prismática, en este caso, de hormigón. Las mediciones de este ensayo se realizarán a través del aparato medidor que se muestra en la Figura 3.2.



FIGURA 3.2: Equipo medidor de cambios de longitud

Fuente: Elaboración Propia

El equipo medidor consta de una plataforma y un soporte de acero, el cual posee un dial micrométrico donde se realizan las lecturas que determinan los cambios longitudinales de las probetas y una barra de referencia, lo que se aprecia en la Figura 3.2.

### 3.5 Metodología de trabajo

Durante el desarrollo de esta investigación se estudiaron diferentes propiedades del hormigón, tanto en su estado fresco como en la ejecución de cada ensayo.

#### 3.5.1 Retracción libre

Las mediciones del ensayo se efectuaron en los periodos que especifica la norma, hasta el día 90. La tabla 3.2 muestra la planificación de las lecturas realizadas en el hormigón de acuerdo a la edad de éste.

TABLA 3.2: Planificación ensayo de retracción libre

Lectura	Estado del hormigón	Tiempo de lectura (días)	Edad del hormigón (días)
Li curado	Periodo de curado	0	1
Lf curado	Periodo de curado	7	8
L4 secado	Periodo de secado	4	11
L7 secado	Periodo de secado	7	14
L14 secado	Periodo de secado	14	21
L21 secado	Periodo de secado	21	28
L28 secado	Periodo de secado	28	35
L35 secado	Periodo de secado	35	42
L42 secado	Periodo de secado	42	49
L49 secado	Periodo de secado	49	56
L56 secado	Periodo de secado	56	63
L70 secado	Periodo de secado	70	77
L90 secado	Periodo de secado	90	97

Fuente: Elaboración Propia

En el periodo de secado la norma recomienda efectuar cuatro mediciones, sin embargo en esta investigación se medirá en los días 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 70 y 90, con el propósito de determinar de mejor manera la evolución de la retracción hidráulica en el hormigón.

#### a) Procedimiento de medición

La medición inicial se realiza inmediatamente después de desmoldar las probetas, sumergidas en agua saturada con cal, a una temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  por un mínimo de 15 minutos en el caso de probetas de mortero y para un mínimo de 30 minutos para probetas de hormigón, con el fin de minimizar las variaciones por temperatura.

A una edad de  $24 \pm 0,5$  horas después del mezclado del agua con el cemento, proceder a efectuar las siguientes operaciones:

- i) Leer el dial del aparato medidor con la barra patrón y registrar como  $L_p$ .
- ii) Retirar una probeta del baño de inmersión.
- iii) Secar previamente con un paño las piezas de tope de la probeta y colocarla húmeda en el aparato medidor.
- iv) Girar la probeta lentamente en el aparato medidor mientras se lee el dial. Registrar la menor lectura del dial como  $L_0$  si el giro provoca una variación en la lectura.
- v) Expresar la diferencia de la longitud inicial  $L_i$ , con aproximación de 0,0025 mm, como la diferencia entre las medidas  $L_p$  y  $L_0$ .
- vi) Devolver la probeta al baño y repetir las operaciones desde ii) para cada una de las siguientes probetas.

Se debe tener especial cuidado al colocar las probetas en el aparato medidor, ya que siempre deben ser puestas en la misma posición cada vez que se realice una lectura. Además la base en donde se apoya el aparato medidor debe estar nivelada, ya que en caso contrario se pueden producir alteraciones en las lecturas.

Periodo de curado: después de la medida inicial de comparación, almacenar las probetas en agua saturada con cal ( $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ) hasta que hayan alcanzado 28 días incluyendo el periodo enmoldado, a menos que se especifique otro período o condiciones de curado.

#### b) Variación de longitud

El cambio de la longitud de la probeta se calculará a cualquier edad, de la siguiente manera (NCh. 2221 Of. 2010):

$$L = \frac{Lx - Li}{G}$$

Donde:

- $L$  : Cambio de longitud de la probeta a cualquier edad (mm/m).  
 $Lx$  : Diferencia entre las lecturas de la probeta y de la barra patrón a la edad  $x$  (mm).  
 $Li$  : Diferencia inicial entre las lecturas de la barra patrón  $p$   $L$  y de la probeta  $o$   $L$  (mm).  
 $G$  : Longitud efectiva de medida (0,250 m).

La unidad de los datos entregados por el equipo de medición es en pulgadas (in); sin embargo los datos deben ser transformados en milímetros, ya que la norma especifica esta unidad. En el ejemplo de la tabla anterior, la deformación final de la probeta es -0,0831 mm por metro (mm/m).

Si el valor de la deformación unitaria es negativo, indica retracción hidráulica en la probeta; si el valor es positivo, indica una expansión hidráulica (fenómeno que ocurre solo durante el tiempo de curado).

### 3.5.2 Ensayo de compresión

El ensayo se realizó según la norma NCh. 1037 Of.77 a los 28 días de edad.

El procedimiento de medición que se llevó a cabo es el siguiente:

- i) Antes de realizar el ensayo, las probetas cúbicas de compresión fueron sacadas de la piscina de curado.
  
- ii) Posteriormente en una planilla se anotó la fecha de ejecución del ensayo, tipo de hormigón y dimensiones de cada probeta. Todo esto se realizó siguiendo los procedimientos especificados en la norma NCh. 1037 Of.77 “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”. Además se tomó registro del peso de las probetas con el fin de determinar su densidad aparente.
  
- iii) Finalmente las probetas son llevadas a la prensa en donde se ejecutó el ensayo y se registró la carga máxima que soporta cada probeta. Antes de todo se debió verificar que las superficies de contacto de las probetas con la prensa estén lo suficientemente limpias, ya que cualquier resto de hormigón o partícula puede provocar que la carga aplicada no se distribuya uniformemente en la superficie lo que puede generar excentricidad.

## **CAPITULO IV: DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **4.1 Generalidades**

En este capítulo se presenta el trabajo realizado en los laboratorios de hormigón de la Universidad de Valparaíso, lo que consta de granulometría de los áridos para la posterior elaboración de la dosificación del hormigón patrón y de las probetas con la incorporación de perlas de poliestireno expandido y PET reciclado.

Además de lo anterior, se describen los materiales que serán utilizados para la confección de los hormigones livianos estructurales.

### **4.2 Materiales a utilizar**

#### **4.2.1 Cemento**

Para la elaboración de las probetas se utilizará cemento portland Puzolánico marca Melón grado corriente, el cual cumple con los requerimientos de la norma NCh. 148 Of. 98 “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales”

#### **4.2.2 Agua**

Se utilizará agua potable para la elaboración de las probetas, la cual cumple con los requerimientos de la norma NCh. 1498 Of.82 “Hormigón – Agua de amasado – Requisitos”.

#### **4.2.3 Áridos**

Se utilizaron áridos chancados provenientes de una planta de áridos de la región de Valparaíso. La caracterización y granulometría de estos se realizaron según la norma NCh. 163 Of. 79 “Áridos para morteros y hormigón – Requisitos generales”.

#### 4.2.4 PET reciclado

El PET reciclado que se utilizará para la elaboración de probetas proviene de la planta recicladora RINOPLAST ubicada en la región de Valparaíso, el cual posee forma similar a escamas con dos tamaños; uno grueso (12 mm) y otro fino (5 mm) (Figura 4.1).



FIGURA 4.1: PET reciclado

Fuente: Elaboración Propia

### 4.2.5 Perlas de poliestireno expandido

Se utilizarán perlas de poliestireno expandido marca Isopack (Figura 4.2) adquiridas en el comercio de la región, con un tamaño entre 0,2 y 0,3 mm.



FIGURA 4.2: Perlas de poliestireno expandido

Fuente: Elaboración Propia

## 4.3 Propiedades de los áridos

Para la elaboración de probetas se utilizará arena y gravilla, las cuales presentan características que se describen a continuación.

### 4.3.1 Densidad gravilla

La obtención de la densidad aparente de la gravilla se hizo a través de la norma NCh. 1116 Of. 77 “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente” y para las densidades real y neta se acudió a la norma NCh. 1117 Of. 77 “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las gravas”.

## a) Densidad Aparente

## i) Densidad Aparente Suelta

A continuación en la Tabla 4.1 se presenta la densidad aparente suelta obtenida de tres muestras de gravilla.

TABLA 4.1: Densidad aparente suelta gravilla

Muestras	1	2	3
Peso recipiente (gr)	3.685	3.685	3.685
Peso gravilla (gr)	7.643	7.285	7.419
Peso recipiente más gravilla (gr)	11.328	10.970	11.104
Volumen recipiente (cc)	5.033	5.033	5.033
$\rho_{as}$ (gr/cc)	1,52	1,45	1,47
$\rho_{as}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.519	1.447	1.474
Promedio $\rho_{as}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.480		

Fuente: Elaboración Propia

## ii) Densidad Aparente Compactada

La tabla 4.2 presenta la densidad aparente compactada obtenida de tres muestras de gravilla.

TABLA 4.2: Densidad aparente compactada gravilla

Muestras	1	2	3
Peso recipiente (gr)	3.685	3.685	3.685
Peso gravilla (gr)	8.178	7.997	8.035
Peso recipiente más gravilla (gr)	11.863	11.682	11.720
Volumen recipiente (cc)	5.033	5.033	5.033
$\rho_{ac}$ (gr/cc)	1,62	1,59	1,60
$\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.625	1.589	1.596
Promedio $\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.603		

Fuente: Elaboración Propia

## b) Densidad real, neta y absorción

iii) Densidad real del árido saturado superficialmente seco ( $\rho_{RT}$ )iv) Densidad real del árido seco ( $\rho_{RS}$ )

- v) Densidad neta ( $\rho_N$ )
- vi) Absorción ( $\alpha$ )

La tabla 4.3 muestra las densidades y absorción de la gravilla mencionadas anteriormente.

TABLA 4.3: Densidades y absorción gravilla

Muestras	1	2	3
A (gr)	525,6	512,7	461,3
B (gr)	845,3	817,8	764,7
C (gr)	833,4	805,6	756,4
$\rho_{RT}$ (gr/cc)	2,606	2,640	2,493
$\rho_{RT}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2.606	2.640	2.493
Promedio $\rho_{RT}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2.580		
$\alpha$ (%)	1,3		

Fuente: Elaboración Propia

Donde:

A : Peso sumergido gravilla

B : Peso saturado superficialmente seco gravilla

C : Peso seco gravilla

### 4.3.2 Densidad arena

La densidad aparente de la arena se llevó a cabo mediante la norma NCh. 1116 Of.77 “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente” y para la densidad real y neta se acudió a la NCh. 1239 Of.77 “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta de las arenas”.

#### a) Densidad Aparente

##### i) Densidad Aparente Suelta

La tabla 4.4 muestra la densidad aparente suelta de tres muestras de arena.

TABLA 4.4: Densidad aparente suelta arena

Muestras	1	2	3
Peso recipiente (gr)	1.320	1.320	1.320
Peso arena (gr)	1.617	1.650	1.638
Peso recipiente más arena (gr)	2.937	2.970	2.958
Volumen recipiente (cc)	1.040	1.040	1.040
$\rho_{as}$ (gr/cc)	1,55	1,59	1,58
$\rho_{as}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.555	1.587	1.575
Promedio $\rho_{as}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.572		

Fuente: Elaboración Propia

##### ii) Densidad Aparente Compactada

La tabla 4.5 muestra la densidad aparente compactada de tres muestras de arena.

TABLA 4.5: Densidad aparente compactada arena

Muestras	1	2	3
Peso recipiente (gr)	1.320	1.320	1.320
Peso arena (gr)	1.855	1.790	1.823
Peso recipiente más arena (gr)	3.175	3.110	3.143
Volumen recipiente (cc)	1.040	1.040	1.040
$\rho_{ac}$ (gr/cc)	1,78	1,72	1,75
$\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.784	1.721	1.753
Promedio $\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.753		

Fuente: Elaboración Propia

## b) Densidad real, neta y absorción

- i) Densidad real del árido saturado superficialmente seco ( $\rho_{RSSS}$ )
- ii) Densidad real del árido seco ( $\rho_{RS}$ )
- iii) Densidad neta ( $\rho_N$ )
- iv) Absorción ( $\alpha$ )

La tabla 4.6 muestra las densidades y absorción de la arena mencionadas anteriormente.

TABLA 4.6: Densidades y absorción arena

Muestras	1	2	3
Ma	657,5	658,8	658,2
Mm	720,7	720,2	720,5
Msss	100,0	100,0	100,0
Ms	99,1	98,4	98,7
Promedio $\rho_{RSSS}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2.653,3		
Promedio $\rho_{RS}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2.620,0		
Promedio $\rho_N$ (kg/m <sup>3</sup> )	2.710,5		
$\alpha$ (%)	1,3		

Fuente: Elaboración Propia

Donde:

Ma : Masa del matraz más agua

Mm : Ma más arena

Msss : Masa saturada superficialmente seca

Ms : Masa seca

### 4.3.3 Densidad PET

La obtención de la densidad aparente del PET fino reciclado se hizo a través de la norma NCh. 1116 Of.77 "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente".

- i) La tabla 4.7 muestra la densidad aparente suelta de tres muestras de PET.

TABLA 4.7: Densidad aparente suelta PET.

Muestras	1	2	3
Peso recipiente (gr)	3.685	3.685	3.685
Peso PET (gr)	1,678	1,652	1,607
Peso recipiente más PET (gr)	3.687	3.687	3.687
Volumen recipiente (cc)	5.033	5.033	5.033
$\rho_{ac}$ (gr/cc)	0,00033	0,00033	0,00032
$\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,333	0,328	0,319
Promedio $\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,33		

Fuente: Elaboración Propia

- ii) La tabla 4.8 muestra la densidad aparente suelta de tres muestras de PET.

TABLA 4.8: Densidad aparente compactada PET.

Muestras	1	2	3
Peso recipiente (gr)	3.685	3.685	3.685
Peso PET (gr)	2,013	2,028	2,008
Peso recipiente más PET (gr)	3.687	3.687	3.687
Volumen recipiente (cc)	5.033	5.033	5.033
$\rho_{ac}$ (gr/cc)	0,00040	0,00040	0,00040
$\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,400	0,403	0,399
Promedio $\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,4		

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.3.4 Densidad Perlas de poliestireno expandido

La obtención de la densidad aparente de las perlas de poliestireno expandido se hizo a través de la norma NCh. 1116 Of.77 "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente".

La tabla 4.9 muestra la densidad aparente suelta de tres muestras de PPE.

TABLA 4.9: Densidad aparente suelta PPE.

Muestras	1	2	3
Peso recipiente (gr)	3.685	3.685	3.685
Peso PPE (gr)	0,05035	0,05039	0,05029
Peso recipiente más PPE (gr)	3.685	3.685	3.685
Volumen recipiente (cc)	5.033	5.033	5.033
$\rho_{ac}$ (gr/cc)	0,00001	0,00001	0,00001
$\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,010	0,010	0,010
Promedio $\rho_{ac}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,01		

Fuente: Elaboración Propia.

### 4.3.5 Granulometrías

La Tabla 4.10 muestra la granulometría del árido combinado obtenida en laboratorio.

TABLA 4.10: Árido Combinado

Prop. en	Grueso	Fino	Mezcla Banda Granulométrica				Mezcla
PESO							tanteo
supuesta	% pasa	% pasa	% que pasa				% pasa peso
Tamiz (mm)							
150							
75	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	100	100	100
19	100	100	100	100	100	100	100
12,5	46	100	59	66	74	81	69
9,5	28	100	45	55	65	75	58
4,75	2	91	30	35	42	48	39
2,36	0	69	23	28	35	42	29
1,18	0	56	16	21	28	34	24
0,6	0	46	9	14	21	27	19
0,3	0	28	2	3	5	12	12
0,15	0	9	0	0	0	2	4
TANTEO	0,58	0,42					

Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4.3 grafica las bandas granulométricas recomendadas por la NCh. 163 Of.2013 para árido combinado y la granulometría para la dosificación de hormigones.

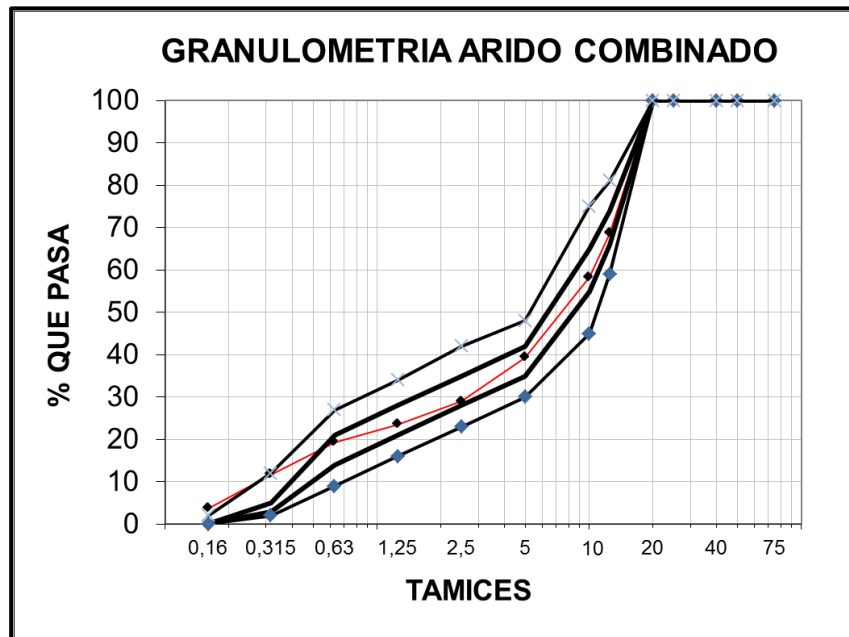


FIGURA 4.3: Granulometría

Fuente: Elaboración Propia

Para determinar la proporción de los áridos, se utilizó la curva granulométrica anterior, la que determinó una proporción de 42% arena y 58% de gravilla.

## 4.4 Dosificación de hormigones

### 4.4.1 Consideraciones

Para la dosificación se utilizó la norma NCh 170. Of.85 "Hormigón – Requisitos generales", para la cual se utilizaron los siguientes valores:

Para un hormigón H30-90-20-8, con:

- Tamaño máximo: 20 mm
- Tipo de cemento: corriente
- Árido grueso: 58%
- Árido Fino: 42%
- $\rho_{RSSS}$  arena :2.563 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_{RSSS}$  gravilla :2.580(kg/m<sup>3</sup>)

#### 4.4.2 Dosificación hormigón patrón

Con las consideraciones anteriormente mencionadas se confeccionó la dosificación por metro cúbico del hormigón patrón. La Tabla 4.11 muestra la dosificación del hormigón patrón.

TABLA 4.11: Dosificación hormigón patrón

HORMIGÓN PATRÓN		
Materiales	Kg/m <sup>3</sup>	Lt/m <sup>3</sup>
Cemento	453	377,5
Agua	195	195
Gravilla	960	600
Arena	695	396
PPE	0	0
PET	0	0
Densidad Teórica	2303	

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4.3 Dosificación hormigón con adición de PET y perlas de poliestireno expandido

Las Tablas 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 muestran las dosificaciones de los diferentes hormigones que se confeccionarán, con los respectivos porcentajes de perlas de poliestireno expandido y PET reciclado.

TABLA 4.12: Dosificación hormigón con 20% PPE y 0%,25% y 50% PET Grueso.

Materiales	Hormigón con 20% de Perlas de poliestireno expandido					
	0% PET grueso		25% PET grueso		50% PET grueso	
	Kg/m <sup>3</sup>	Lt/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Lt/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Lt/m <sup>3</sup>
Cemento	453	377,5	453	377,5	453	377,5
Agua	195	195	195	195	195	195
Gravilla	960	600	960	600	960	600
Arena	555,4	316,8	555,4	316,8	555,4	316,8
PPE	0,8	79,2	0,6	59,4	0,4	39,6
PET	0,0	0	7,9	19,8	15,8	39,6
Densidad Teórica	2164		2172		2180	

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.13: Dosificación hormigón con 20% PPE y 0%,25% y 50% PET Fino

Materiales	Hormigón con 20% de Perlas de Poliestireno expandido					
	0% PET fino		25% PET fino		50% PET fino	
	Kg/m3	Lt/m3	Kg/m3	Lt/m3	Kg/m3	Lt/m3
Cemento	453	377,5	453	377,5	453	377,5
Agua	195	195	195	195	195	195
Gravilla	960	600	960	600	960	600
Arena	555,4	316,8	555,4	316,8	555,4	316,8
PPE	0,8	79,2	0,6	59,4	0,4	39,6
PET	0,0	0	7,9	19,8	15,8	39,6
Densidad Teórica	2164		2172		2180	

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.14: Dosificación hormigón con 40% PPE y 0%,25% y 50% PET Grueso

Materiales	Hormigón con 40% de Perlas de Poliestireno expandido					
	0% PET grueso		25% PET grueso		50% PET grueso	
	Kg/m3	Lt/m3	Kg/m3	Lt/m3	Kg/m3	Lt/m3
Cemento	453	377,5	453	377,5	453	377,5
Agua	195	195	195	195	195	195
Gravilla	960	600	960	600	960	600
Arena	416,5	237,6	416,5	237,6	416,5	237,6
PPE	1,6	158,4	1,2	118,8	0,8	79,2
PET	0,0	0	15,8	39,6	31,7	79,2
Densidad Teórica	2026		2042		2057	

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.15: Dosificación hormigón con 40% PPE y 0%,25% y 50% PET Fino

Materiales	Hormigón con 40% de Perlas de Poliestireno expandido					
	0% PET fino		25% PET fino		50% PET fino	
	Kg/m3	Lt/m3	Kg/m3	Lt/m3	Kg/m3	Lt/m3
Cemento	453	377,5	453	377,5	453	377,5
Agua	195	195	195	195	195	195
Gravilla	960	600	960	600	960	600
Arena	416,5	237,6	416,5	237,6	416,5	237,6
PPE	1,6	158,4	1,2	118,8	0,8	79,2
PET	0,0	0	15,8	39,6	31,7	79,2
Densidad Teórica	2026		2042		2057	

Fuente: Elaboración Propia

Donde PET: Polietileno Tereftalato

PPE: Perlas Poliestireno expandido.

#### **4.5 Elaboración de hormigones y confección de probetas**

La elaboración de todos los hormigones se realizó siguiendo indicaciones de la norma NCh. 1018 Of.77 "Hormigón – Preparación de mezclas de prueba en laboratorio".

Cada hormigón fue fabricado en una betonera de eje vertical de acuerdo a la dosificación obtenida y bajo el mismo procedimiento. En este último se tuvo mayor consideración en los siguientes puntos:

- a) Cada vez que se elaboró un hormigón se realizó la correspondiente corrección por humedad y absorción de los áridos para la dosificación previo a la elaboración.
- b) Al momento de elaborar el hormigón, primero se mezcló la arena, el cemento y la gravilla hasta obtener una masa homogénea. Luego se agregó el agua junto al PET reciclado y las perlas de poliestireno expandido y se revolvió la mezcla de hormigón durante 3 minutos, dejando reposar otros 3, para seguir revolviendo por 2 minutos más.
- c) Una vez confeccionado el hormigón se determinó la docilidad de él según el método del asentamiento de cono de Abrams conforme a la norma NCh. 1019 Of.74. Este ensayo mide la consistencia del hormigón por medio de una pérdida de altura de la masa de hormigón fresco al ser desmoldado. La medición del cono se realizó después de la confección de cada tratamiento con una aproximación de 0,5 (cm). En la figura 4.4 se aprecia una medición de este ensayo.



FIGURA 4.4: Método de asentamiento de cono de Abrams para la determinación de la docilidad.

Fuente: Elaboración Propia

- d) Finalizado el ensayo de docilidad, se colocó el hormigón en los diferentes moldes.

#### 4.5.1 Retracción libre

Inmediatamente de fabricado el hormigón, y una vez realizados los ensayos en su estado fresco, se confeccionaron las probetas prismáticas para la ejecución del ensayo de retracción libre en donde se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

- a) Primero, el hormigón es colocado en dos capas iguales en los moldes prismáticos. Luego se compactó en hormigón con una varilla pisón o por vibrado externo, dependiendo de la docilidad que haya tenido el hormigón.
- b) Cada capa se compactó hasta que aflorara la lechada en las esquinas, lugar en donde la compactación es más difícil.

- c) Compactada la capa superior se retiró el exceso de hormigón y con una llana se dio una terminación lisa en la superficie. Luego se cubrió el hormigón con una arpillera húmeda para evitar la pérdida de agua durante las primeras horas.
- d) Después de  $23 \pm 0,5$  horas de fabricado el hormigón se desmoldaron las probetas. En este procedimiento de tuvo especial cuidado de no golpear los insertos ni ejercer presión directamente sobre ellos para no aflojarlos.
- e) Desmoldadas las probetas, estas fueron curadas en un recipiente con agua saturada con cal por un periodo de 7 días.
- f) Terminado el periodo de curado, las probetas fueron almacenadas en una cámara de secado durante un periodo de 90 días. En esta cámara la temperatura debía estar a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y a una humedad relativa de  $54 \pm 4\%$  (Figura 4.5)



FIGURA 4.5: Equipo digital, cámara de secado

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.5.2. Resistencia a compresión

A continuación se presenta el procedimiento llevado a cabo en la confección de probetas cúbicas para el ensayo de compresión:

- a) Una vez elaborado el hormigón, éste se depositó en 3 moldes cúbicos de 15 (cm).
- b) Posteriormente el hormigón se compactó utilizando la varilla pisón o el vibrador por inmersión, dependiendo del asentamiento de cono que haya tenido. Se compactó el hormigón hasta que afloró la lechada.
- c) Luego, las probetas cúbicas se desmoldaron 20 horas después de fabricado el hormigón y fueron curadas por inmersión en agua saturada con cal (Figura 4.6) hasta la ejecución del ensayo.



FIGURA 4.6: Curado por inmersión en agua con cal.

Fuente: Elaboración Propia

## CAPITULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Generalidades

En este capítulo se presentan y analizan los resultados que se han obtenido en los distintos ensayos realizados, siguiendo la metodología presentada en el capítulo anterior. La secuencia de la metodología de análisis comienza con la fabricación de hormigones hasta la ejecución del ensayo destructivo, correspondiente al ensayo de resistencia a la compresión.

En la Tabla 5.1 se muestra la nomenclatura de los distintos hormigones que se estudian, con el objeto de simplificar las lecturas, en donde se describe la cantidad de PET y perlitas de poliestireno expandido para cada hormigón.

TABLA 5.1: Nomenclatura hormigones

Hormigón	% PPE	% PET	Descripción
HP	0	0	Hormigón patrón con 0% de PPE y 0% de PET
H-20-0-G	20	0	Hormigón con 20% de sustitución de volumen de arena por PPE y 0% de sustitución de volumen de PPE por PET grueso
H-20-25-G	20	25	Hormigón con 20% de sustitución de volumen de arena por PPE y 25% de sustitución de volumen de PPE por PET grueso
H-20-50-G	20	50	Hormigón con 20% de sustitución de volumen de arena por PPE y 50% de sustitución de volumen de PPE por PET grueso
H-40-0-G	40	0	Hormigón con 40% de sustitución de volumen de arena por PPE y 0% de sustitución de volumen de PPE por PET grueso
H-40-25-G	40	25	Hormigón con 40% de sustitución de volumen de arena por PPE y 25% de sustitución de volumen de PPE por PET grueso
H-40-50-G	40	50	Hormigón con 40% de sustitución de volumen de arena por PPE y 50% de sustitución de volumen de PPE por PET grueso
H-20-0-F	20	0	Hormigón con 20% de sustitución de volumen de arena por PPE y 0% de sustitución de volumen de PPE por PET fino
H-20-25-F	20	25	Hormigón con 20% de sustitución de volumen de arena por PPE y 25% de sustitución de volumen de PPE por PET fino
H-20-50-F	20	50	Hormigón con 20% de sustitución de volumen de arena por PPE y 50% de sustitución de volumen de PPE por PET fino
H-40-0-F	40	0	Hormigón con 40% de sustitución de volumen de arena por PPE y 0% de sustitución de volumen de PPE por PET fino
H-40-25-F	40	25	Hormigón con 40% de sustitución de volumen de arena por PPE y 25% de sustitución de volumen de PPE por PET fino
H-40-50-F	40	50	Hormigón con 40% de sustitución de volumen de arena por PPE y 50% de sustitución de volumen de PPE por PET fino

Fuente: Elaboración Propia

### 5.2 Hormigón en estado fresco

#### 5.2.1 Docilidad del hormigón

Luego de la fabricación de cada hormigón se tomó un registro de la docilidad de ellos como se muestra en la Tabla 5.2, con sus respectivos asentamientos de cono.

TABLA 5.2: Asentamiento de cono

Hormigón	% PPE	% PET	Asentamiento cono (cm)
H-20-0-G	20	0	4,5
H-20-25-G	20	25	2,5
H-20-50-G	20	50	2,0
H-40-0-G	40	0	3,0
H-40-25-G	40	25	2,0
H-40-50-G	40	50	1,5
H-20-0-F	20	0	4,5
H-20-25-F	20	25	2,5
H-20-50-F	20	50	2,0
H-40-0-F	40	0	3,0
H-40-25-F	40	25	2,0
H-40-50-F	40	50	1,5

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla anterior se puede apreciar que el asentamiento de cono de los hormigones varía al aumentar el contenido de PPE y PET en ellos, lo que se puede observar de mejor manera en la Figura 5.1.

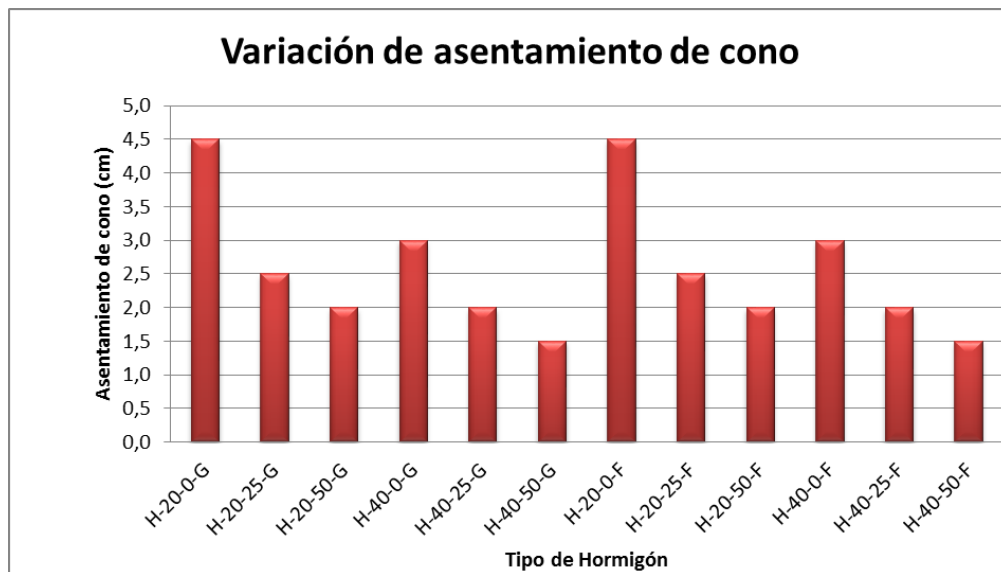


FIGURA 5.1: Asentamiento de cono en hormigones

Fuente: Elaboración Propia

En el hormigón patrón se presenta el mayor asentamiento de cono con un valor de 5,0 cm., el cual disminuye a medida que se incrementa la cantidad de PPE y PET. Cuando el hormigón tiene el

máximo contenido de PPE (40% de sustitución de arena) y nada de PET, se observa un leve aumento en el asentamiento de cono con un valor de 3,0 cm.

Sólo para hormigones livianos, a medida que aumenta el contenido de perlas de poliestireno expandido, disminuye la docilidad.

Sólo para hormigones livianos con PET tanto fino como grueso, a medida que aumenta la cantidad de PET, disminuye la docilidad.

A medida que va disminuyendo el asentamiento de cono, hace a los hormigones menos trabajables y esto puede deberse a que las mezclas de hormigón poseen menos árido fino, ya que al haber menor cantidad en peso de arena en la mezcla, afecta directamente a la Trabajabilidad de esta.

La tabla 5.3 presenta la disminución del asentamiento de cono en % con respecto al 100% alcanzado por el hormigón patrón.

TABLA 5.3: Variación asentamiento en hormigones

Hormigón	% PPE	% PET	Asentamiento cono (cm)	Variación % Asentamiento
H-20-0-G	20	0	4,5	10,0
H-20-25-G	20	25	2,5	50,0
H-20-50-G	20	50	2,0	60,0
H-40-0-G	40	0	3,0	40,0
H-40-25-G	40	25	2,0	60,0
H-40-50-G	40	50	1,5	70,0
H-20-0-F	20	0	4,5	10,0
H-20-25-F	20	25	2,5	50,0
H-20-50-F	20	50	2,0	60,0
H-40-0-F	40	0	3,0	40,0
H-40-25-F	40	25	2,0	60,0
H-40-50-F	40	50	1,5	70,0

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la tabla anterior, la mayor variación que sufre el asentamiento de cono es en el hormigón con más sustitución de arena por PPE y PET, es decir, en el hormigón con menor cantidad de arena.

### 5.3 Ensayo de retracción libre

Los resultados obtenidos del ensayo de retracción libre corresponden a la variación longitudinal de las probetas prismáticas en condiciones establecidas en la norma NCh 2221. La variación longitudinal corresponde a la deformación unitaria, es decir, la expansión o retracción hidráulica que se produce por la absorción o pérdida de agua respectivamente en las probetas de hormigón.

La figura 5.2 muestra el aparato de medición con el cual se obtuvieron las lecturas de los cambios de longitud de las probetas de los diferentes tipos de hormigón.

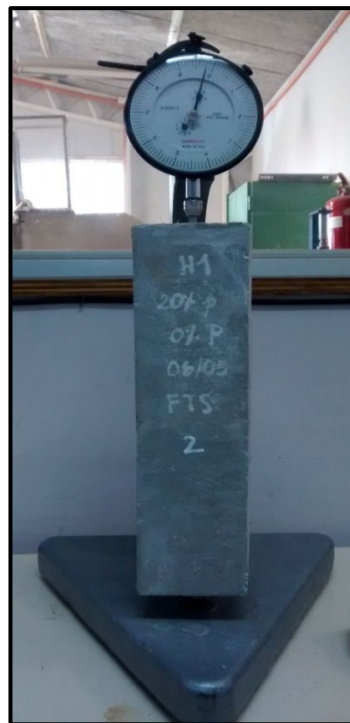


FIGURA 5.2: Medición de probeta de hormigón H1

Fuente: Elaboración Propia

Durante los primeros 7 días de vida del hormigón, se curaron las probetas para medir la expansión hidráulica causada por la sumersión de estas en agua y luego se introdujeron a la cámara de secado durante los siguientes días de vida del hormigón, para medir la retracción hidráulica.

### 5.3.1 Retracción hidráulica

En esta parte del capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos del ensayo de retracción libre.

En las Tablas 5.4.1 y 5.4.2 se muestra la expansión y retracción hidráulica promedio que experimentan los hormigones durante los periodos de curado y secado.

TABLA 5.4: Expansión y Retracción Hidráulica de los hormigones hasta día 35

Edad hormigón (días)	Expansión hidráulica (mm/m)		Retracción hidráulica (mm/m)				
	0	7	11	14	21	28	35
Hormigón							
H-20-0-G	0,0000	0,0064	-0,0032	-0,0077	-0,0389	-0,0415	-0,0447
H-20-25-G	0,0000	0,0017	-0,0041	-0,0081	-0,0112	-0,0129	-0,0145
H-20-50-G	0,0000	0,0160	0,0104	0,0016	-0,0174	-0,0206	-0,0232
H-40-0-G	0,0000	0,0071	0,0051	-0,0025	-0,0076	-0,0112	-0,0181
H-40-25-G	0,0000	0,0204	-0,0031	-0,0076	-0,0123	-0,0164	-0,0189
H-40-50-G	0,0000	0,0188	0,0053	0,0029	-0,0016	-0,0065	-0,0092
H-20-0-F	0,0000	0,0056	-0,0019	-0,0121	-0,0177	-0,0312	-0,0361
H-20-25-F	0,0000	0,0063	0,0027	-0,0007	-0,0065	-0,0147	-0,0169
H-20-50-F	0,0000	0,0118	-0,0040	-0,0072	-0,0118	-0,0166	-0,0278
H-40-0-F	0,0000	0,0187	-0,0257	-0,0332	-0,0389	-0,0432	-0,0482
H-40-25-F	0,0000	0,0072	-0,0066	-0,0124	-0,0204	-0,0242	-0,0284
H-40-50-F	0,0000	0,0049	0,0009	-0,0027	-0,0077	-0,0093	-0,0120

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 5.5: Expansión y Retracción Hidráulica de los hormigones hasta día 90

Edad hormigón (días)	Expansión hidráulica (mm/m)		Retracción hidráulica (mm/m)				
	0	7	42	49	56	70	90
Hormigón							
H-20-0-G	0,0000	0,0064	-0,0533	-0,0588	-0,0636	-0,0687	-0,0747
H-20-25-G	0,0000	0,0017	-0,0160	-0,0180	-0,0223	-0,0362	-0,0386
H-20-50-G	0,0000	0,0160	-0,0250	-0,0282	-0,0370	-0,0410	-0,0440
H-40-0-G	0,0000	0,0071	-0,0209	-0,0253	-0,0295	-0,0321	-0,0344
H-40-25-G	0,0000	0,0204	-0,0205	-0,0311	-0,0352	-0,0349	-0,0375
H-40-50-G	0,0000	0,0188	-0,0123	-0,0341	-0,0402	-0,0407	-0,0437
H-20-0-F	0,0000	0,0056	-0,0427	-0,0516	-0,0549	-0,0581	-0,0599
H-20-25-F	0,0000	0,0063	-0,0213	-0,0271	-0,0312	-0,0341	-0,0364
H-20-50-F	0,0000	0,0118	-0,0323	-0,0387	-0,0408	-0,0440	-0,0468
H-40-0-F	0,0000	0,0187	-0,0514	-0,0565	-0,0601	-0,0645	-0,0669
H-40-25-F	0,0000	0,0072	-0,0394	-0,0435	-0,0520	-0,0558	-0,0584
H-40-50-F	0,0000	0,0049	-0,0201	-0,0294	-0,0416	-0,0448	-0,0480

Fuente: Elaboración Propia

En las tablas anteriores se puede observar que los primeros 7 días de edad, los hormigones presentan expansión hidráulica, debido a que durante este periodo las probetas fueron sumergidas

en agua para su curado, es por eso que los números son positivos. Los días posteriores, en el periodo de secado, las probetas comienzan a presentar retracción hidráulica.

En las figuras 5.3 y 5.4 se muestra el desarrollo de la expansión hidráulica durante el tiempo de curado y la retracción hidráulica en el periodo de secado de los hormigones con PET grueso y PET fino.

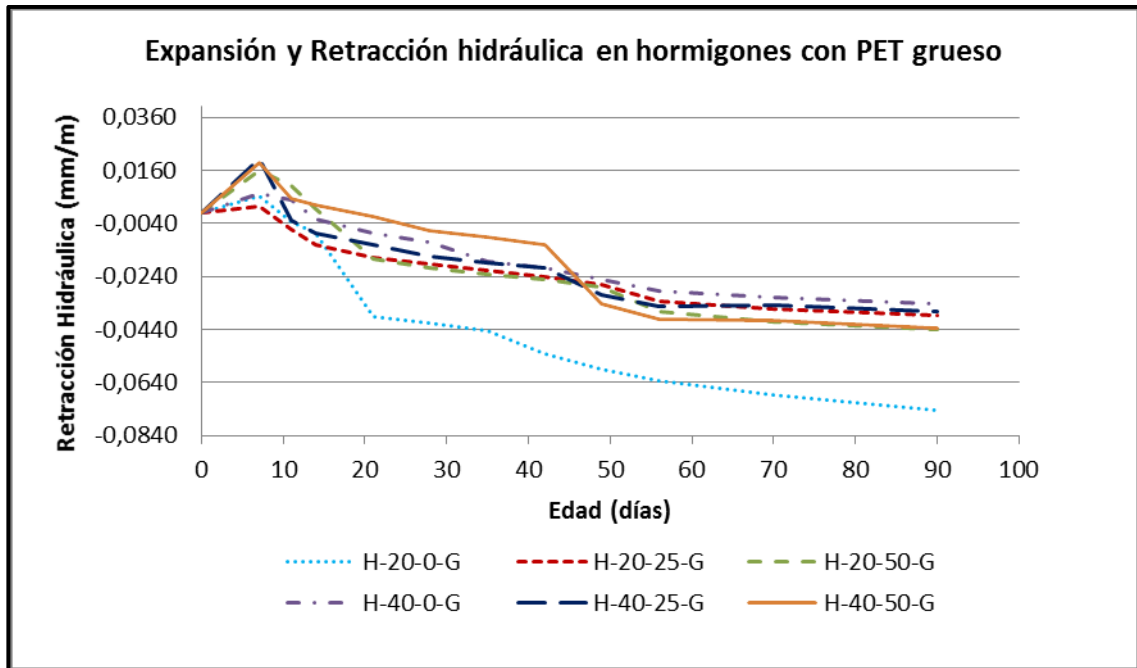


FIGURA 5.3: Expansión y Retracción hidráulica en hormigones con PET grueso

Fuente: Elaboración Propia

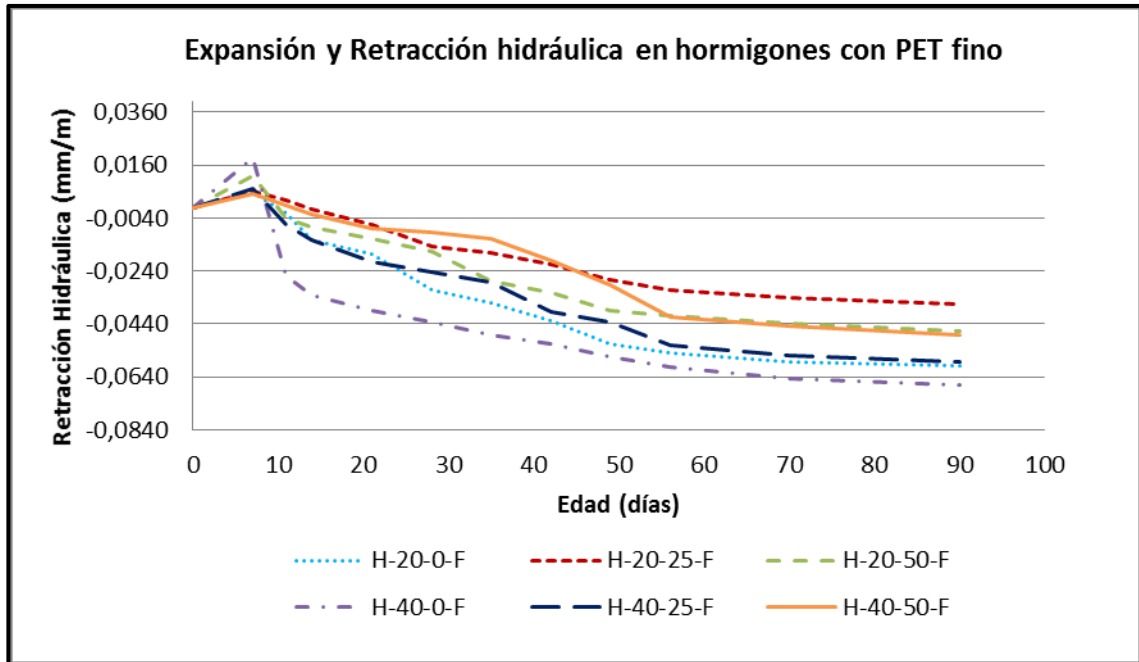


FIGURA 5.4: Expansión y Retracción hidráulica en hormigones con PET fino

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que todos los hormigones presentan un comportamiento normal, debido a que en el primer periodo de tiempo todos los hormigones presentan expansión hidráulica en los días de curado y retracción hidráulica en los días de secado.

En ambos gráficos se puede observar que la retracción hidráulica aumenta en el tiempo para todos los hormigones, sin grandes diferencias entre los hormigones con PET grueso y PET fino.

En el caso de los hormigones con PET grueso, los hormigones H-40-50-G y H-40-25-G presentan la mayor expansión hidráulica, mientras que los hormigones H-20-0-G y H-20-50-G presentan la mayor retracción hidráulica.

En el caso de los hormigones con PET fino, los hormigones H-40-0-F y H-20-50-F presentan la mayor expansión hidráulica, mientras que los hormigones H-40-0-F y H-20-0-F presentan la mayor retracción hidráulica.

## **5.4 Análisis estadístico de resultados de retracción hidráulica**

Los resultados obtenidos en el ensayo de retracción libre se analizaron estadísticamente con el programa "DesignExpert 9.0", el cual es un software que permite determinar el diseño factorial y ayuda en la interpretación de datos obtenidos en un experimento. Mediante el análisis de varianza ANOVA se estimó los efectos que producen los distintos porcentajes de PET y PPE, así como también los distintos tamaños de PET incorporados sobre la variable de respuesta, que es la retracción hidráulica.

Este análisis estadístico sirve para determinar si las diferencias que existen entre las medias de 3 o más grupos, son estadísticamente significativas.

El ANOVA es una técnica en la que la varianza total de un conjunto de datos se divide en componentes asociados a una fuente específica de variación estimando la magnitud con la que contribuye cada una de esas fuentes a la variación total. Consiste esencialmente en descomponer la varianza total de un conjunto de observaciones de una variable  $X$  en varianzas parciales, correspondiente a fuentes de variaciones distintas y determinadas, las que luego se comparan entre sí por medio de una prueba estadística llamada  $F$  de Fisher.

Para la utilización del software en este estudio, se requiere de todos los datos obtenidos en el ensayo de retracción libre, es decir, todos los resultados de cada probeta gemela por tipo de hormigón, como se muestra en la Tabla 5.6 y 5.7.

TABLA 5.6: Tabla general de retracción en software DesignExpert para hormigones con 20% de PPE

Factor 1	Factor 2	Response 1	Response 2	Response 3	Response 4	Response 5	Response 6	Response 7	Response 8	Response 9	Response 10
a: Cantidad PET %	B: Tamaño PET s/u	RETRACCION 11 mm/m	RETRACCION 14 mm/m	RETRACCION 21 mm/m	RETRACCION 28 mm/m	RETRACCION 35 mm/m	RETRACCION 42 mm/m	RETRACCION 49 mm/m	RETRACCION 56 mm/m	RETRACCION 70 mm/m	RETRACCION 90 mm/m
0	G	-0,0176	-0,026	-0,0276	-0,03	-0,0336	-0,042	-0,0444	-0,046	-0,0484	-0,0496
0	G	0,0008	-0,002	-0,048	-0,0504	-0,0536	-0,0624	-0,0752	-0,0856	-0,0964	-0,1108
0	G	0,0072	0,0048	-0,0412	-0,044	-0,0468	-0,0556	-0,0568	-0,0592	-0,0612	-0,0636
25	G	-0,002	-0,0068	-0,0136	-0,016	-0,0176	-0,0196	-0,0228	-0,0328	-0,036	-0,0384
25	G	-0,0104	-0,0176	-0,02	-0,0228	-0,026	-0,0284	-0,0312	-0,034	-0,0364	-0,0388
25	G	-0,0308	-0,0348	-0,0397	-0,0421	-0,0458	-0,0479	-0,0501	-0,0543	-0,0571	-0,0598
50	G	-0,0068	-0,012	-0,0224	-0,0276	-0,03	-0,0316	-0,0352	-0,0436	-0,0484	-0,0512
50	G	0,0276	0,0152	-0,0124	-0,0136	-0,0164	-0,0184	-0,0212	-0,0304	-0,0336	-0,0368
50	G	-0,0013	-0,0113	-0,0321	-0,0386	-0,0405	-0,0412	-0,0434	-0,0478	-0,0499	-0,0538
0	F	0,0036	-0,0008	-0,0064	-0,0192	-0,0228	-0,0256	-0,028	-0,0312	-0,0344	-0,036
0	F	0,0044	0,0012	-0,0044	-0,02	-0,0288	-0,0428	-0,0644	-0,0668	-0,07	-0,072
0	F	-0,0136	-0,0368	-0,0424	-0,0544	-0,0568	-0,0596	-0,0624	-0,0668	-0,07	-0,0716
25	F	0,0024	-0,0012	-0,008	-0,0172	-0,0192	-0,0224	-0,0268	-0,03	-0,0336	-0,0364
25	F	0,0024	-0,0008	-0,0064	-0,018	-0,0208	-0,0244	-0,0292	-0,034	-0,0368	-0,0392
25	F	0,0032	0,0001	-0,0052	-0,0088	-0,0108	-0,0172	-0,0252	-0,0296	-0,032	-0,0336
50	F	-0,0244	-0,0276	-0,0332	-0,0372	-0,0476	-0,052	-0,0548	-0,058	-0,0612	-0,064
50	F	-0,0078	-0,0108	-0,0134	-0,0179	-0,0213	-0,0245	-0,0261	-0,0284	-0,0301	-0,0322
50	F	0,0164	0,0132	0,0096	0,004	-0,008	-0,0184	-0,0216	-0,0236	-0,0268	-0,0296

Fuente: Software DesignExpert 9.0

TABLA 5.7: Tabla general de retracción en software DesignExpert para hormigones con 40% de PPE

Factor 1	Factor 2	Response 1	Response 2	Response 3	Response 4	Response 5	Response 6	Response 7	Response 8	Response 9	Response 10
a: Cantidad PET %	B: Tamaño PET s/u	RETRACCION 11 mm/m	RETRACCION 14 mm/m	RETRACCION 21 mm/m	RETRACCION 28 mm/m	RETRACCION 35 mm/m	RETRACCION 42 mm/m	RETRACCION 49 mm/m	RETRACCION 56 mm/m	RETRACCION 70 mm/m	RETRACCION 90 mm/m
0	G	0,0012	-0,004	-0,0108	-0,0148	-0,0236	-0,0268	-0,0292	-0,032	-0,0348	-0,0364
0	G	0,008	0,0008	-0,0032	-0,0072	-0,0092	-0,0116	-0,0192	-0,026	-0,0284	-0,0308
0	G	0,006	-0,0044	-0,0088	-0,0116	-0,0216	-0,0244	-0,0276	-0,0304	-0,0332	-0,036
25	G	-0,0064	-0,0096	-0,0144	-0,018	-0,0212	-0,0228	-0,0336	-0,0348	-0,0364	-0,0388
25	G	-0,0076	-0,0112	-0,016	-0,0204	-0,0224	-0,024	-0,034	-0,036	-0,0384	-0,0404
25	G	0,0048	-0,002	-0,0064	-0,0108	-0,0132	-0,0148	-0,0256	-0,0264	-0,03	-0,0332
50	G	0,0192	0,0176	0,014	0,008	0,0052	0,0036	-0,0476	-0,0496	-0,052	-0,0548
50	G	-0,0032	-0,006	-0,0112	-0,016	-0,0184	-0,0236	-0,0288	-0,0324	-0,0372	-0,0404
50	G	0,000	-0,0028	-0,0076	-0,0116	-0,0144	-0,0168	-0,026	-0,03	-0,0328	-0,036
0	F	0,0036	-0,0023	-0,0065	-0,0102	-0,0143	-0,0171	-0,0198	-0,0222	-0,0243	-0,0265
0	F	0,0072	0,0005	-0,0039	-0,0081	-0,0176	-0,0199	-0,0176	-0,0213	-0,0256	-0,0289
0	F	0,0048	-0,0008	-0,0068	-0,0097	-0,0164	-0,0184	-0,0164	-0,0196	-0,0238	-0,0278
25	F	-0,0188	-0,0228	-0,0292	-0,0316	-0,0352	-0,0464	-0,0532	-0,0588	-0,0632	-0,0668
25	F	0,0056	-0,002	-0,0116	-0,0168	-0,0216	-0,0324	-0,0408	-0,0452	-0,0484	-0,05
25	F	0,0021	-0,00107	-0,0106	-0,0143	-0,0198	-0,0219	-0,0233	-0,0276	-0,0299	-0,0384
50	F	-0,0044	-0,0096	-0,0176	-0,0196	-0,0256	-0,0384	-0,048	-0,0512	-0,0548	-0,056
50	F	0,0012	-0,0052	-0,0086	-0,0112	-0,0156	-0,0179	-0,0202	-0,0232	-0,0289	-0,031
50	F	0,0072	0,0016	-0,0056	-0,0084	-0,0104	-0,022	-0,03	-0,032	-0,0348	-0,04

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Para estimar los efectos de los factores en estudio (a: Cantidad de PET; B: Tamaño PET) sobre la variable de respuesta (Retracción hidráulica medida a distintas edades) se examinó la gráfica de probabilidad normal, en donde los factores que son insignificantes tienden a ubicarse en una línea recta, siguiendo una distribución normal, sin embargo, las variables significativas del modelo se alejarán de ella. Las figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, presentan las gráficas de probabilidad normal para la retracción hidráulica medida a los hormigones fabricados con un 20% de PPE a los 11, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 70 y 90 días.

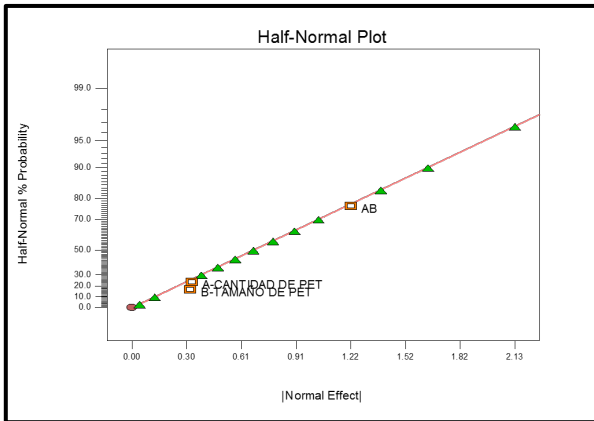


FIGURA 5.5: Gráfica de probabilidad normal  
Día 11 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

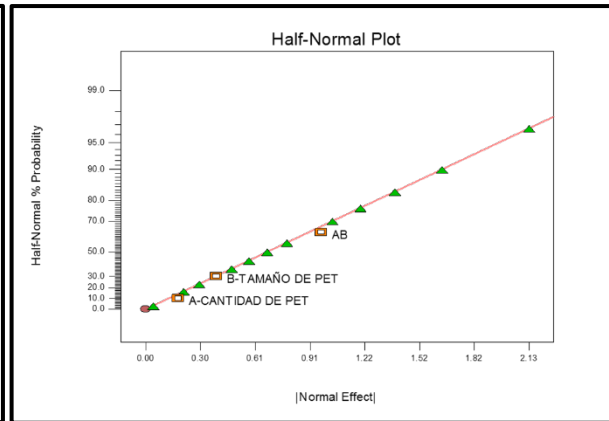


FIGURA 5.6: Gráfica de probabilidad normal  
Día 14 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

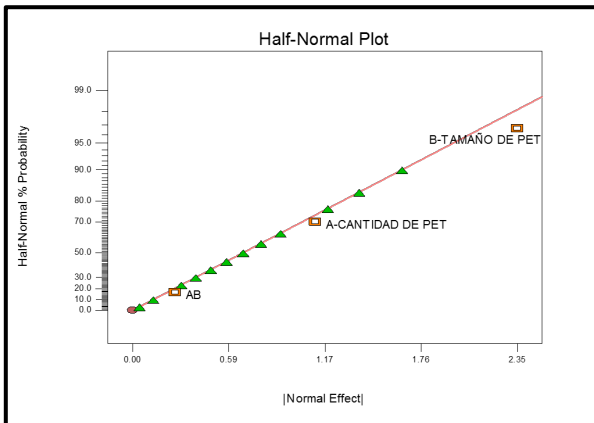


FIGURA 5.7: Gráfica de probabilidad normal  
Día 21 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

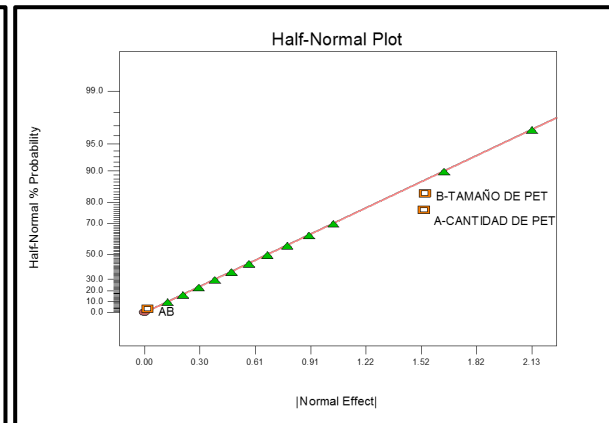


FIGURA 5.8: Gráfica de probabilidad normal  
Día 28 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

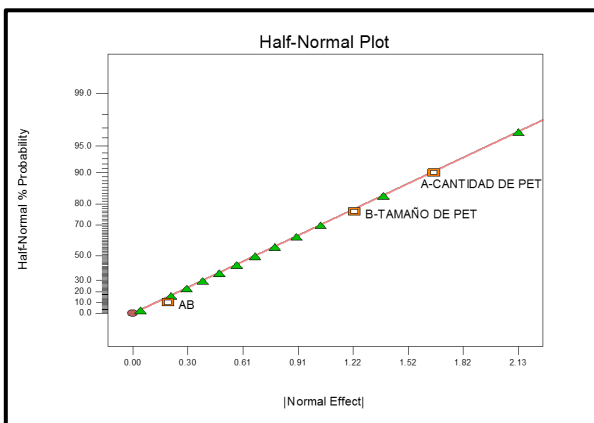


FIGURA 5.9: Gráfica de probabilidad normal  
Día 35 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

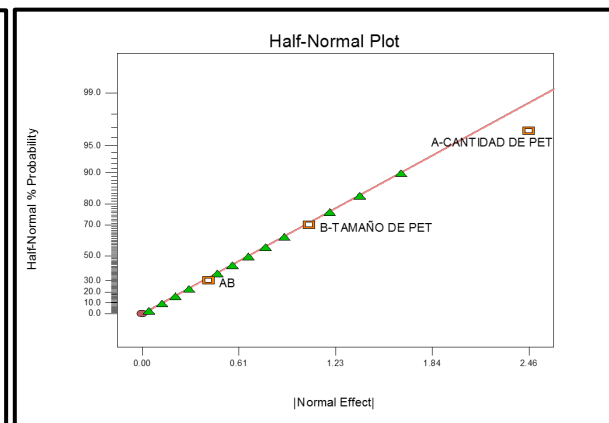


FIGURA 5.10: Gráfica de probabilidad normal  
Día 42 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

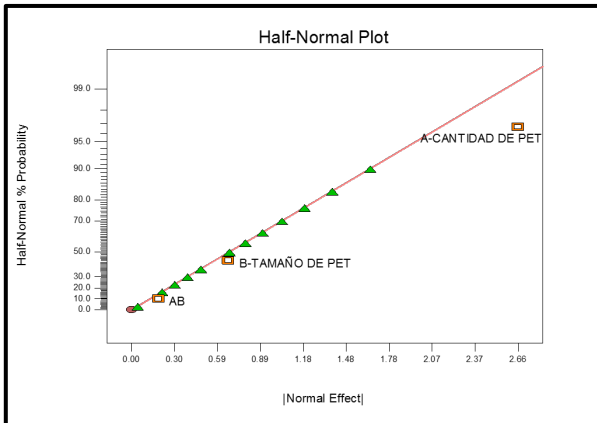


FIGURA 5.11: Gráfica de probabilidad normal  
Día 49 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

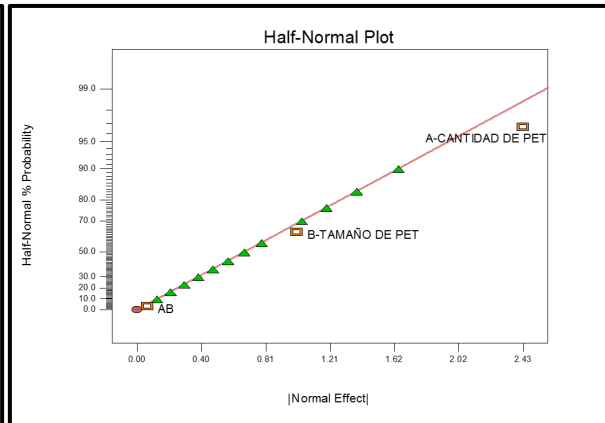


FIGURA 5.12: Gráfica de probabilidad normal  
Día 56 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

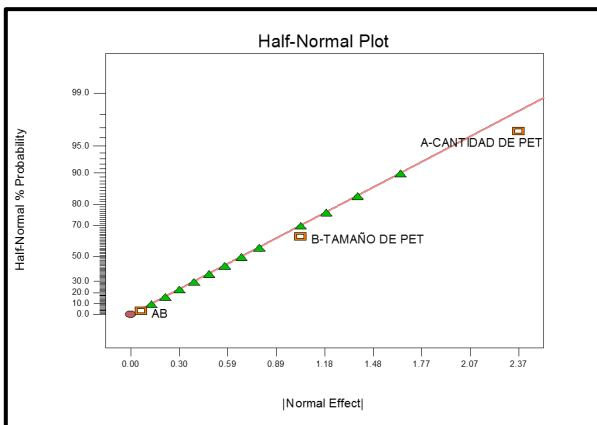


FIGURA 5.13: Gráfica de probabilidad normal  
Día 70 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

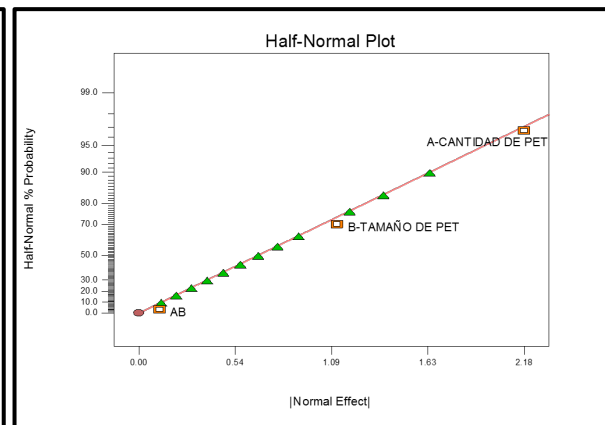


FIGURA 5.14: Gráfica de probabilidad normal  
Día 90 y 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

Posteriormente mediante el análisis de varianza (ANOVA), el estadístico F permite evaluar si el modelo es significativo y la probabilidad ( $p > 0,05$ ) que un valor F del modelo esté afectado por factores de ruido. Valores de probabilidad  $> F$  menores de 0,05, indican las variables significativas del modelo. En cambio si  $Prob < F$  es mayor a 0,1000 este factor no es significativo. La figuras 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 presentan los análisis de varianza para la retracción hidráulica medida a los hormigones fabricados con un 20% de PPE a los 11, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 70 y 90 días.

Response	1	RETRACCIÓN 11			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
	Sum of		Mean	F	p-value
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F
Model	7.734E-004	5	1.547E-004	0.74	0.6069 not significant
A-CANTIDAD DE PET	1.261E-004	2	6.307E-005	0.30	0.7445
B-TAMAÑO DE PET	2.200E-005	1	2.200E-005	0.11	0.7509
AB	6.253E-004	2	3.126E-004	1.50	0.2623
Pure Error	2.502E-003	12	2.085E-004		
Cor Total	3.276E-003	17			

FIGURA 5.15: Análisis de varianza Día 11 y 20% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	2	RETRACCIÓN 14			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
	Sum of		Mean	F	p-value
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F
Model	7.065E-004	5	1.413E-004	0.54	0.7452 not significant
A-CANTIDAD DE PET	8.149E-005	2	4.074E-005	0.15	0.8583
B-TAMAÑO DE PET	4.050E-005	1	4.050E-005	0.15	0.7018
AB	5.845E-004	2	2.922E-004	1.11	0.3612
Pure Error	3.160E-003	12	2.633E-004		
Cor Total	3.866E-003	17			

FIGURA 5.16: Análisis de varianza Día 14 y 20% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	3	RETRACCIÓN 21			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
	Sum of		Mean	F	p-value
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F
Model	1.883E-003	5	3.767E-004	1.73	0.2028 not significant
A-CANTIDAD DE PET	5.797E-004	2	2.899E-004	1.33	0.3009
B-TAMAÑO DE PET	1.204E-003	1	1.204E-003	5.52	0.0367
AB	1.000E-004	2	5.000E-005	0.23	0.7984
Pure Error	2.616E-003	12	2.180E-004		
Cor Total	4.500E-003	17			

FIGURA 5.17: Análisis de varianza Día 21 y 20% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	4	RETRACCIÓN 28			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	1.427E-003	5	2.855E-004	1.31	0.3220 not significant
A-CANTIDAD DE PET	9.050E-004	2	4.525E-004	2.08	0.1674
B-TAMAÑO DE PET	5.163E-004	1	5.163E-004	2.38	0.1492
AB	6.048E-006	2	3.024E-006	0.014	0.9862
Pure Error	2.608E-003	12	2.173E-004		

FIGURA 5.18: Análisis de varianza Día 28 y 20% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	5	RETRACCIÓN 35			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	1.329E-003	5	2.657E-004	1.30	0.3258 not significant
A-CANTIDAD DE PET	9.544E-004	2	4.772E-004	2.34	0.1386
B-TAMAÑO DE PET	3.059E-004	1	3.059E-004	1.50	0.2442
AB	6.835E-005	2	3.418E-005	0.17	0.8476
Pure Error	2.447E-003	12	2.039E-004		
Cor Total	3.775E-003	17			

FIGURA 5.19: Análisis de varianza Día 35 y 20% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	6	RETRACCIÓN 42			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	1.869E-003	5	3.738E-004	2.09	0.1368 not significant
A-CANTIDAD DE PET	1.527E-003	2	7.633E-004	4.27	0.0397
B-TAMAÑO DE PET	2.013E-004	1	2.013E-004	1.13	0.3093
AB	1.412E-004	2	7.061E-005	0.40	0.6820
Pure Error	2.144E-003	12	1.787E-004		
Cor Total	4.013E-003	17			

FIGURA 5.20: Análisis de varianza Día 42 y 20% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	7	RETRACCIÓN 49			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	2.288E-003	5	4.576E-004	2.10	0.1360 not significant
A-CANTIDAD DE PET	2.122E-003	2	1.061E-003	4.86	0.0284
B-TAMAÑO DE PET	9.707E-005	1	9.707E-005	0.44	0.5173
AB	6.931E-005	2	3.465E-005	0.16	0.8549
Pure Error	2.618E-003	12	2.181E-004		
Cor Total	4.906E-003	17			

FIGURA 5.21: Análisis de varianza Día 49 y 20% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	8	RETRACCIÓN 56			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	2.233E-003	5	4.465E-004	1.90	0.1682 not significant
A-CANTIDAD DE PET	1.971E-003	2	9.853E-004	4.19	0.0416
B-TAMAÑO DE PET	2.369E-004	1	2.369E-004	1.01	0.3353
AB	2.502E-005	2	1.251E-005	0.053	0.9484
Pure Error	2.821E-003	12	2.351E-004		
Cor Total	5.053E-003	17			

FIGURA 5.22: Análisis de varianza Día 56 y 20% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	9	RETRACCIÓN 70			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	2.509E-003	5	5.017E-004	1.84	0.1788 not significant
A-CANTIDAD DE PET	2.188E-003	2	1.094E-003	4.02	0.0461
B-TAMAÑO DE PET	2.920E-004	1	2.920E-004	1.07	0.3208
AB	2.855E-005	2	1.428E-005	0.052	0.9491
Pure Error	3.267E-003	12	2.722E-004		
Cor Total	5.775E-003	17			

FIGURA 5.23: Análisis de varianza Día 70 y 20% PPE

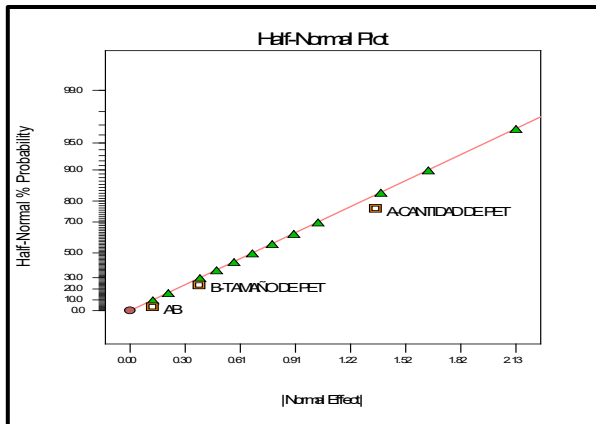
Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	10	RETRACCIÓN 90			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	2.929E-003	5	5.859E-004	1.70	0.2083 <span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px;">not significant</span>
A-CANTIDAD DE PET	2.429E-003	2	1.215E-003	3.53	0.0622
B-TAMAÑO DE PET	4.322E-004	1	4.322E-004	1.26	0.2843
AB	6.785E-005	2	3.393E-005	0.099	0.9068
Pure Error	4.128E-003	12	3.440E-004		
Cor Total	7.057E-003	17			

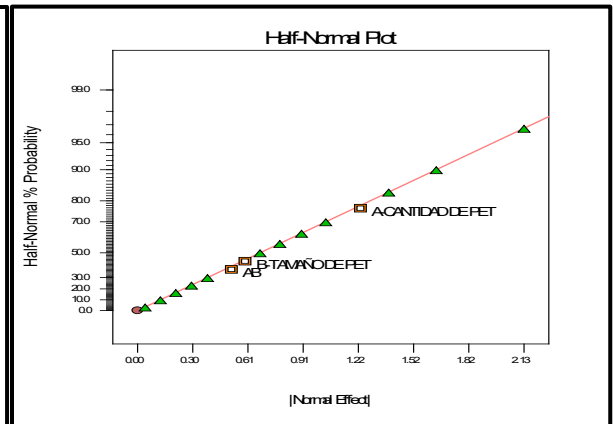
FIGURA 5.24: Análisis de varianza Día 90 y 20% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Las figuras 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, presentan las gráficas de probabilidad normal para la retracción hidráulica medida a los hormigones fabricados con un 40% de PPE a los 11, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 70 y 90 días.

FIGURA 5.25: Gráfica de probabilidad normal  
Día 11 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

FIGURA 5.26: Gráfica de probabilidad normal  
Día 14 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

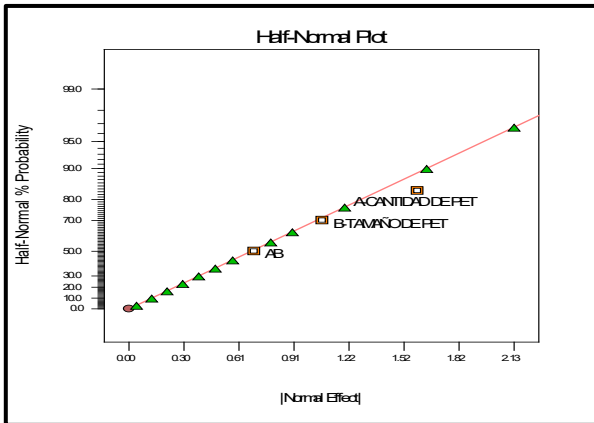


FIGURA 5.27: Gráfica de probabilidad normal  
 Día 21 y 40% PPE  
 Fuente: Software DesignExpert 9.0

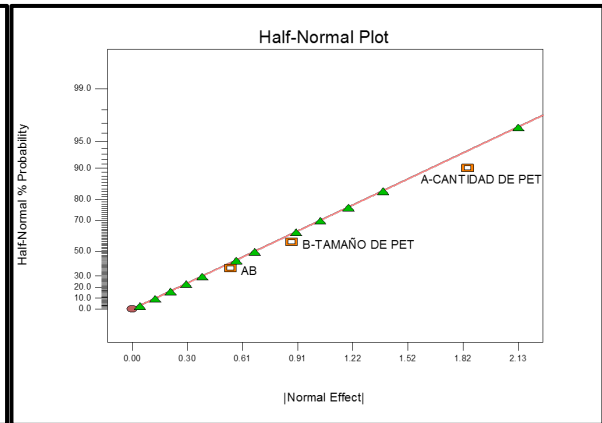


FIGURA 5.28: Gráfica de probabilidad normal  
 Día 28 y 40% PPE  
 Fuente: Software DesignExpert 9.0

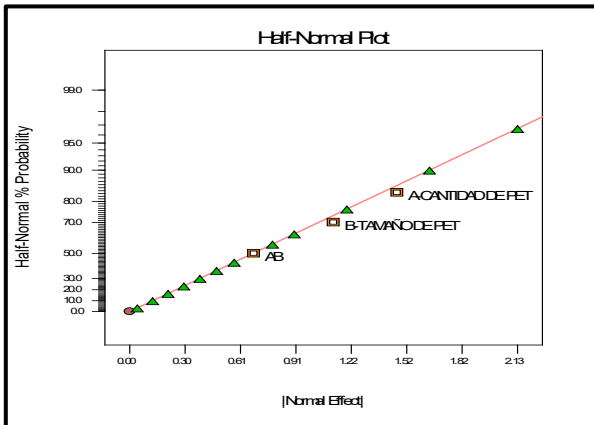


FIGURA 5.29: Gráfica de probabilidad normal  
 Día 35 y 40% PPE  
 Fuente: Software DesignExpert 9.0

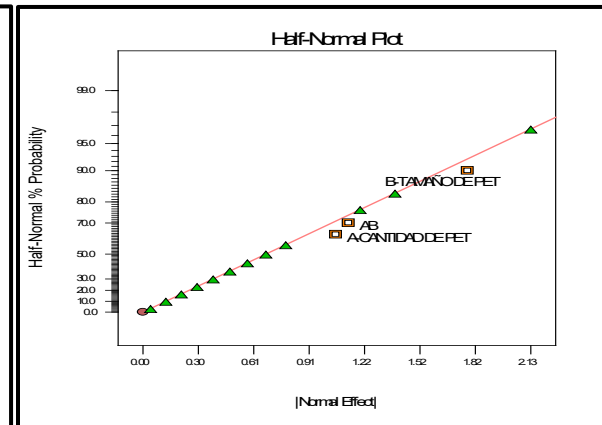


FIGURA 5.30: Gráfica de probabilidad normal  
 Día 42 y 40% PPE  
 Fuente: Software DesignExpert 9.0

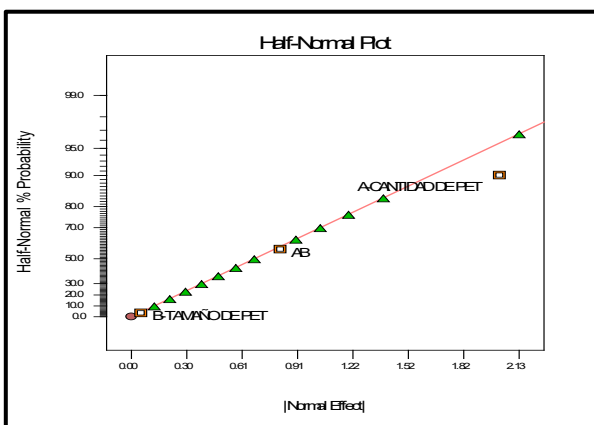


FIGURA 5.31: Gráfica de probabilidad normal  
 Día 49 y 40% PPE  
 Fuente: Software DesignExpert 9.0

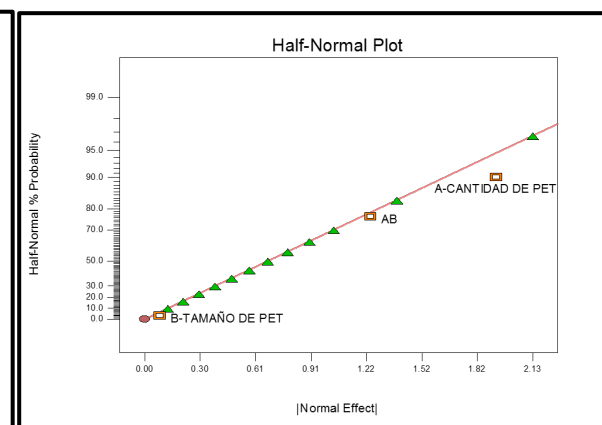


FIGURA 5.32: Gráfica de probabilidad normal  
 Día 56 y 40% PPE  
 Fuente: Software DesignExpert 9.0

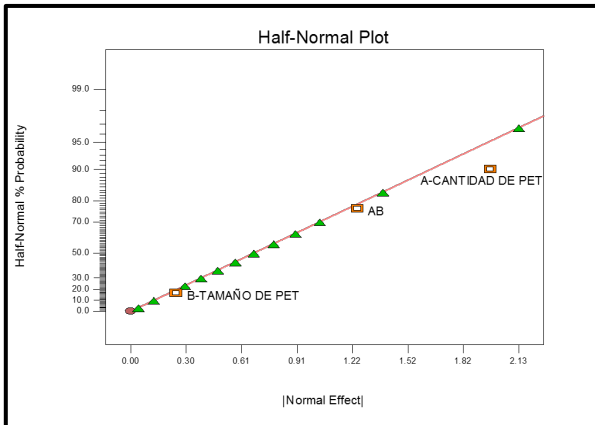


FIGURA 5.33: Gráfica de probabilidad normal  
Día 70 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

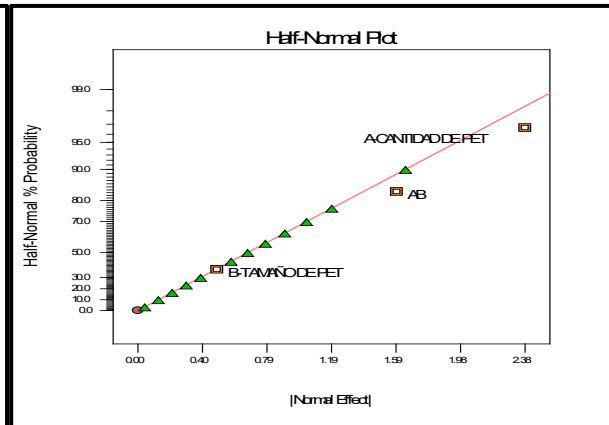


FIGURA 5.34: Gráfica de probabilidad normal  
Día 90 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

La figuras 5.35, 5.36, 5.37, 5.38, 5.39, 5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44 presentan los análisis de varianza para la retracción hidráulica medida a los hormigones fabricados con un 40% de PPE a los 11, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 70 y 90 días.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	2.664E-004	5	5.328E-005	0.77	0.5910 not significant
A-CANTIDAD DE PET	2.418E-004	2	1.209E-004	1.74	0.2170
B-TAMAÑO DE PET	1.013E-005	1	1.013E-005	0.15	0.7093
AB	1.450E-005	2	7.252E-006	0.10	0.9017
Pure Error	8.337E-004	12	6.947E-005		
Cor Total	1.100E-003	17			

FIGURA 5.35: Análisis de varianza Día 11 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	2	RETRACCIÓN 14			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	2.794E-004	5	5.587E-005	0.88	0.5234 not significant
A-CANTIDAD DE PET	1.930E-004	2	9.648E-005	1.52	0.2583
B-TAMAÑO DE PET	2.238E-005	1	2.238E-005	0.35	0.5639
AB	6.403E-005	2	3.201E-005	0.50	0.6164
Pure Error	7.624E-004	12	6.353E-005		
Cor Total	1.042E-003	17			

FIGURA 5.36: Análisis de varianza Día 14 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	3	RETRACCIÓN 21			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	4.399E-004	5	8.798E-005	1.39	0.2942 not significant
A-CANTIDAD DE PET	2.776E-004	2	1.388E-004	2.20	0.1536
B-TAMAÑO DE PET	7.200E-005	1	7.200E-005	1.14	0.3065
AB	9.025E-005	2	4.513E-005	0.71	0.5089
Pure Error	7.575E-004	12	6.312E-005		
Cor Total	1.197E-003	17			

FIGURA 5.37: Análisis de varianza Día 21 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	4	RETRACCIÓN 28			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	3.973E-004	5	7.945E-005	1.47	0.2715 not significant
A-CANTIDAD DE PET	2.976E-004	2	1.488E-004	2.74	0.1044
B-TAMAÑO DE PET	4.201E-005	1	4.201E-005	0.77	0.3960
AB	5.761E-005	2	2.881E-005	0.53	0.6011
Pure Error	6.508E-004	12	5.423E-005		
Cor Total	1.048E-003	17			

FIGURA 5.38: Análisis de varianza Día 28 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	5	RETRACCIÓN 35			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	4.138E-004	5	8.276E-005	1.31	0.3229 not significant
A-CANTIDAD DE PET	2.462E-004	2	1.231E-004	1.95	0.1847
B-TAMAÑO DE PET	7.896E-005	1	7.896E-005	1.25	0.2853
AB	8.858E-005	2	4.429E-005	0.70	0.5150
Pure Error	7.575E-004	12	6.312E-005		
Cor Total	1.171E-003	17			

FIGURA 5.39: Análisis de varianza Día 35 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	6	RETRACCIÓN 42			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	7.833E-004	5	1.567E-004	1.67	0.2161 not significant
A-CANTIDAD DE PET	2.323E-004	2	1.162E-004	1.24	0.3244
B-TAMAÑO DE PET	2.977E-004	1	2.977E-004	3.17	0.1002
AB	2.533E-004	2	1.266E-004	1.35	0.2959
Pure Error	1.126E-003	12	9.381E-005		
Cor Total	1.909E-003	17			

FIGURA 5.40: Análisis de varianza Día 42 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	7	RETRACCIÓN 49			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	8.276E-004	5	1.655E-004	1.61	0.2309 not significant
A-CANTIDAD DE PET	6.457E-004	2	3.229E-004	3.14	0.0800
B-TAMAÑO DE PET	2.939E-007	1	2.939E-007	2.859E-003	0.9582
AB	1.816E-004	2	9.079E-005	0.88	0.4387
Pure Error	1.233E-003	12	1.028E-004		
Cor Total	2.061E-003	17			

FIGURA 5.41: Análisis de varianza Día 49 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	8	RETRACCIÓN 56			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	8.957E-004	5	1.791E-004	1.78	0.1908 not significant
A-CANTIDAD DE PET	5.866E-004	2	2.933E-004	2.92	0.0926
B-TAMAÑO DE PET	6.806E-007	1	6.806E-007	6.774E-003	0.9358
AB	3.085E-004	2	1.542E-004	1.54	0.2549
Pure Error	1.206E-003	12	1.005E-004		
Cor Total	2.101E-003	17			

FIGURA 5.42: Análisis de varianza Día 56 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	9	RETRACCIÓN 70			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	9.122E-004	5	1.824E-004	1.84	0.1794 not significant
A-CANTIDAD DE PET	5.998E-004	2	2.999E-004	3.02	0.0864
B-TAMAÑO DE PET	6.125E-006	1	6.125E-006	0.062	0.8079
AB	3.063E-004	2	1.531E-004	1.54	0.2531
Pure Error	1.190E-003	12	9.917E-005		
Cor Total	2.102E-003	17			

FIGURA 5.43: Análisis de varianza Día 70 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Response	10	RETRACCIÓN 90			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	1.033E-003	5	2.065E-004	2.55	0.0857 not significant
A-CANTIDAD DE PET	6.576E-004	2	3.288E-004	4.06	0.0451
B-TAMAÑO DE PET	1.922E-005	1	1.922E-005	0.24	0.6351
AB	3.557E-004	2	1.778E-004	2.19	0.1542
Pure Error	9.728E-004	12	8.107E-005		
Cor Total	2.005E-003	17			

FIGURA 5.44: Análisis de varianza Día 90 y 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.

De acuerdo a las gráficas de probabilidad normal y los análisis de varianzas realizados, la retracción hidráulica durante todo el periodo de secado evaluado (11 a 90 días), indica que tanto para los hormigones confeccionados con 20% y 40% de PPE, no existe una influencia estadísticamente significativa de la cantidad de PET incorporado ni del tamaño de PET utilizado. Por lo tanto para efectos de la retracción hidráulica el uso de PPE o de PET (dentro de los rangos investigados en este estudio) es indistinto.

## 5.5 Pérdida de peso y densidad de hormigones

Las probetas fueron controladas por su peso, con una balanza de precisión 0,1 (gr), ya que se relaciona en gran medida con la retracción hidráulica, ya que la pérdida de agua en el hormigón es el causante de este fenómeno debido al secado de la mezcla, datos que se muestran en la tabla 5.8 y 5.9; los pesos están expresados en gramos.

TABLA 5.8: Pérdida de peso promedio en hormigones hasta día 28

Edad hormigón (días)	0	7	11	14	21	28
Hormigón	Peso (gramos)					
H-20-0-G	3881,2	3862,6	3837,1	3804,6	3797,1	3791,9
H-20-25-G	3839,5	3812,7	3795,4	3771,3	3757,0	3746,6
H-20-50-G	3879,6	3860,2	3847,2	3834,3	3820,7	3810,4
H-40-0-G	3569,9	3548,5	3522,0	3488,8	3473,1	3470,4
H-40-25-G	3778,4	3752,0	3673,6	3662,1	3653,6	3648,7
H-40-50-G	3696,3	3658,8	3565,4	3553,4	3544,6	3538,8
H-20-0-F	3837,8	3778,3	3689,4	3681,6	3668,9	3659,2
H-20-25-F	3936,1	3908,7	3822,8	3816,0	3802,3	3792,1
H-20-50-F	3760,6	3734,6	3667,5	3653,1	3637,3	3631,5
H-40-0-F	3572,7	3551,8	3534,7	3496,1	3478,9	3471,7
H-40-25-F	3761,6	3754,2	3673,5	3664,8	3652,1	3642,4
H-40-50-F	3750,0	3745,2	3678,0	3666,9	3656,9	3647,8

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 5.9: Pérdida de peso promedio en hormigones hasta día 90

Edad hormigón (días)	35	42	49	56	70	90
Hormigón	Peso (gramos)					
H-20-0-G	3789,0	3781,0	3776,8	3774,2	3773,9	3768,6
H-20-25-G	3744,2	3737,1	3735,0	3732,1	3730,5	3727,3
H-20-50-G	3808,4	3801,7	3799,7	3797,1	3794,2	3792,4
H-40-0-G	3462,9	3458,3	3455,2	3453,9	3453,2	3451,5
H-40-25-G	3645,7	3641,1	3639,1	3638,3	3636,6	3635,6
H-40-50-G	3535,0	3530,3	3529,2	3525,8	3525,8	3525,8
H-20-0-F	3655,1	3652,8	3651,6	3650,6	3647,9	3644,5
H-20-25-F	3784,7	3780,4	3779,3	3778,6	3777,9	3776,4
H-20-50-F	3627,1	3622,1	3617,1	3615,7	3613,8	3612,3
H-40-0-F	3467,2	3462,3	3458,5	3456,2	3454,9	3453,1
H-40-25-F	3639,4	3637,0	3634,4	3631,3	3630,1	3628,7
H-40-50-F	3644,9	3642,9	3639,9	3637,5	3636,3	3634,7

Fuente: Elaboración Propia

A partir de estas Tablas se puede ver en la Figura 5.45 la gráfica de la variación promedio de peso en gramos, donde se aprecia que los hormigones con sustitución de arena por PPE y PET presentan valores inferiores con respecto al hormigón patrón y a su vez, a medida que se va incrementando la cantidad PPE y PET, va disminuyendo el peso en las probetas de hormigón.

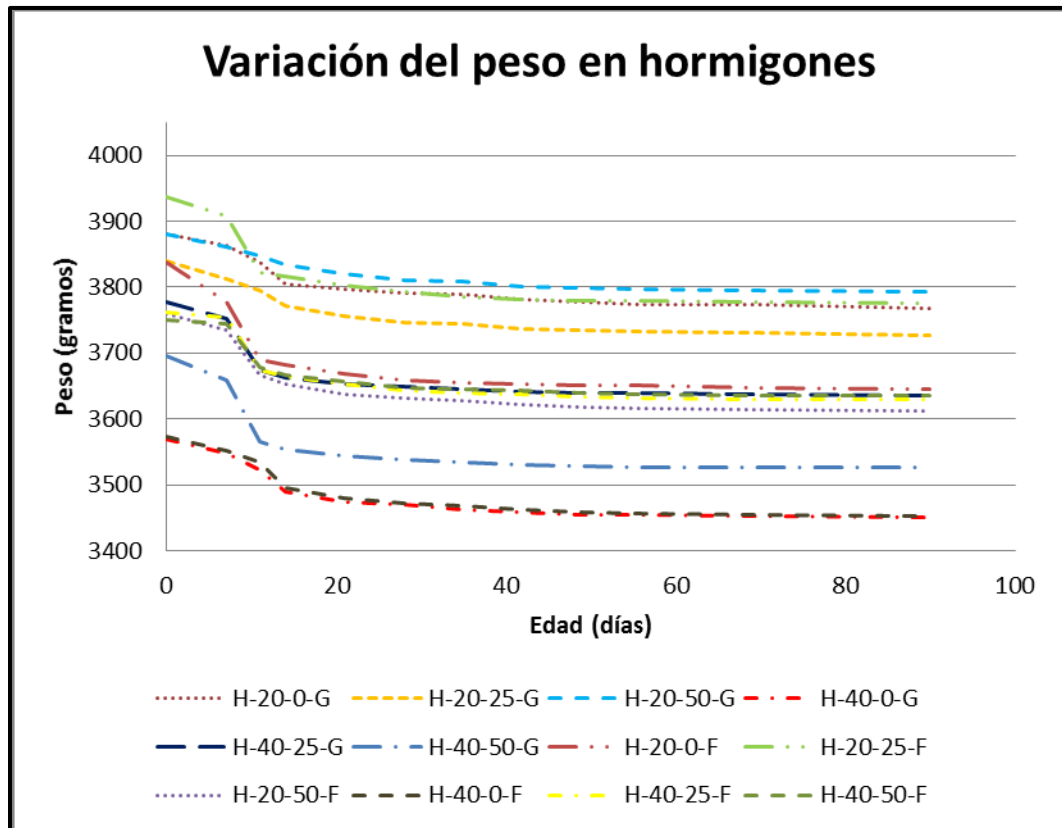


FIGURA 5.45: Variación del peso en hormigones

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede observar en la figura 5.45 que la evolución de las probetas es parecida para todos los hormigones, debido a que con el paso del tiempo, todos los hormigones fueron perdiendo peso desde la primera lectura, que fue el día 0 (día donde las probetas fueron sacadas del periodo de curado) hasta el día 90 de secado. Además todos los hormigones presentan una disminución mayor de peso en los primeros días de secado, y posteriormente presentan una pérdida de peso que va disminuyendo con el tiempo, como se puede apreciar en la figura 5.45, en donde las curvas en el último periodo de tiempo presentan una mínima variación.

Se observa además que la relación que tienen el peso de las probetas con la retracción hidráulica, es una relación inversa, ya que al disminuir el peso, aumentan los valores de retracción hidráulica.

A su vez, en las tablas 5.10 y 5.11 se muestra la variación de las densidades que sufrieron los hormigones.

TABLA 5.10: Pérdida de densidad promedio en hormigones hasta día 28

Edad hormigón (días)	0	7	11	14	21	28
Hormigón	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )					
H-20-0-G	2425,8	2414,1	2398,2	2377,9	2373,2	2369,9
H-20-25-G	2399,7	2382,9	2372,1	2357,0	2348,1	2341,6
H-20-50-G	2424,8	2412,6	2404,5	2396,4	2387,9	2381,5
H-40-0-G	2231,2	2217,8	2201,3	2180,5	2170,7	2169,0
H-40-25-G	2361,5	2345,0	2296,0	2288,8	2283,5	2280,4
H-40-50-G	2310,2	2286,8	2228,4	2220,9	2215,4	2211,8
H-20-0-F	2398,6	2361,5	2305,9	2301,0	2293,0	2287,0
H-20-25-F	2460,1	2442,9	2389,2	2385,0	2376,5	2370,1
H-20-50-F	2350,3	2334,1	2292,2	2283,2	2273,3	2269,7
H-40-0-F	2232,9	2219,9	2209,2	2185,1	2174,3	2169,8
H-40-25-F	2351,0	2346,4	2295,9	2290,5	2282,5	2276,5
H-40-50-F	2343,7	2340,7	2298,7	2291,8	2285,5	2279,8

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 5.11: Pérdida de densidad promedio en hormigones hasta día 90

Edad hormigón (días)	35	42	49	56	70	90
Hormigón	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )					
H-20-0-G	2368,1	2363,1	2360,5	2358,9	2358,7	2355,4
H-20-25-G	2340,1	2335,7	2334,4	2332,5	2331,6	2329,6
H-20-50-G	2380,3	2376,0	2374,8	2373,2	2371,4	2370,2
H-40-0-G	2164,3	2161,4	2159,5	2158,7	2158,3	2157,2
H-40-25-G	2278,6	2275,7	2274,5	2274,0	2272,9	2272,3
H-40-50-G	2209,4	2206,4	2205,8	2203,6	2203,6	2203,6
H-20-0-F	2284,5	2283,0	2282,2	2281,6	2279,9	2277,8
H-20-25-F	2365,5	2362,8	2362,1	2361,6	2361,2	2360,2
H-20-50-F	2266,9	2263,8	2260,7	2259,8	2258,6	2257,7
H-40-0-F	2167,0	2163,9	2161,6	2160,1	2159,3	2158,2
H-40-25-F	2274,6	2273,1	2271,5	2269,6	2268,8	2267,9
H-40-50-F	2278,0	2276,8	2274,9	2273,4	2272,7	2271,7

Fuente: Elaboración Propia

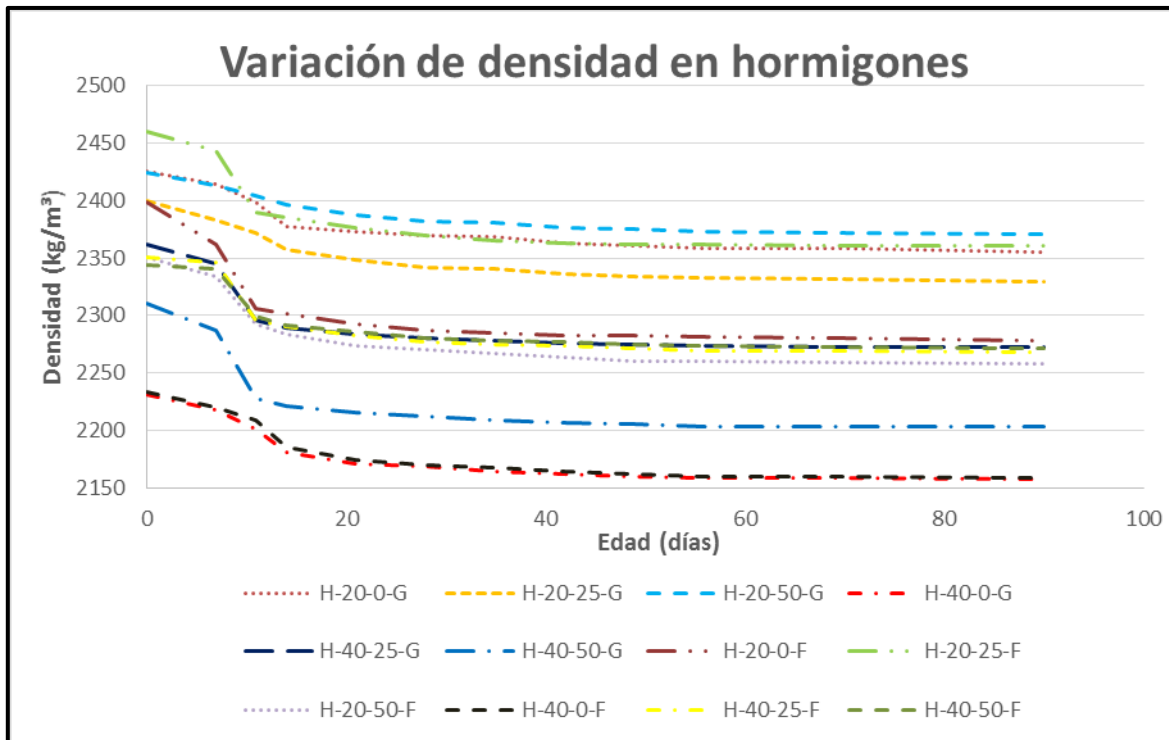


FIGURA 5.46: Variación de densidad en hormigones

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 5.46 se observa la pérdida de densidad en los 12 tipos de hormigones más el hormigón patrón, en donde se observa que al igual que la variación de pesos, los primeros días de secado, todos los hormigones sufren una pérdida mayor de densidad y posteriormente la pérdida es casi constante, presentando mínimas variaciones en las curvas.

## 5.6 Resistencia a compresión

En esta parte del capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión realizados en los diferentes hormigones. Estos ensayos se efectuaron a la edad de 28 días, en series de 3 probetas cúbicas de 15 cm.

La tabla 5.12 presenta los resultados de resistencia a compresión promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación.

TABLA 5.12: Resistencia compresión promedio de hormigones

Hormigón	Resistencia Promedio (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Desviación Estándar (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Coficiente de Variación (%)
HP	463,7	12,4	2,7
H-20-0-G	348,3	17,4	5,0
H-20-25-G	371,2	15,8	4,3
H-20-50-G	386,1	8,5	2,2
H-40-0-G	330,4	21,2	6,4
H-40-25-G	343,3	14,0	4,1
H-40-50-G	310,6	1,6	0,5
H-20-0-F	311,6	3,7	1,8
H-20-25-F	282,3	1,1	0,4
H-20-50-F	272,6	4,0	1,5
H-40-0-F	331,2	18,1	5,5
H-40-25-F	295,0	18,6	6,3
H-40-50-F	307,0	7,0	2,3

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla anterior se puede apreciar que en los hormigones que poseen PET y PPE tienen una menor resistencia a la compresión con respecto al hormigón patrón.

Por otro lado, se observa que el hormigón patrón junto a los hormigones, H-20-50-G, H-40-50-G, H-20-0-F, H-20-25-F, H-20-50-F y H-40-50-F tienen una desviación estándar menor a 14 (Kgf/cm<sup>2</sup>), lo cual es calificado como un parámetro de dispersión excelente según la norma ACI 214 para hormigones elaborados en laboratorio. Los hormigones H-20-25-G y H-40-25-G tienen una desviación estándar entre 14 y 17 (Kgf/cm<sup>2</sup>), lo cual es calificado como un parámetro de dispersión muy buena según la norma ACI 214, mientras que los hormigones H-20-0-G, H-40-0-G, H-40-0-F y H-40-25-F son calificados como buena.

En el caso del coeficiente de variación, los hormigones H-40-50-G, H-20-0-F, H-20-25-F y H-20-50-F presentan un parámetro de dispersión excelente, con un valor inferior al 2%, según la norma anteriormente mencionada. Los hormigones HP, H-20-50-G y H-40-50-F presentan un parámetro de dispersión muy buena, con un valor entre 2 y 3%. Los hormigones H-20-0-G,

H-20-25-G y H-40-25-G presentan un parámetro de dispersión regular, con valores entre 4 y 5%. Finalmente los hormigones H-40-0-G, H-40-0-F y H-40-25-F presentan un parámetro de dispersión mala con valores superiores al 5%, siendo el más desfavorable el hormigón H-40-25-F con un valor de 6,3%.

La figura 5.47 grafica la variación de las resistencias a compresión de los diferentes hormigones en comparación con el hormigón patrón.

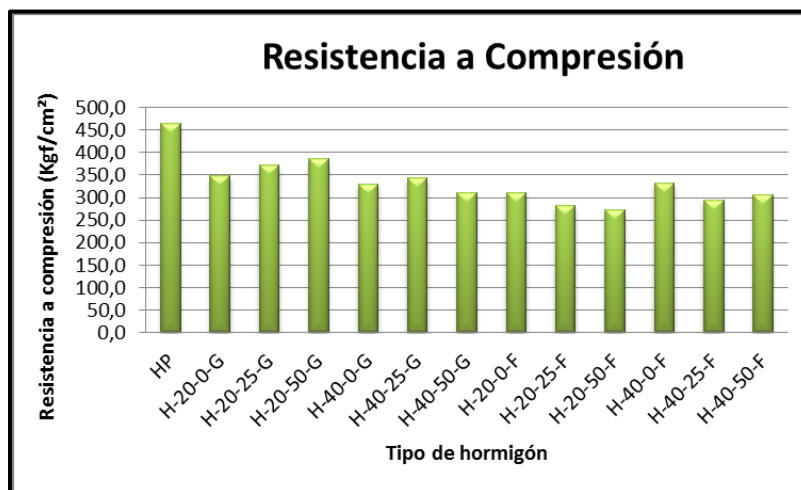


FIGURA 5.47: Resistencia a compresión de hormigones

Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se puede observar que el hormigón patrón presenta la mayor resistencia a compresión con un valor de 463,7 (Kgf/cm<sup>2</sup>), seguido de los hormigones H-20-50-G, H-20-25-G y H-20-0-G con valores de 386,1 (Kgf/cm<sup>2</sup>), 371,2 (Kgf/cm<sup>2</sup>) y 348,3 (Kgf/cm<sup>2</sup>) respectivamente. El hormigón H-20-50-F, el cual posee un 20% PPE y un 50% de PET fino, es el que presenta la menor resistencia a la compresión con 272,6 (Kgf/cm<sup>2</sup>).

Se puede observar además que los hormigones H-20-0-G, H-20-25-G, H-20-50-G, H-40-0-G, H-40-25-G y H-40-50-G elaborados con PPE y PET grueso, presentan mayores resistencias a la compresión con respecto a los hormigones H-20-0-F, H-20-25-F, H-20-50-F, H-40-0-F, H-40-25-F y H-40-50-F, elaborados con PPE y PET fino.

La tabla 5.13 muestra el porcentaje de pérdida de resistencia a compresión de los diferentes hormigones con respecto al hormigón patrón.

TABLA 5.13: Variaciones de resistencia a compresión de los diferentes hormigones.

Hormigón	Resistencia Promedio (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Reducción (%)
HP	463,7	0
H-20-0-G	348,3	24,9
H-20-25-G	371,2	19,9
H-20-50-G	386,1	16,7
H-40-0-G	330,4	28,7
H-40-25-G	343,3	26
H-40-50-G	310,6	33
H-20-0-F	311,6	32,8
H-20-25-F	282,3	39,1
H-20-50-F	272,6	41,2
H-40-0-F	331,2	28,6
H-40-25-F	295,0	36,4
H-40-50-F	307,0	33,8

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la tabla anterior, la figura 5.48 grafica la reducción porcentual de las resistencias promedio de los hormigones en comparación con el hormigón patrón.

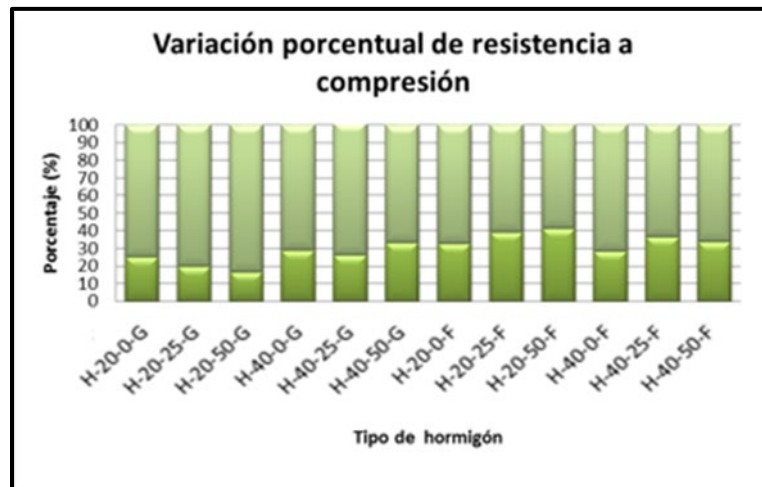


FIGURA 5.48: Variación porcentual de la resistencia a compresión

Fuente: Elaboración Propia

Se observa en la figura anterior, que el hormigón H-20-50-G presenta la menor variación en la resistencia a la compresión, teniendo un porcentaje de reducción de 16,7%. Por el contrario, el hormigón H-20-50-F posee la mayor pérdida de resistencia con un 41,2%.

Estos datos reafirman lo mostrado en la figura 5.46, en donde se pueden apreciar los hormigones con mayor y menor resistencia a la compresión promedio.

## 5.7 Análisis estadístico de resultados de resistencia a la compresión

Al igual que en el análisis estadístico de la retracción hidráulica, se utilizó el programa “DesignExpert 9.0” para ver la influencia que tiene la incorporación de PET reciclado en la resistencia a la compresión; para la utilización del software en este estudio, se requiere de todos los datos obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, es decir, todos los resultados de cada probeta gemela por tipo de hormigón, como se muestra en la Tabla 5.14 y 5.15.

TABLA 5.14: Tabla general de resistencia a la compresión en software DesignExpert para hormigones con 20% de PPE

Factor 1 A: Cantidad PET %	Factor 2 B: Tamaño PET s/u	Response 1 Resistencia a la compresión Kgf/cm <sup>2</sup>
0	F	312,4
0	F	307,5
0	F	314,8
25	F	282,8
25	F	281
25	F	283,1
50	F	275,4
50	F	269,8
50	F	271
0	G	461,3
0	G	477,1
0	G	452,6
25	G	360
25	G	382,4
25	G	370,8
50	G	376,5
50	G	389,4
50	G	392,5

Fuente: Software DesignExpert 9.0

TABLA 5.15: Tabla general de resistencia a la compresión en software DesignExpert para hormigones con 40% de PPE

Factor 1 A: Cantidad PET %	Factor 2 B: Tamaño PET s/u	Response 1 Resistencia a la compresión Kgf/cm <sup>2</sup>
0	F	349,8
0	F	313,7
0	F	330,2
25	F	316,2
25	F	281,7
25	F	287
50	F	309,1
50	F	299,2
50	F	312,6
0	G	352,1
0	G	309,8
0	G	329,2
25	G	353,2
25	G	333,4
25	G	338
50	G	310,5
50	G	309
50	G	312,2

Fuente: Software DesignExpert 9.0

Para estimar los efectos de los factores en estudio (A: Cantidad de PET; b: Tamaño PET) sobre la variable de respuesta (Resistencia a la compresión) se examinó la gráfica de probabilidad normal, en donde los factores que son insignificantes tienden a ubicarse en una línea recta, siguiendo una distribución normal, sin embargo, las variables significativas del modelo se alejarán de ella. Las figuras 5.49 y 5.50, presentan las gráficas de probabilidad normal para la resistencia a la compresión a los hormigones fabricados con un 20% y 40% de PPE.

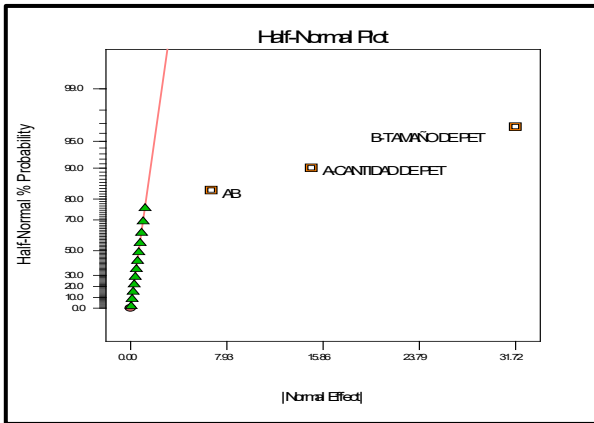


FIGURA 5.49: Gráfica de probabilidad normal  
Resistencia a la compresión 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

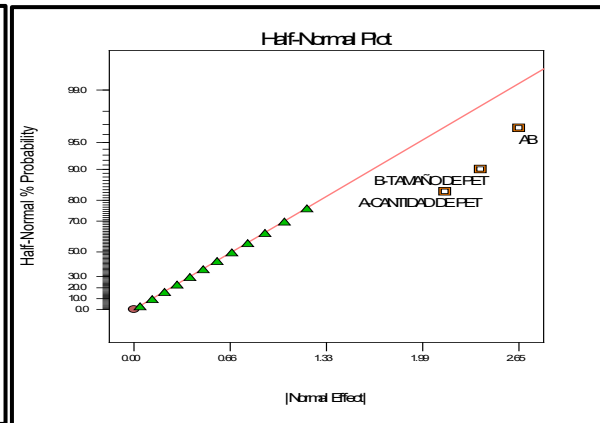


FIGURA 5.50: Gráfica de probabilidad normal  
Resistencia a la compresión 40% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.0

Posteriormente mediante el análisis de varianza (ANOVA), el estadístico F permite evaluar si el modelo es significativo y la probabilidad ( $p > 0,05$ ) que un valor F del modelo esté afectado por factores de ruido. Valores de probabilidad  $> F$  menores de 0,05, indican las variables significativas del modelo. En cambio si  $\text{Prob} < F$  es mayor a 0,1000 este factor no es significativo. La figuras 5.51 y 5.52 presentan los análisis de varianza para la resistencia a la compresión medida a los hormigones fabricados con un 20% y 40% de PPE.

Response	1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	80323.53	5	16064.71	256.63	< 0.0001 significant
A-CANTIDAD DE PET	14285.82	2	7142.91	114.11	< 0.0001
B-TAMAÑO DE PET	62988.84	1	62988.84	1006.25	< 0.0001
AB	3048.87	2	1524.43	24.35	< 0.0001
Pure Error	751.17	12	62.60		
Cor Total	81074.70	17			

FIGURA 5.51: Análisis de varianza Resistencia a la compresión 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.

Response	1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
ANOVA for selected factorial model						
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	4739.06	5	947.81	4.45	0.0159	significant
A-CANTIDAD DE PET	1465.81	2	732.90	3.44	0.0659	
B-TAMAÑO DE PET	1215.24	1	1215.24	5.70	0.0342	←
AB	2058.00	2	1029.00	4.83	0.0289	←
Pure Error	2556.70	12	213.06			
Cor Total	7295.76	17				

FIGURA 5.52: Análisis de varianza Resistencia a la compresión 40% PPE

Fuente: Software DesignExpert 9.

De acuerdo a las gráficas de probabilidad normal y los análisis de varianzas realizados, la resistencia a la compresión, indica que tanto para los hormigones confeccionados con 20% y 40% de PPE, existe una influencia estadísticamente significativa de la cantidad de PET incorporado y del tamaño de PET utilizado. Al aumentar el contenido de PET disminuye la resistencia a la compresión, siendo el tamaño de PET Fino el que produce una menor resistencia a la compresión.

Para ver la interacción de ambas variables, se analizaron las figuras 5.53 y 5.54, en donde se observa de color verde los hormigones con PET grueso, y de color rojo los hormigones con PET fino. En ambas interacciones se puede observar que los hormigones con PET fino presentan una menor resistencia a la compresión en comparación con los que contienen PET grueso y para ambos tipos de PET se observa que a medida q se incorpora este material, disminuye su resistencia la compresión.

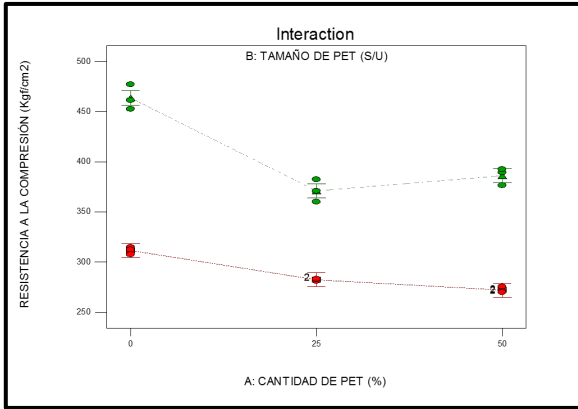


FIGURA 5.53: Interacción Resistencia a la Compresión v/s Cantidad PET para 20% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.

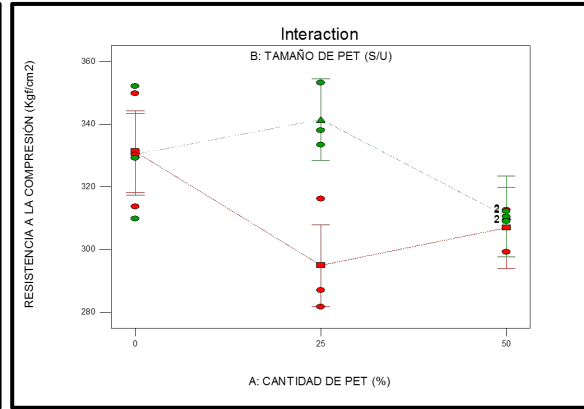


FIGURA 5.54: Interacción Resistencia a la Compresión v/s Cantidad PET para 40% PPE  
Fuente: Software DesignExpert 9.

## **CAPITULO VI: CONCLUSIONES**

### **6.1 Generalidades**

En este último capítulo se desarrollan las conclusiones, las cuales fueron estructuradas de acuerdo al planteamiento de objetivos e hipótesis.

### **6.2 Relacionado con el objetivo general e hipótesis**

Con respecto al objetivo general, de acuerdo al estudio realizado, se observa que la incorporación de PET en distintos contenidos (25% y 50%) y tamaños variables (Fino y Grueso), no produce una influencia estadísticamente significativa en la retracción hidráulica de los hormigones fabricados con distintos contenidos de Perlas de Poliestireno Expandido (20% y 40%). De acuerdo con esto y para efectos de la Retracción hidráulica es posible el uso de PET en reemplazo de las Perlas de PPE.

La hipótesis planteada en esta tesis, que señala que la incorporación de PET reciclado como sustituto de perlas de poliestireno expandido, disminuirá la retracción hidráulica del hormigón, se refuta.

### **6.3 Relacionado con los objetivos específicos**

El incremento de porcentaje de reemplazo de las perlas de poliestireno expandido por PET reciclado, no influye sobre la retracción hidráulica.

Los distintos tamaños de PET reciclado incorporados en la mezcla, tampoco influyeron en la retracción hidráulica del hormigón.

En relación a la propiedad mecánica estudiada, se pudo observar una disminución en la resistencia a la compresión al aumentar el contenido de PET reciclado, siendo el tamaño de PET Fino el que produce una menor resistencia a la compresión.

Se puede concluir de este estudio, que a pesar de que el módulo de elasticidad del PET sea mayor que el módulo de elasticidad de las perlas de poliestireno expandido (condición que indica que al tener un módulo de elasticidad mayor, presenta mayores resistencias a la contracción y expansión, es decir, menores deformaciones), no es suficientemente mayor como para generar un efecto significativo sobre la retracción hidráulica del hormigón, debido a los bajos contenidos utilizados en esta investigación, no obstante, si lo fue para la resistencia a la compresión.

## BIBLIOGRAFÍA

ACI 213R (1987). Guide for structural lightweight-aggregate concrete. Estados Unidos: American concrete Institute.

ACI 224R-90 (1990). Control de la fisuración en Estructuras de hormigón. Estados Unidos: American Concrete Institute.

ASIPLA (2012) Perfil de la industria del plástico 2012 [En línea] <<http://www.asipla.cl/wp-content/uploads/2010/09/Datos-Industria-PI%C3%A1stico-Chile-2012-Datasur.pdf>> [Consulta: 20 de Diciembre de 2013].

ALESMAR, L., RENDON, N., y KORODY, M. (2008). Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (pet)-cemento. Revista Facultad Ingeniería UCV. 23(1): 76-86.

ARANDES, J., BILBAO, J., y LÓPEZ, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. Revista Iberoamericana de Polímeros, 5(1).

CASTAÑO, J (2009). Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados. Tesis para optar al Título de Máster en Ingeniería de Construcción. Universidad Politécnica de Valencia.

COSTA, A. (2012). Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla . Tesis para optar al Título de Master en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Cataluña.

GAGGINO, R. (2008). Componentes constructivos elaborados con una mezcla cementicia y agregados de plásticos reciclados. En: 2do Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales: 16 - 17 Octubre 2008. Córdoba, Argentina, Centro Experimental de la Vivienda Económica. CEVE - CONICET. 6p

GARCIA, E. (2011). "Estudio de retracción en una estructura real: estudio teórico y contrastación experimental" Tesis para optar al Título de Master en Ingeniería de estructuras, cimentaciones y materiales, Universidad Politécnica de Madrid.

GIANI, R., NAVARRETE, B., y BUSTOS J. (2008). La Retracción Autógena y su Relación con la Tendencia a la Fisuración a Temprana Edad en Pavimentos de Hormigón. Revista de la Construcción, 7(2): 62-71

- IGLESIAS, H. (2011). Comportamiento del hormigón al reemplazar áridos por plástico reciclado. Memoria para optar al Título de Ingeniero Constructor, Universidad de Valparaíso, Valparaíso.
- KOSMATKA et al (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Estados Unidos: Portland Cement Association.
- LAGOS, C. (2008). Proyecto planta recicladora de PET. Tesis para optar al grado de magister en gestión y dirección de empresas, Universidad de Chile, Santiago.
- MALDONADO, M., y MEDINA, C. (2008). Diseño y construcción de una extrusora con capacidad de 1 kg/h, diseño del proceso y diseño del producto para el reciclaje mecánico del PET. Tesis para optar al Título Ingeniero Mecánico. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.
- MEHTA, P., y MONTEIRO, P. (1998). "Concreto: estructura, propiedades y materiales"
- MODRO, NLR., MODRO, NR., y OLIVEIRA, APN. (2009). Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. Matters (Rio J.), vol.14, n.1, p. 725-736
- MUNIZAGA, G. (2009). Fisuración por retracción en hormigones: influencia del tipo de cemento. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- NEVILLE, A.M. (1995). Properties of Concrete, 4th ed., Longman Group, Londres, Inglaterra.
- NEVILLE, A. (1996). Tecnología del concreto. Londres Pitman Publishing.
- NEVILLE, A. (1999). "Elasticity, Shrinkage and Creep". Properties of concrete. Fourth and final edition.
- NCh 148, Of.98 (1998). Cemento- Terminología, clasificación y especificaciones generales – Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- NCh 163, Of.2013 (2013). Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales –Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- NCh 164, Of.76 (1976). Áridos para morteros y hormigones – Extracción y preparación de muestras - Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- NCh. 1018, Of.77 (1977). Hormigón – Preparación de mezclas de prueba en laboratorio - Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

NCh. 1037 Of.77 (1977). Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas - Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

NCh 1116, Of.77 (1977). Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente - Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

NCh 1117 Of77. (1977). Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad real y neta y la absorción de agua de las gravas - Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

NCh 1239 Of77. (1977). Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad real y neta y la absorción de agua de las arenas - Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

NCh. 1498 Of.82 (1982). Hormigón – Agua de amasado – Requisitos - Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

NCh 2221, Of10. (2010). Hormigón y mortero – Método de ensayo – Determinación de los cambios de longitud. Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

NCh 1037, Of77. (1977). Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas – Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

NCh 1038, Of77. (1977). Hormigón – Ensayo de tracción por flexión – Normativa Chilena, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

POWERS, T. C. (1939). The bleeding of portland cement paste, mortar and concrete. Portl. Cem. Assoc. Bul N°2.

SOLAS, A y GIANI, R. (2010). Tecnología del hormigón avanzada. Santiago: Universidad Católica de Chile.

SWAYZE, M. A. (1942). Early concrete volumen change and their control. Estados Unidos: American concrete Institute.

VIDELA, C., y AGUILAR, C. (1999). Evaluación de la efectividad de procedimientos para la reducción de la retracción hidráulica en hormigones fabricados con cementos portland puzolánicos. Ingeniería de Construcción, (20): 17-26

VIDELA, C., y AGUILAR, C. (2000). Análisis del impacto de los parámetros de dosificaciones en la retracción hidráulica de hormigones. Ingeniería de construcción, 15(2)

VIDELA, C., y AGUILAR, C. (2005a). Proposición de un modelo de predicción de retracción hidráulica por secado para hormigones chilenos. Materiales de Construcción, 20(2): 139-152

VIDELA, C., y AGUILAR, C. (2005b). Retracción por secado de hormigones con cemento Portland puzolánico y aditivos reductores de retracción. Materiales de Construcción, 55(278): 13-28

VIDELA, C. y LOPEZ, M., 2000. Dosificación de hormigones estructurales con áridos livianos. Revista Bit, 2000.