



Facultad de ingeniería  
Escuela de Construcción Civil

# **Influencia de la incorporación de parafina sólida encapsulada, sobre las propiedades de resistencia a compresión y aislación térmica del hormigón**

Por  
**Víctor Andrés Pinto Borquez**

Memoria para optar al grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al Título de Ingeniero Constructor

Profesor Guía  
**Juan Eduardo Egaña Ramos**

2018

*En tiempos de cambio, quienes estén abiertos al aprendizaje se adueñarán del futuro, mientras que aquellos que creen saberlo todo estarán bien equipados para un mundo que ya no existe.*

*Eric Hoffer*

*Dedicado a mi familia*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi familia, en especial a mis padres, Victor y Carmen, quienes me acompañaron, guiaron y apoyaron durante todo este largo proceso. A mis hermanos, quienes me brindaron ayuda y soporte cuando lo necesite.*

*A mis amigos, los que me apoyaron incondicionalmente, aquellos que estuvieron ahí conmigo en las buenas y en las malas, en especial a Fabian y Kathy, amigos desde siempre.*

*A mi compadre universitario Miguel, con quien compartimos toda la carrera apoyándonos mutuamente, demostrando que con esfuerzo se logran las metas.*

*A mis profesores, quienes dedicaron tiempo instruyéndome, en especial a Rodrigo Meneses, excelente profesor, aquel que me guio durante un año en una de las asignaturas más difíciles para mi dentro de la universidad. A mi profesor guía, Juan Egaña, el que estuvo junto a mi durante todo el proceso de investigación.*

*A todos en general los que de forma directa o indirecta ayudaron en la realización y finalización de esta, una etapa importante de mi vida.*

*Gracias a todos aquellos que formaron parte en este capítulo.*

## ÍNDICE

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	10
LISTA DE TABLAS.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	12
RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	14
<b>1. ANTECEDENTES GENERALES.....</b>	<b>16</b>
1.1. Introducción.....	16
1.2. Objetivos de la investigación.....	17
1.2.1. Objetivo general .....	17
1.2.2. Objetivos específicos.....	17
1.3. Alcances de la investigación .....	17
1.4. Estructura de la tesis .....	17
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
2.1. Generalidades .....	19
2.2. Antecedentes generales del hormigón .....	19
2.2.1. Hormigón en estado fresco .....	20
2.2.2. Hormigón endurecido .....	21
2.3. Retracción.....	21
2.3.1. Tipos de retracción.....	22
2.4. Componentes del Hormigón.....	22
2.4.1. Cemento .....	22
2.4.2. Áridos.....	23

2.4.3.	Agua.....	24
2.5.	Ensayos para realizar durante estado fresco y endurecido al hormigón. ....	25
2.5.1.	Asentamiento .....	25
2.5.1.1.	Medición del asentamiento .....	25
2.5.2.	Resistencia mecánica .....	27
2.5.2.1.	Resistencia a la compresión.....	27
2.6.	Materiales cambio de fase .....	28
2.6.1.	Generalidades de los materiales cambio de fase.....	28
2.6.1.2.	Consideraciones fundamentales sobre el almacenamiento de calor latente y sensible. ....	29
2.6.2.	Tipos de materiales cambio de fase. ....	29
2.6.2.1.	Criterios para PCM de uso en general .....	30
2.6.3.	Encapsulaciones para materiales PCM .....	30
2.6.4.	Uso de PCM en la construcción .....	33
2.7.	Generalidades térmicas.....	33
2.7.1.	Aislación térmica.....	33
2.7.2.	Transferencia de calor .....	33
2.7.2.1.	Calor .....	34
2.7.2.2.	Temperatura.....	34
2.7.3.	Flujo de calor y densidad de flujo .....	34
2.7.4.	Conductividad térmica .....	35
2.7.5.	Resistencia térmica .....	35
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	37
3.1.	Esquema metodológico.....	37
3.2.	Generalidades .....	38
3.2.1.	Programa experimental .....	38
3.2.2.	Diseño de la experiencia .....	38

3.2.	Planteamiento y definición de variables .....	39
3.2.3.	Detalles experimentales.....	39
3.2.3.1.	Caracterización de los materiales .....	39
3.3.	Preparación y clasificación de la parafina sólida.....	39
3.3.1.	Encapsulación de la parafina sólida.....	39
3.3.2.	Caracterización de las cápsulas de parafina sólida .....	40
3.4.	Dosificaciones, preparación de las probetas, curado y ensayos.....	40
3.4.1.	Dosificaciones .....	40
3.4.2.	Preparación de las probetas.....	40
3.4.3.	Tratamiento de curado.....	41
3.4.4.	Ensayos .....	41
3.4.4.1.	Procedimiento para medir asentamiento según NCh 1019 Of. 74.....	41
3.4.4.2.	Ensayo de compresión en probetas cubicas.....	42
3.4.4.3.	Aislación térmica .....	43
4.	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO .....	46
4.1.	Introducción.....	46
4.2.	Parafina sólida .....	46
4.2.1.	Fundición y determinación de las temperaturas de fusión y solidificación de la parafina sólida .....	46
4.2.2.	Fabricación de los cubos de parafina .....	48
4.2.3.	Encapsulación de la cera de parafina.....	49
4.2.4.	Medición de la densidad real y aparente suelta de las cápsulas de cera de parafina .....	50
4.3.	Caracterización de áridos .....	50
4.3.1.	Granulometría de la arena .....	50
4.3.2.	Granulometría de la grava.....	52
4.3.3.	Densidad real, neta y absorción de agua de los áridos .....	53
4.4.	Dosificación.....	55

4.4.1.	Cono de Abrams y verificación del asentamiento para la dosificación de prueba .....	56
4.4.2.	Pruebas preliminares .....	57
4.4.3.	Dosificación de hormigón corregida .....	57
4.5.	Dosificación de hormigón con cápsulas de parafina y patrón .....	58
4.6.	Confección de las coladas de hormigón.....	58
4.6.1.	Coladas de hormigón .....	58
4.6.2.	Dosificación para 50 litros .....	59
4.6.3.	Preparación de los moldes .....	60
4.6.4.	Determinación de docilidad de la mezcla .....	60
4.6.5.	Llenado, desmolde y curado de probetas .....	61
5.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	64
5.1.	Generalidades .....	64
5.2.	Obtención y análisis de resultados preliminares .....	64
5.2.1.	Coladas y nomenclaturas .....	64
5.3.	Propiedades en estado fresco .....	64
5.3.1.	Ensayos de asentamientos .....	64
5.3.2.	Relaciones agua cemento de cada una de las coladas .....	65
5.4.	Ensayo térmico.....	67
5.4.1.	Resultados ensayo térmico panel patrón .....	69
5.4.2.	Resultados ensayo térmico panel con 6% de reemplazo de cápsulas de parafina encapsulada .....	71
5.4.3.	Resultados ensayo térmico panel con 9% de reemplazo de cápsulas de parafina encapsulada .....	73
5.4.4.	Resultados ensayo térmico panel con 12% de reemplazo de cápsulas de parafina encapsulada .....	74
5.5.	Superposición de temperaturas en los paneles .....	76
5.5.1.	Superposición de temperaturas en cara A de los paneles.....	76
5.5.2.	Superposición de temperaturas en cara B de los paneles.....	77
5.5.3.	Superposición de temperaturas en ambas caras de los paneles .....	78

5.6.	Resistencias y densidades de los hormigones.....	79
5.6.1.	Resultados ensayo resistencia a compresión a 28 días .....	79
5.6.2.	Densidades de los hormigones a los 28 días .....	82
5.7.	Observaciones luego de los ensayos .....	82
6.	CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE FUTURAS INVESTIGACIONES .....	85
6.1.	Conclusiones .....	85
6.2.	Propuestas para futuras investigaciones .....	86
	BIBLIOGRAFIA .....	87
	ANEXOS .....	90

**LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS**

PCM	=	Phase change materials, material cambio de fase.
kJ	=	kilo Joule.
kg	=	kilogramos.
kgf	=	kilogramo fuerza.
°C	=	Grados Celsius.
RT	=	Resistencia a la Tracción.
RC	=	Resistencia a Compresión.
mm	=	milímetros.
mm <sup>2</sup>	=	milímetros cuadrados.
m <sup>3</sup>	=	metros cúbicos.
mPa	=	mega Pascal.
Idiem	=	Instituto de Investigación y Ensayos de Materiales.
NCh	=	Norma Chilena.
Of	=	Oficial.
seg	=	segundo.

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1: Cantidad de probetas y porcentajes de PCM.....	41
Tabla 4.1: Densidades real y aparente suelta de las cápsulas de parafina.....	50
Tabla 4.2: Granulometría de la arena.....	50
Tabla 4.3: Granulometría de la grava, Dn 20 mm.....	52
Tabla 4.4: Densidad real, neta y absorción de agua de la grava.....	53
Tabla 4.5: Densidad real, neta y absorción de agua de la arena.....	54
Tabla 4.6: Resumen densidad real, neta y absorción de agua de la arena y grava.....	54
Tabla 4.7: Resistencia en hormigones de prueba a los 28 días.....	57
Tabla 4.8: Cantidad de material a usar por colada.....	59
Tabla 5.1: Tipos de hormigón.....	64
Tabla 5.2: Asentamiento y demanda de agua en función de porcentajes de reemplazo.....	64
Tabla 5.3: Humedad libre en áridos.....	65
Tabla 5.4: Agua final utilizada por colada.....	66
Tabla 5.5: Relación agua / cemento por colada.....	66
Tabla 5.6: Temperaturas significativas hormigón patrón.....	70
Tabla 5.7: Temperaturas significativas panel HC-6%.....	72
Tabla 5.8: Temperaturas significativas panel HC-9%.....	74
Tabla 5.9: Temperaturas significativas panel HC-12%.....	75
Tabla 5.10: Resistencia en MPa y porcentaje de pérdida de resistencia.....	79
Tabla 5.11: Coeficiente de correlación.....	80
Tabla 5.12: Resumen de resistencias y desviación estándar de los grupos.....	81
Tabla 5.13: Densidades promedio de los hormigones.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Cono de Abrams.....	26
Figura 2.2: Determinación de asentamiento de cono de Abrams.....	26
Figura 2.3: Ensayo de resistencia a compresión.....	27
Figuro 2.4: Gráfico de calor necesario para elevar la temperatura del agua.....	28
Figura 2.5: Macrocápsulas plásticas de PCM.....	31
Figura 2.6: Macrocápsulas metálicas de PCM.....	31
Figura 2.7: Microcápsulas de cera de parafina.....	32
Figura 2.8: Panel thermalcore con microcápsulas de PCM incorporado.....	32
Figura 3.1: Esquema metodológico.....	37
Figura 3.2: Cámara térmica.....	43
Figura 3.3: Xplorer GLX.....	44
Figura 4.1: Medición de la temperatura de fusión de la parafina.....	46
Figura 4.2: Medición de la temperatura de solidificación de la parafina.....	47
Figura 4.3: Medición de la temperatura ambiente.....	47
Figura 4.4: Parafina en proceso de solidificación.....	48
Figura 4.5: Corte de los cubos de parafina sólida.....	48
Figura 4.6: Cubos de parafina sólida ya confeccionados.....	49
Figura 4.7: Parafina sólida encapsulada.....	49
Figura 4.8: Curva granulométrica de la arena, muestra corregida.....	51
Figura 4.9: Tamizado de la arena.....	51
Figura 4.10: Curva granulométrica de la grava.....	52
Figura 4.11: Tamizado de la grava.....	53
Figura 4.12, 4.13: Asentamiento del cono de Abrams.....	56
Figura 4.14: Probetas de prueba, con dosificación inicial.....	56
Figura 4.15: Preparación de moldes.....	60
Figura 4.16: Medición de asentamiento del cono de Abrams.....	61
Figura 4.17: Llenado de moldes.....	61
Figura 4.18: Vibrado de moldes.....	62
Figura 4.19: Desmoldaje de probetas.....	62
Figura 5.1: Esquema con ubicación panel y sensores en cámara térmica.....	67
Figura 5.2: Panel en posición dentro de la cámara térmica.....	68
Figura 5.3: Fuente generadora de calor.....	68
Figura 5.4: instrumentos usados en el experimento.....	69
Figura 5.5: Gráfico de temperatura en panel patrón.....	70
Figura 5.6: Gráfico de temperatura en panel con 6% de cápsulas.....	72
Figura 5.7: Gráfico de temperatura en panel con 9% de cápsulas.....	73
Figura 5.8: Gráfico de temperatura en panel con 12% de cápsulas.....	75
Figura 5.9: Gráfico comparativo de temperaturas en caras A de los paneles.....	76
Figura 5.10: Gráfico comparativo de temperatura en caras B de los paneles.....	78
Figura 5.11: Gráfico comparativo de temperatura en ambas caras de los paneles.....	78
Figura 5.12: Gráfico comparativo de resistencia a compresión en las probetas cúbicas.....	80
Figura 5.13: Gráfico con línea de tendencia de disminución de la resistencia.....	81
Figura 5.14: Panel con manchas debido a la rotura de cápsulas.....	83

## RESUMEN

Este Proyecto de investigación plantea el uso de parafina sólida encapsulada, incorporada al hormigón, para usar las propiedades de la parafina de almacenar energía en forma de calor latente y así reducir las variaciones de temperatura en edificaciones. Se pretende contribuir al conocimiento acerca del efecto que produce en la edificación, el calor latente acumulado en muros de hormigón de cemento portland puzolánico con material de cambio de fase (PCM).

Para cumplir con este propósito, la investigación se desarrollará considerando diversos aspectos: en primer lugar, se revisa y analiza la documentación disponible en la actualidad sobre almacenamiento de energía mediante calor latente en la construcción y, en particular, la aplicación de cápsulas de PCM en morteros y hormigones.

Se determinan los tipos de PCM, así como también el tipo de encapsulamiento.

Se obtienen conclusiones importantes respecto a los aspectos constructivos a considerar en la Incorporación de PCM al hormigón.

Se definen los distintos tipos de ensayos realizados, entre los que se encuentran ensayos de resistencias mecánicas y aislación térmica.

Durante la investigación se desarrolla un método para encapsular parafina en resina epóxica la cual es colocada en el hormigón en reemplazo de porcentajes de gravilla que van desde el 6% al 12% sobre los cuales se realizan ensayos térmicos en cámara térmica y ensayos de resistencia a compresión.

Los resultados obtenidos son satisfactorios logrando cumplir con el objetivo planteado de usar la parafina sólida con fines de almacenar energía en forma de calor latente, la resistencia a compresión disminuye a medida que se aumentan los porcentajes de cápsulas, alcanzando en promedio 32% de pérdida de resistencia para porcentaje de 12% de reemplazo.

Se determina de igual forma que el tipo de encapsulamiento utilizado debe mejorarse, sin embargo, el material cumple su cometido de aislar los dos ambientes fabricados en la cámara térmica.

**ABSTRACT**

*This research project proposes the use of encapsulated solid paraffin, incorporated into concrete, to use the properties of paraffin to store energy in the form of latent heat and thus reduce temperature variations in buildings. It is intended to contribute to the knowledge about the effect produced in the building, the latent heat accumulated in concrete walls of pozzolanic portland cement with phase change material (PCM).*

*To fulfill this purpose, the research will be developed considering various aspects:*

*Firstly, the documentation currently available on energy storage by means of latent heat in the construction and, in particular, the application of PCM capsules in mortars and concrete is reviewed and analyzed.*

*The types of PCM are determined, as well as the type of encapsulation.*

*Important conclusions are obtained regarding the constructive aspects to be considered in the Incorporation of PCM to concrete.*

*The different types of tests carried out are defined, among which are tests of mechanical resistance and thermal insulation.*

*During the investigation a method is developed to encapsulate paraffin in epoxy resin which is placed in the concrete in replacement of percentages of gravel that go from 6% to 12% on which thermal tests are carried out in thermal chamber and resistance tests to compression.*

*The results obtained are satisfactory achieving the objective of using solid paraffin for the purpose of storing energy in the form of latent heat, the resistance to compression decreases as the percentage of capsules increases, reaching an average of 32% loss of energy. resistance for 12% replacement percentage.*

*It is determined in the same way that the type of encapsulation used must be improved, however, the material fulfills its function of isolating the two environments manufactured in the thermal chamber*

*Capítulo I*  
*Antecedentes Generales*

# 1. Antecedentes generales

## 1.1. Introducción

El hormigón es uno de los materiales más ampliamente usados en construcción debido a sus diversas cualidades que lo hacen un material muy versátil. Entre las más importantes podemos mencionar: su fácil fabricación, materiales componentes de fácil acceso, bajo costo, moldeable, tiene distintos métodos de colocación y es reparable. Para mejorar aún más las características del hormigón las investigaciones no solo se refieren al comportamiento de este por sí solo, sino que también consideran el ambiente de exposición, es decir, el desempeño del hormigón en servicio.

Uno de los inconvenientes del hormigón es su coeficiente de transmitancia térmica, el cual, comparado con materiales aislantes térmicos, es elevado, El hormigón en comparación al poliestireno expandido de densidad 25 kg/m<sup>3</sup> es más conductor de calor en un factor de aproximadamente 45 unidades.

El coeficiente de transmitancia térmica corresponde a la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, que se transfiere a través de un sistema constructivo el cual puede estar formado por una o más capas de material de caras paralelas, cuando hay un gradiente térmico de 1 K de temperatura entre los ambientes que este material separa.

En estos tiempos en que el consumo de recursos crece cada año en edificaciones es que se hace necesario priorizar el consumo energético, ya que no solo permite reducir gastos, sino también limitar el uso de los combustibles fósiles, es por esto que se hace necesario buscar formas de acondicionamiento térmico pasivo (Abhat, 1983).

Es en este marco en que materiales de cambio de fase o PCM en adelante por sus siglas en inglés (Phase Change Materials), se vuelven interesantes en todo ámbito de áreas, por su capacidad de almacenar y liberar energía. En cuanto al área de construcción, el almacenamiento de energía en las paredes, el techo y el piso de los edificios se puede mejorar mediante la incorporación PCM, los que pueden aumentar la inercia térmica, disminuir los cambios de temperatura del aire en interiores y mejorar el rendimiento térmico de las habitaciones (Wang et ál., 2009). El almacenamiento por calor latente se usa menos en aplicaciones arquitectónicas que el calor sensible, pero su capacidad de acumulación es mucho mayor (Neila, 2004).

Debido al gran uso y versatilidad del hormigón y a la necesidad de ahorrar energía es que se plantea el uso de PCM incorporado en hormigón como fuente de almacenamiento activo de energía, en muros de viviendas, de modo de aprovechar esta energía, que está presente de forma gratuita.

Lo que se propone en esta investigación es incorporar adiciones de cápsulas de parafina sólida al hormigón, con el fin de utilizar las capacidades de esta de almacenar energía (Abhat,1983) para beneficio de las capacidades aislantes del hormigón, proponiendo distintas dosis y experimentando la relación existente entre la dosis de parafina sólida encapsulada y su influencia en la aislación térmica y resistencia a compresión.

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar la influencia de la incorporación de cera de parafina sólida encapsulada, sobre la aislación térmica y sobre la resistencia a compresión del hormigón.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Diseñar procedimiento de fabricación de las cápsulas de parafina sólida.
- Evaluar la influencia de dosis variables de parafina sólida encapsulada, sobre la aislación térmica del hormigón.
- Evaluar la influencia de dosis variable de parafina sólida encapsulada, sobre la propiedad de resistencia a compresión del hormigón.

## **1.3. Alcances de la investigación**

El desarrollo de esta investigación incluye una serie de ensayos, los cuales se realizan en los laboratorios docentes de la Escuela de Construcción Civil de la Universidad de Valparaíso.

El cemento a utilizar será Portland puzolánico grado corriente, se emplearán áridos fluviales de la zona de Valparaíso con grava de tamaño máximo nominal de 20 mm.

Se reemplazará grava por capsulas de parafina en proporciones de 6%, 9% y 12%, en volumen.

## **1.4. Estructura de la tesis**

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados en esta investigación, se recurrirá a la estructuración que se detalla a continuación:

Capítulo I consta de los antecedentes generales del estudio, se identifica la problemática que justifica la investigación realizada. Se plantean objetivos y alcances.

Capítulo II se genera el marco teórico sobre el cual se cimientan las bases de esta investigación, se presenta una recopilación de antecedentes bibliográficos de manera extensa y detallada, antecedentes relacionados con los conceptos que involucra esta investigación.

Capítulo III corresponde a la metodología de investigación a seguir, describiendo las propiedades a estudiar y los pasos para obtener un desarrollo experimental satisfactorio.

Capítulo IV se expone el desarrollo experimental de la experiencia en laboratorio.

Capítulo V se presenta una tabulación y análisis de resultados.

Capítulo VI Se desarrollan las conclusiones y se proponen nuevas investigaciones.

*Capítulo II*  
*Marco Teórico*

## **2. Marco teórico**

### **2.1. Generalidades**

Este capítulo presenta las bases teóricas que sustentan esta investigación. Consiste en una recopilación de conceptos, los cuales abarcan, tecnología del hormigón, que tienen relación con características en estado fresco y endurecido, características de áridos a utilizar y dosificaciones, transmisión de calor a través de materiales, tipos de materiales cambio de fase y capacidad de almacenamiento de energía, también se presentan distintos tipos de encapsulamientos.

Se muestra en detalle la parafina sólida como material de cambio de fase, siendo ésta la que tiene relación con los objetivos de esta investigación.

### **2.2. Antecedentes generales del hormigón**

El hormigón es sin lugar a dudas uno de los materiales de construcción más usados en el mundo. La norma chilena NCh. 170 Of. 2016 define hormigón como: “material que resulta de la mezcla de cemento, grava, arena, agua, eventualmente aditivos y adiciones en proporciones adecuadas que, al fraguar y endurecer, adquiere resistencia”.

Cuando el hormigón se encuentra recién mezclado debe presentar una condición plástica, que facilite las operaciones para su colocación y con el paso del tiempo este debe ser capaz de adquirir una cohesión y resistencia.

El hormigón es básicamente la resultante de la mezcla de agregados, un aglutinante y un medio de hidratación, formando así un material de dos fases: la pasta de cemento y los agregados. La pasta compuesta por cemento y agua es la que tiene como función unir los agregados, que normalmente son arena y grava, creando una masa que al fraguar es similar a la roca, esto se debe al endurecimiento de la pasta de cemento y el agua.

Por razones económicas y de estabilidad físico-químicas, es conveniente que la pasta de cemento sea sustentada por un esqueleto inerte. Esta función es la que desempeñan los áridos, que constituyen normalmente cerca del 65 a un 75 por ciento del volumen total del hormigón y el cual está compuesto por partículas de distinto tamaño. Generalmente los áridos los podemos clasificar en gruesos y finos. Las arenas corresponden a un árido fino y la NCh. 163 Of. 79 define como arena al “árido que pasa al menos el 95% por el tamiz # 4”. Las gravas corresponden a un árido grueso y la norma ya mencionada considera grava al árido que es retenido en un 95% en el tamiz nombrado anteriormente. Su selección es muy importante ya que no deben contener materiales que puedan causar deterioros, como materia orgánica, arcillas y sales entre otros (Zabaleta, 1992)

La calidad del hormigón depende de la calidad de la pasta, del agregado y de la mezcla entre ambos. En un hormigón fabricado apropiadamente, cada partícula de los agregados debe estar completamente cubierta por la pasta de cemento, así como también todos los espacios entre ellas. Esta calidad es influenciada de manera importante por la cantidad de agua usada respecto de la cantidad de cemento (Kosmatka et al., 2004).

### 2.2.1. Hormigón en estado fresco

Cuando el cemento entra en contacto con el agua se produce la hidratación, comenzando una serie de fenómenos físico-químicos, llamada fraguado, en donde se produce calor, esto se denomina reacción exotérmica y es conocida o denominada como “calor de hidratación”, la que varía según la norma ASTM C 186 entre 208 a 444 kJ/kg de cemento. Para la mayoría de los elementos de hormigón, tales como losas, el calor generado no trae preocupación porque el calor se disipa rápidamente en el ambiente. Sin embargo, en estructuras de grandes volúmenes, con espesor mayor que un metro, la tasa y la cantidad de calor generado son importantes. Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable de la temperatura del hormigón. Este aumento de temperatura puede ser indeseable, pues después del endurecimiento a altas temperaturas, el enfriamiento no uniforme de la masa de hormigón hasta la temperatura ambiente puede crear tensiones de tracción (esfuerzos de tensión) indeseables.

Por otro lado, el aumento de la temperatura en el hormigón causado por el calor de hidratación es frecuentemente beneficioso en clima frío, pues ayuda a mantener las temperaturas favorables para el curado.

En definitiva, algunas propiedades del hormigón fresco que se deben conocer y controlar son:

#### a) Docilidad

Se dice que un hormigón es dócil cuando presenta facilidades de colocación y resistencia a la segregación. Sin embargo, Neville (1995) señala que esta descripción es demasiado vaga para esta vital propiedad que posee el hormigón. La Docilidad que se desee lograr en una mezcla de hormigón depende de los métodos de compactación existentes y del lugar donde se desee colocar; por ende, una docilidad satisfactoria para un hormigón que se colocara en secciones amplias no es necesariamente suficientemente dócil para secciones delgadas, inaccesibles o muy reforzadas.

#### b) Segregación

Puede definirse como la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea de manera que su distribución deje de ser uniforme. Para el hormigón el tamaño de las partículas y la densidad de los componentes de la mezcla son los principales factores incidentes en la segregación. Principalmente se pueden identificar dos tipos de segregación, uno es cuando las partículas gruesas tienden a asentarse más que las finas y la otra es cuando se separa la lechada de la mezcla. Para controlar este fenómeno se recomienda elegir una granulometría adecuada y un manejo cuidadoso de la mezcla (Neville, 1995).

#### c) Exudación

Es un tipo de segregación que se manifiesta cuando parte del agua de la mezcla de hormigón recién colocado aflora en su superficie. Este fenómeno se produce por la decantación de materiales sólidos en la matriz del hormigón. Al encontrarse una película de agua en la superficie de contacto entre hormigón-hormigón, esta puede quedar atrapada en la junta formando un elemento poroso, débil y poco durable. Por otra parte, si el agua de exudación se encuentra sometida a la terminación del hormigón como puede ser el platachado, esta se vuelve a mezclar dejando una superficie débil al desgaste. La

superficie del hormigón al estar en presencia de agua y siendo mayor la velocidad de evaporación que la velocidad de exudación se producen grietas plásticas por contracción (Neville, 1995)

### 2.2.2. Hormigón endurecido

#### a) Resistencia

La resistencia a compresión puede definirse como la capacidad del hormigón de resistir cargas por unidad de área especificada normalmente a los 28 días de edad. Esta se logra mediante el diseño de la mezcla y está en función de la relación agua/cemento, de manera que al disminuir esta relación aumenta la resistencia a compresión. Además de contribuir de manera positiva en la compresión también se pueden ver afectadas de manera positiva otras propiedades como son, la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción y a la adherencia acero hormigón.

Teóricamente la resistencia a tracción del hormigón es aproximadamente  $1/8$  a  $1/12$  de la resistencia a compresión, pero no existe una relación lineal; la relación de  $R_t/R_c$  (resistencia a compresión; resistencia a tracción) depende de la calidad del hormigón y es menor cuando mayor es la  $R_c$  (Videla, 2010).

#### b) Permeabilidad

La versatilidad del hormigón como material de construcción lo ha llevado a lugares donde se requiere retenciones de agua y en condiciones severas de exposición donde debe ser casi impermeable o estanco. La estanqueidad es normalmente conocida como la habilidad del hormigón de retener agua sin escurrimiento ni escape visible. La permeabilidad es la cantidad de agua que migra a través del hormigón. La disminución de la permeabilidad del hormigón aumenta la resistencia al congelamiento, la saturación, la penetración de sulfatos, iones cloruros y otros ataques químicos. Una baja relación agua cemento también reduce la segregación y exudación además de contribuir para la estanqueidad. Se debe tener en cuenta que un hormigón estanco no debe tener fisuras, huecos, ni vacíos visibles (Neville, 1995).

#### c) Resistencia a la abrasión

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas son expuestos a abrasión o al desgaste, por lo que en estas aplicaciones el hormigón necesita tener alta resistencia a la abrasión. Los resultados de los ensayos indican que la resistencia a la abrasión está fuertemente relacionada con la resistencia a compresión del hormigón. Un hormigón con mayor resistencia a compresión tiene más resistencia a la abrasión que un hormigón con menor resistencia a compresión (Neville, 1995).

## 2.3. Retracción

La retracción es la deformación del hormigón en estado fresco o endurecido, la cual no depende de una carga externa aplicada y se manifiesta mediante variaciones de volumen del hormigón durante el proceso de fraguado en sus primeras horas, o cuando se encuentra ya endurecido días o meses después y se produce con la simple pérdida del agua (Carvajal et ál, 2009)

Al producirse pérdida de agua en la mezcla del hormigón análogamente se produce una pérdida de volumen que puede producir tensiones internas de tracción las cuales causan la fisuración por retracción, aunque en este fenómeno también, influyen otros factores (relacionados con el diseño, condiciones ambientales y de ejecución), la retracción puede ser más o menos significativa y por ende la consecuencia de fisuración en el hormigón variará en cantidad y magnitud.

### 2.3.1. Tipos de retracción

De los diferentes tipos de mecanismos de retracción los investigadores coinciden en identificar tres tipos, que son los más relevantes relacionados con este fenómeno:

**Retracción plástica**, también llamada retracción capilar, es producida por la pérdida de humedad del hormigón en estado fresco durante las primeras horas después de colocado.

**Retracción química**, se refiere a diversos tipos de retracción en que su origen se radica en las reacciones químicas a nivel intrínseco del hormigón. Para esta investigación solo se considera la retracción autógena ya que es poco considerada normalmente y la misma se desarrolla en las primeras edades del hormigón.

**Retracción hidráulica**, o retracción por secado, se presenta en el hormigón ya endurecido y tiene que ver con la pérdida de humedad de este ante la existencia de un gradiente de humedad entre el hormigón y el ambiente.

## 2.4. Componentes del Hormigón

### 2.4.1. Cemento

Es un conglomerante, que da cohesión, se presenta en forma de polvo que se obtiene de pulverizar duras rocas (caliza) y arcilla, luego quemarlas en un horno rotatorio y agregar yeso, y de nuevo molerla. Tiene la particularidad de endurecerse con el agua y producir compuestos mecánicamente resistentes.

Estos conglomerantes hidráulicos, convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus componentes, formando productos hidratados, resistentes y estables tanto al aire como bajo agua.

El clínker es el producto de la mezcla y la calcinación de piedra caliza y arcilla, a unos 1500°C es el componente principal del cemento.

El cemento se presenta en forma de un polvo finísimo, de color gris que, mezclado con agua, forma una pasta que endurece tanto bajo agua como al aire (aglomerante hidráulico).

Se obtiene mediante un proceso de fabricación que utiliza principalmente dos materias primas:

1. Una caliza, con alto contenido de calcio en forma de óxidos de calcio.
2. Un componente rico en sílice, conformado por arcilla, la cual proporciona alúmina y hierro; o eventualmente por una escoria de alto horno.

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

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

Estos se presentan en forma de 4 fases mineralizadas, en conjunto con una fase vítrea, integrada por los dos últimos, estas fases constituyen un 95% del peso total del clínquer, siendo el 5% restantes componentes menores, principalmente óxidos de sodio, potasio, titanio, residuos insolubles y otros. El clínquer es sometido a molienda mediante molinos de bolas hasta convertirlo en el polvo finísimo ya mencionado, adicionándose en esta etapa una proporción de yeso alrededor de un 5% de su peso, destinado a regular el proceso de fraguado de la pasta de cemento, la que de otra manera endurecería en forma casi instantánea. El cemento así obtenido se denomina cemento Portland. Durante la molienda se puede adicionar otros productos naturales o artificiales, constituyendo así los cementos Portland con adiciones o especiales, los que junto con mantener las propiedades típicas del Portland puro (fraguado y resistencia), poseen, además, otras cualidades especialmente relacionadas con la durabilidad, resistencia química y otras (Gomá, F, 1979).

#### 2.4.2. Áridos

Los áridos son un material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables (NCh 163 of 79), que se emplea en la construcción para la fabricación de mezclas destinadas a ser aglomeradas por un cemento.

El tamaño de los áridos varía entre 0.08 mm y 50 mm, estos ocupan entre 65 y 75% del volumen total del hormigón, lo que influye significativamente en las propiedades del hormigón, incluyendo la resistencia a la compresión y flexo tracción.

Los áridos pueden ser obtenidos de dos maneras, de acuerdo a esto se denominan áridos naturales o áridos tratados. Los áridos naturales son procedentes de yacimientos pétreos y no han sido sometidos a tratamiento mecanizado. En cambio, los áridos tratados son los que se han sometido a procesos de trituración, clasificación por tamaños y/o lavados en operaciones mecanizadas controladas.

Los áridos se clasifican según el tamaño de sus partículas en dos tipos: arena y grava. Las gravas se clasifican según los tamaños límites de sus partículas.

La norma chilena 163 define como arena (árido fino) al árido que pasa por el tamiz de abertura nominal de 5 mm y es retenido en el de 0.08 mm con las tolerancias establecidas en la citada norma. También define como grava (árido grueso) al árido retenido en el tamiz de abertura nominal de 5 mm con las tolerancias establecidas.

Los agregados pétreos tanto los finos como los gruesos que se utilizan para la fabricación de hormigones, deben cumplir con las exigencias de dicha norma (NCh 163 Of 79).

La granulometría de un árido, es la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que lo constituyen, determinada de acuerdo a la NCh 165 Of 77.

El tamaño máximo absoluto de un árido ( $D_a$ ) corresponde a la abertura del menor tamiz de las series establecidas en la NCh 165 Of 77, que deja pasar el 100% de la masa del árido.

El tamaño máximo nominal de un árido ( $D_n$ ) corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor que  $D_a$ , cuando por dicho tamiz pase el 90% o más de la masa de un árido. Cuando pasa menos del 90%, el tamaño máximo nominal se considerará igual al tamaño máximo absoluto.

Los áridos deben estar constituidos por partículas duras, de forma y tamaño estables y deben estar limpios y libres de terrones, partículas blandas o laminadas, arcillas, impurezas orgánicas, sales y otras sustancias que por su naturaleza o cantidad afecten la resistencia o la durabilidad de morteros y hormigones, de acuerdo con los valores límites (NCh 163 Of 79).

El uso de arenas muy gruesas produce hormigones poco manejables y segregables, aspectos que no se desean en un hormigón.

Las especificaciones del tamaño máximo de los áridos en el hormigón son importantes para lograr uniformidad de las mezclas, impermeabilidad y calidad en la textura superficial del hormigón y finalmente para optimizar la dosis de cemento.

### 2.4.3. Agua

El agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la estrictamente necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo la resistencia del mismo. Sin embargo, una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua.

Durante el fraguado y primer endurecimiento del hormigón se añade el agua de curado para evitar la desecación y mejorar la hidratación del cemento, para cementos Portland, según el método Vicat, el tiempo de fraguado inicial se estima entre 1,5 y 2,5 horas aproximadamente dependiendo del tipo de cemento (I, II, III, IV o V).

Tanto el agua destinada al amasado, como la destinada al curado deben ser aptas para cumplir su función. El agua de curado es muy importante que sea apta pues puede afectar más negativamente a las reacciones químicas cuando se está endureciendo el hormigón. Normalmente el agua apta suele coincidir con la potable y están normalizados una serie de parámetros que debe cumplir. Así en la normativa está limitado el pH, el contenido en sulfatos, en ion cloro y los hidratos de carbono.

Cuando una masa es excesivamente fluida o muy seca hay peligro de que se produzca el fenómeno de la segregación (separación del hormigón en sus componentes: áridos, cemento y agua). Suele presentarse cuando se hormigona con caídas de material superiores a los 2 metros.

Según NCh 1498 of 82 el agua debe cumplir con los siguientes requisitos para ser utilizada en el hormigón.

1. El agua potable de la red puede utilizarse como agua de amasado siempre que no se contamine antes de su uso
2. Se permite el empleo de agua de mar en hormigones simples de resistencia característica a la compresión inferior a 15 Mpa (150 Kg/cm<sup>2</sup>) siempre que no exista otra fuente de agua disponible en la zona.
3. No se permite el empleo de agua que contenga azúcares como sacarosa, glucosa o similares.
4. Puede emplearse agua de otro origen o procedencia o cuya calidad se desconozca, siempre que cumpla con los requisitos químicos básicos.

## **2.5. Ensayos para realizar durante estado fresco y endurecido al hormigón.**

### 2.5.1. Asentamiento

Es una indicación de la docilidad que tiene el hormigón, la cual se mide en la práctica corriente de las obras mediante el ensayo del asentamiento de cono según NCh 1019.

#### 2.5.1.1. Medición del asentamiento

El ensayo se lleva a cabo en un molde con forma troncocónica (Fig. 2.1), fabricado en acero galvanizado, sus bases son 200 mm para la inferior y 100 mm para la superior, con una altura de 300 mm, al momento del ensayo el molde debe estar humedecido y colocado sobre una chapa metálica no absorbente. Este cono es conocido como cono de Abrams, cuenta con 2 asas para manos y dos pisaderas para pies, para el ensayo se sujeta fuertemente el molde ayudándose de las asas para los pies, el cual está sobre la chapa metálica y se procede a llenar en tres tandas, llenando un tercio del molde cada vez. Con ayuda de una barra metálica de punta semiesférica de 16 mm de diámetro, se procede al compactado de cada una de las capas, aplicando 25 pinchazos distribuidos uniformemente en la superficie de la capa, de modo que penetren hasta la capa inferior. Una vez compactada la última capa, se retira el hormigón excedente y se enrasa la base superior. Acto seguido, se levanta cuidadosamente el molde en dirección vertical. Finalmente se coloca el molde al lado del hormigón que queda luego de retirar el molde y se mide la diferencia de altura entre la base superior del molde y la superficie del hormigón, con aproximación de 0,5 cm, la medición se realiza en el eje central del molde en su posición primitiva (Fig. 2.2). Si el hormigón moldeado se inclina hacia un lado o sufre disgregaciones, se debe repetir el ensayo; en caso de que por segunda vez se presente este fenómeno, considerar que el hormigón no es apto para efectuar el ensayo de asentamiento por carecer de la plasticidad y cohesión necesarias.

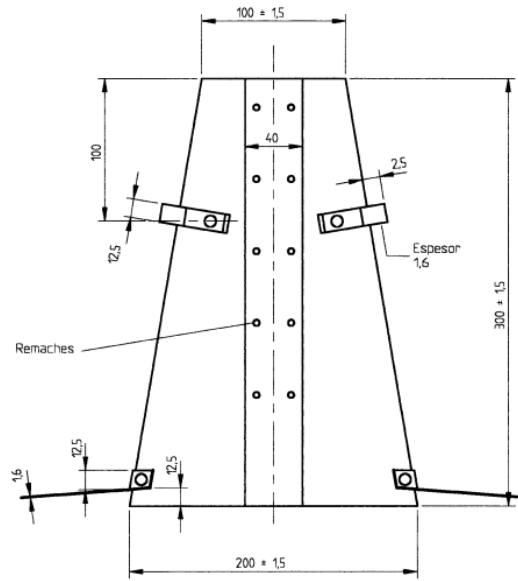


Figura 2.1: cono de Abrams.

Fuente: NCh 1019 Of. 74.

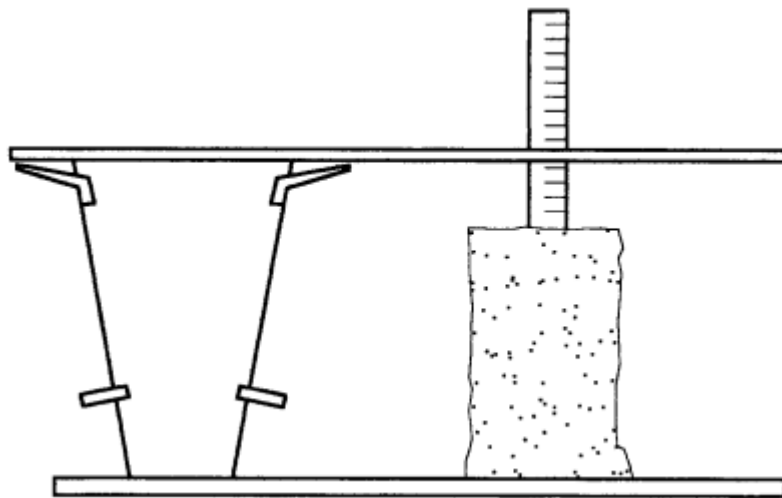


Figura 2.2: Determinación de asentamiento del cono.

Fuente: NCh 1019 Of. 74.

## 2.5.2. Resistencia mecánica

Es la capacidad que tiene el hormigón para soportar las cargas que se apliquen sin agrietarse o romperse.

### 2.5.2.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial. Normalmente, se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado o mega pascales, a una edad de 28 días. Se estima como resistencia de trabajo del hormigón la que logra este a los 28 días, sin embargo, a mayores edades, como 90 días, la resistencia a compresión del hormigón habrá aumentado respecto de la edad primigenia a los 28 días, este aumento de resistencia depende del tipo de cemento utilizado, así como también de los distintos tipos de aditivos que se puedan emplear.



Figura 2.3: ensayo de resistencia a compresión.

Fuente: Instron, laboratorio de ensayos, 2017.

## 2.6. Materiales cambio de fase

### 2.6.1. Generalidades de los materiales cambio de fase

Los materiales cambio de fase o PCM por sus siglas en inglés (Phase Change Material), en adelante, son materiales con un alto calor latente que, a la temperatura de cambio de fase (sólido ↔ líquido y viceversa), son capaces de almacenar o liberar grandes cantidades de energía. El interés de este tipo de materiales radica en que, durante el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante mientras que el material va absorbiendo o liberando energía. La temperatura de cambio de fase es característica de cada PCM. Se trata de materiales inteligentes y pasivos, los cuales actúan de manera reversible en base a las condiciones térmicas del entorno. En general son materiales de bajo coste (Abhat, 1983).

Las ventajas principales que ofrece el almacenaje de calor mediante calor latente frente al que emplea el calor sensible son:

- La densidad de almacenaje de calor es muy superior. Por ejemplo, el agua líquida, su calor específico es  $4,19 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  y el calor latente de fusión sólido-líquido (hielo) es  $334,24 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ . Por consiguiente, la densidad de calor almacenado por calor latente a  $0^\circ\text{C}$  es equivalente al calor que almacena el agua al pasar de  $0$  a  $80^\circ\text{C}$  por calor sensible.
- El calor liberado/almacenado se realizará a temperatura constante.

La figura 2.4 muestra el calor latente de fusión y evaporación del agua, en el eje Y se tiene la temperatura, y en el eje X la energía recibida por el agua. Se aprecia que, durante los estados de fusión y evaporación, aunque la temperatura exterior aumente, la temperatura del agua permanece constante, hasta alcanzar la energía necesaria para cambiar de estado.



Figura 2.4: gráfico de calor necesario para elevar la temperatura del agua.

Fuente: Elaboración Propia, en base a calor latente del agua.

Del gráfico de la figura 2.4 se deduce que el cambio de fase es en función a la temperatura.

### 2.6.1.2. Consideraciones fundamentales sobre el almacenamiento de calor latente y sensible.

Cuando la energía en forma de calor se agrega a una sustancia, se produce un aumento en su energía interna, la consecuencia bien conocida de esto es un aumento de temperatura (calor sensible) o un cambio de fase (calor latente). En el diagrama de la figura anterior se observa aumento de temperatura y energía en la región entre  $-50$  y  $0$  °C, esto corresponde a calor sensible, durante la fase de fusión la temperatura se mantiene constante en el material y este absorbe energía hasta que nuevamente el material comienza a elevar su temperatura, esta fase de absorción de energía es conocida como calor latente (proceso que es reversible, ya que la misma energía puede ser liberada si no existe aumento de temperatura).

Para entender los argumentos físicos detrás del gráfico de la figura 2.4, se puede referir a la teoría molecular de la materia. Cada sustancia comprende un gran número de moléculas que están en constante interacción entre sí. Esta interacción entre las moléculas a nivel atómico, aunque no se toquen aumenta a medida que aumenta la temperatura generando un movimiento y una fuerza de repulsión cada vez mayor entre moléculas hasta llegar al punto en que comienzan a alejarse unas de otras, a este estado de "alejamiento" de moléculas se le llama cambio de fase.

### 2.6.2. Tipos de materiales cambio de fase.

Existe una gran variedad de PCM, de composición y características diversas (Castell et ál., 2010; Farid et al., 2004; Ramírez et ál., 2012; Tyagi & Buddhi, 2007; Wang et ál., 2009; Zhang et ál., 2007). Los más comunes en el rango de temperaturas  $20$  °C y  $80$  °C, adecuados para fines arquitectónicos, son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos (Ramírez, 2009). Los PCM se pueden incorporar en los materiales de construcción mediante aplicación directa, inmersión y encapsulación (macrocápsulas y microcápsulas). Los PCM orgánicos presentan menor conductividad térmica y mayor capacidad de almacenamiento de calor latente que los PCM inorgánicos y pueden resultar inflamables dependiendo de su contenedor (Kuznik et ál., 2011).

#### a) Sales hidratadas

Se caracterizan por estar compuestas por agua más un compuesto inorgánico. Tienen altas densidades de almacenamiento de calor, existen una gran variedad de sales hidratadas que funden en un intervalo de temperatura de entre  $0$  y  $120$  °C.

El mayor problema en el uso de sales hidratadas como PCM es que la mayoría de ellos funden incongruentemente, es decir, se funden en una fase acuosa saturada y una fase sólida que es generalmente un hidrato inferior a la misma sal. Debido a la diferencia de densidad, la fase sólida se acumula en la parte inferior del contenedor, este es un fenómeno de descomposición que es irreversible (Abhat, 1983).

#### b) Mezclas eutécticas

Son mezclas de dos componentes con punto de fusión distinto, los cuales mezclados tienen un punto de fusión generalmente más bajo que el de sus componentes por separado. Pueden ser compuestos orgánicos o inorgánicos, cabe mencionar que la búsqueda de mezclas eutécticas como PCM es bastante reciente, y solo se dispone de datos limitados sobre sus propiedades termo físicas (Abhat, 1983).

## c) Ácidos grasos

Son compuestos orgánicos de naturaleza lipídica formados por cadenas de hidrocarburos. Tienen como desventaja que se descomponen con el tiempo.

## d) Ceras de parafina

Son sustancias que tienen una consistencia cerosa a temperatura ambiente, químicamente consisten principalmente de cadenas largas de hidrocarburos alcanos lineales. El punto de fusión depende de la longitud de la cadena del alcano en la parafina, alcanos que contienen entre 14 y 40 átomos de carbono poseen puntos de fusión entre 6 y 80 °C. Son compuestos estables, de fácil acceso y baratos, con calor latente de fusión entre 100 y 280 kJ/kg aproximadamente (Abhat, 1983).

## 2.6.2.1. Criterios para PCM de uso en general

## a) Criterio termodinámico, los PCM deben poseer:

- Punto de fusión en el rango deseado.
- Alto calor latente de fusión por unidad de masa.
- Alta conductividad térmica, así los gradientes de temperatura requeridos para la absorción y entrega de energía serán bajos.
- Bajo cambio de volumen durante los cambios de fase.

## b) Criterio químico:

- Debe poseer estabilidad química.
- No debe descomponerse, para una vida útil larga en servicio.
- No deben ser materiales corrosivos.
- No deben ser materiales inflamables o explosivos.

## c) Criterios económicos:

- Debe estar disponible en grandes cantidades.
- Debe ser económico o de bajo costo en relación al uso que se dará.

## 2.6.3. Encapsulaciones para materiales PCM

A lo largo del desarrollo y uso de estos materiales se han ido usando distintos tipos de encapsulamientos y en distintos tamaños. La encapsulación es necesaria ya que durante la fase de fusión, el PCM se vuelve líquido por lo que puede escurrir a través de poros o grietas de en caso de ser usado en materiales como hormigón, yeso o adobe.

Al comienzo de las investigaciones se partió usando macrocápsulas formadas generalmente de acero o plástico (Figuras 2.5 y 2.6). En la actualidad el uso más significativo de los PCM es a través de microcápsulas de micrómetros de diámetro, fabricadas en base a materiales compuestos (Fig. 2.7), En base a estas microcápsulas se han fabricados placas de yeso-cartón (Fig. 2.8).



**Figura 2.5: Macrocápsulas plásticas.**

**Fuente: Alicia Oliver Ramírez, Universidad Politécnica de Madrid.**



**Figura 2.6: Macrocápsulas Metálicas.**

**Fuente: Alicia Oliver Ramírez, Universidad Politécnica de Madrid.**

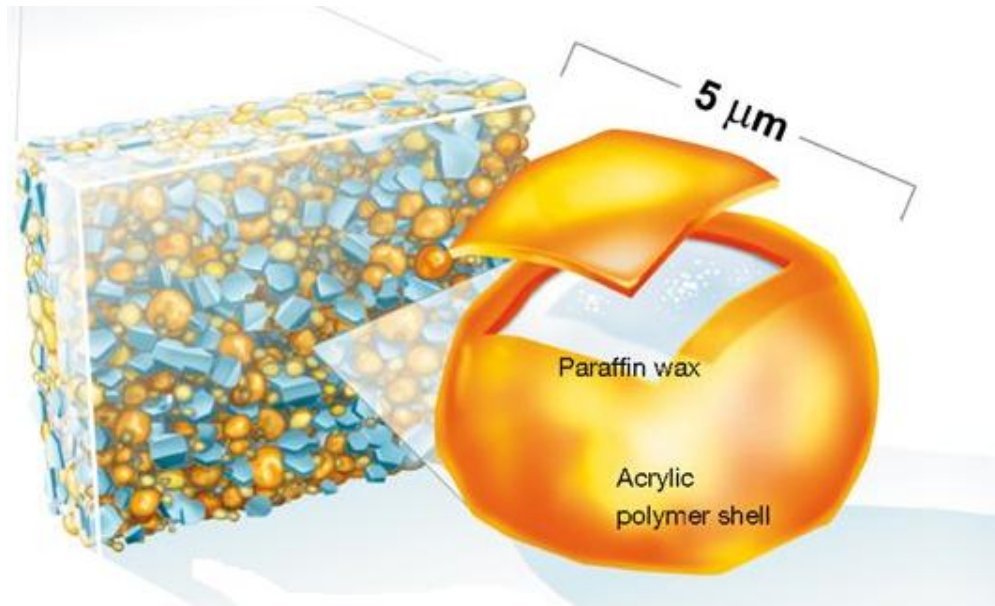


Figura 2.7: Microcápsula de cera de parafina.

Fuente: Micronal PCM España.

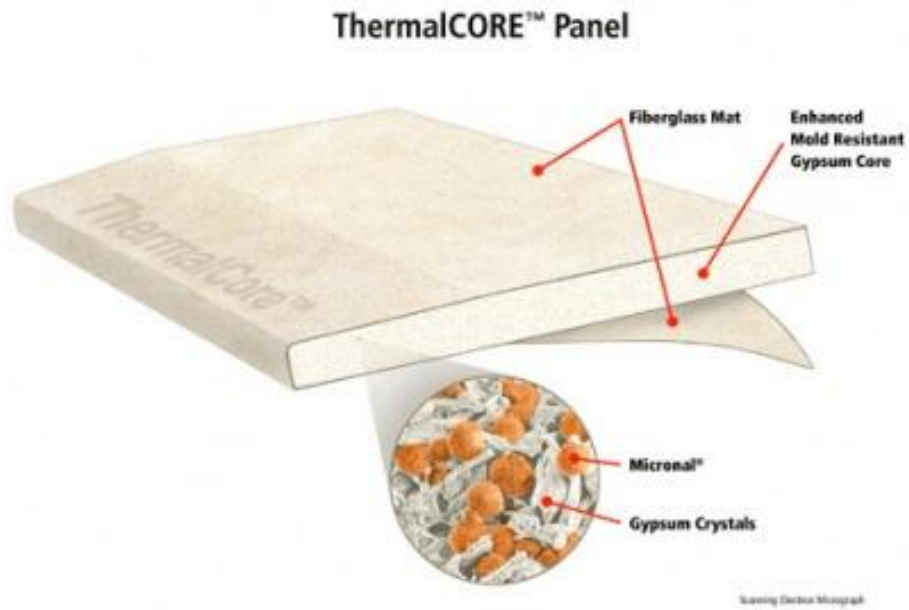


Figura 2.8: Panel Thermalcore, yeso cartón con microcápsulas de PCM.

Fuente: Micronal PCM España.

#### 2.6.4. Uso de PCM en la construcción

Respecto a aplicaciones de microcápsulas de parafina en morteros y hormigones: Cabeza et ál., (2007) investigan hormigón con 5 % de microencapsulados de PCM comercial en España con el nombre de "Micronal pcm" con calor latente de fusión de 100 kJ/kg, en muros, fabricando dos casetas, como resultado se observaron que entre la caseta de hormigón convencional y la caseta de hormigón +PCM, había una diferencia de 2°C gracias a la inercia térmica que se debe al cambio de fase que ocurre temprano por la mañana que es cuando solidifica el PCM y por la tarde que alcanza su fusión. Félix & Aguilar, (2009) concluyeron que la incorporación del 20% y 30 % de las microcápsulas de PCM en hormigón, disminuye la resistencia de este a la mitad. Hunger et ál., (2009) investigaron mezclas de hormigón autocompactante con PCM, detectaron la disminución de resistencias, rompimiento parcial de microcápsulas y la acumulación de microcápsulas sin dispersar en la superficie. Sá et ál., (2012) igualmente estudiaron varias muestras de mortero con diferente composición, incluyendo fibras de polipropileno en algunos morteros, para los ensayos se usaron cubos de mortero cerrados los que contenían termopares en el interior para monitorear la temperatura, en dos de los cubos de mortero estudiados uno con PCM y otro sin PCM, las temperaturas máximas medidas fueron de 26.3 °C para el cubo sin PCM, mientras en el cubo con PCM fue de 23.7 °C. Meshgin & Xi, (2012) estudiaron las características de hormigones de cemento Portland con PCM microencapsulado y aditivos, con el objetivo de mejorar las propiedades térmicas del hormigón estructural, las pruebas se hicieron usando PCM como sustituto de arena, los resultados arrojaron que para una sustitución de hasta un 20% de arena por PCM microencapsulado, la pérdida de resistencia a compresión no es significativa para aplicaciones estructurales, el calor específico del hormigón aumentó considerablemente. Así, se reduce la conductividad térmica del hormigón y se mejora la capacidad de aislamiento del hormigón. Una prueba de flexión, una prueba de contracción por secado y un análisis de microestructura proporcionan una buena comprensión del hormigón modificado con PCM.

En general, los resultados muestran que es bastante prometedor utilizar PCM en hormigón para mejorar su capacidad de aislamiento con menor conductividad térmica y, al mismo tiempo, que es posible mantener la pérdida de resistencia del hormigón en un rango aceptable.

## 2.7. Generalidades térmicas

### 2.7.1. Aislación térmica

Un aislante térmico es un material usado en la construcción y caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso de calor entre dos medios con distintas temperaturas que naturalmente tenderían a igualarse, impidiendo que entre o salga calor del sistema que nos interesa aislar.

### 2.7.2. Transferencia de calor

Según Incropera y DeWitt (1999), la energía calórica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura, hasta lograr el equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperatura. Se supone una situación típica en periodos fríos del año, el ambiente interior se encuentra más caliente que el exterior. La transferencia de calor puede ocurrir de las siguientes maneras: radiación, convección o conducción.

## a) Conducción

La conducción es un mecanismo de transferencia de calor entre dos sistemas basado en el contacto directo de sus partículas sin flujo neto de materia y tiende a igualar la temperatura dentro de un cuerpo y entre diferentes cuerpos en contacto por medio de ondas

## b) Convección

Se caracteriza porque se produce por intermedios de un fluido que transporta la energía térmica entre distintas zonas que poseen diferentes temperaturas. Esto ocurre ya que los fluidos al calentarse aumentan su volumen y en consecuencia disminuyen su densidad, de esta forma el fluido caliente asciende desplazando al fluido frío.

## c) Radiación

Corresponde al intercambio de calor en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través de un material o incluso en el vacío.

## 2.7.2.1. Calor

Se define como la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia, que es transferida de un sistema a otro debido en general a un gradiente de temperatura entre ellos.

## 2.7.2.2. Temperatura

Es una medida de calor o energía térmica de las partículas en una sustancia. Cuando se agrega calor a una sustancia, sus átomos o moléculas se mueven más rápido y su temperatura se eleva o viceversa.

## 2.7.3. Flujo de calor y densidad de flujo

Al momento de aislar un edificio o vivienda, lo que se hace, es impedir que el calor se transmita por conducción desde el exterior al interior en verano y viceversa en invierno, manteniendo así un ambiente con temperatura de confort, si no se consigue se debe hacer uso de energía para acondicionar el ambiente.

El flujo de calor es la cantidad de calor intercambiado por unidad de tiempo y está representado por la ecuación 2.1:

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{k \cdot A}{x} * (T_1 - T_2) [W] \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$\phi$ : Flujo de calor

$\Delta Q$ : Cantidad de calor transmitido

$\Delta t$ : Variación de tiempo

$k$ : Coeficiente de conductividad térmica del material

A: Área de la superficie que conduce  
 x: Espesor de la superficie que conduce  
 T1-T2: Gradiente de temperatura

La densidad de flujo, es el flujo de calor que pasa a través de una superficie. Lo que queda expresado de la siguiente manera en la ecuación 2.2:

$$\varphi = \frac{\phi[W]}{S[m^2]} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

$\varphi$ = Densidad de flujo  
 $\phi$ = Flujo de calor en Watts  
 S= Superficie en metros cuadrados

#### 2.7.4. Conductividad térmica

Es la capacidad de los materiales para dejar pasar el calor, en otras palabras, la conductividad térmica es la capacidad de los elementos de transmitir el movimiento cinético de sus moléculas a las moléculas adyacentes. Cuando se calienta la materia varía el comportamiento de su estado molecular, incrementando su movimiento. Es decir, las moléculas salen de su estado de movimiento cinético inicial y adquieren movimiento cinético extra provocado por el aumento de la temperatura.

La NCh 853 Of. 91 entrega una tabla con valores de conductividad térmica para materiales en estado seco, a una temperatura media de 20 °C.

Estos valores se determinan experimentalmente según el método de la NCh 850 Of. 83, Medido para la determinación de la conductividad térmica en estado estacionario por medio del anillo de guarda”.

#### 2.7.5. Resistencia térmica

La resistencia térmica se define como la propiedad de un elemento material, de oponerse al paso de calor, vale decir representa su “poder aislante”. Esta resistencia térmica depende de la conductividad térmica del material y su espesor, lo que se ve expresado en la ecuación 2.3.

$$R = \frac{e}{\lambda} \left[ \frac{m^2 * K}{W} \right] \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

R= Resistencia térmica  
 e= Espesor del material  
 $\lambda$ = conductividad térmica del material

***Capítulo III***  
***Metodología de la Investigación***

### 3. Metodología de la investigación

#### 3.1. Esquema metodológico

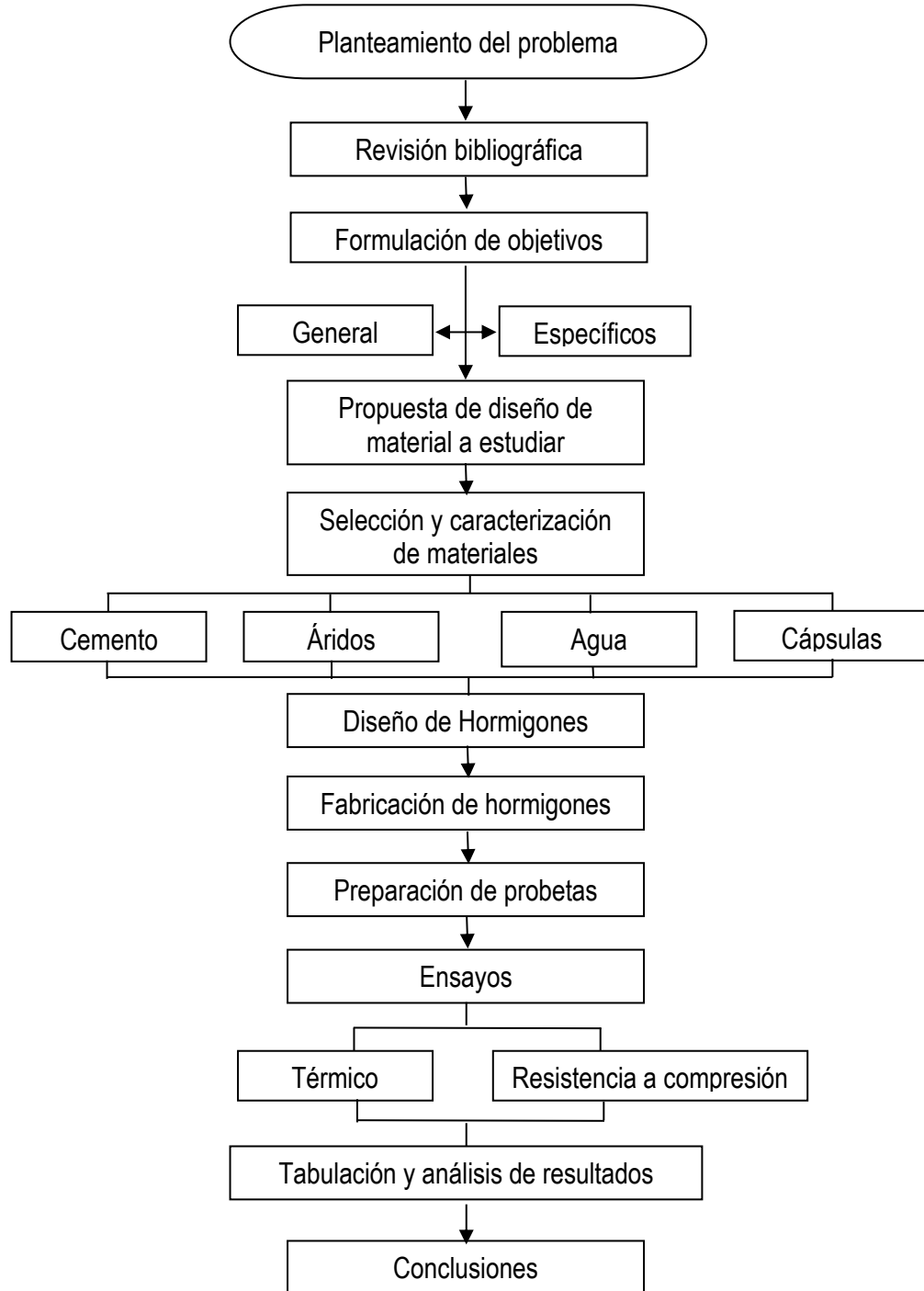


Figura 3.1: Esquema metodológico.  
Fuente: Elaboración propia.

El esquema metodológico comprende 4 etapas principales, las cuales son, en primer lugar: planteamiento del problema y revisión bibliográfica, con lo que se realizan los objetivos y alcances de la investigación, como segunda etapa se encuentra la fase de diseño y caracterización de materiales, así como también la fabricación de las cápsulas de parafina y hormigones, la tercera etapa corresponde a la realización de los ensayos a los cuales se someterán las probetas abarcando el motivo de la investigación, en este caso, pruebas de resistencia térmica y a compresión, finalmente la cuarta etapa corresponde a la recolección, tabulación y análisis de los resultados obtenidos en la etapa de ensayos, para finalizar la cuarta etapa se concluye de acuerdo a los resultados obtenidos.

### **3.2. Generalidades**

Este capítulo presenta los antecedentes que involucra el diseño del experimento a realizar. Este se lleva a cabo planteando variables de control que son las que permanecen constantes durante la experimentación, variables independientes (factores) que en este caso corresponde al tamaño máximo nominal de las cápsulas de parafina y a la cantidad de estas (porcentajes) que reemplazan el árido grueso de la mezcla de hormigón.

De acuerdo a la metodología implementada se dará a conocer cada etapa experimental y las actividades componentes de cada una, luego se expondrán los distintos procedimientos y equipamientos usados para la determinación de las variables.

#### **3.2.1. Programa experimental**

Para establecer cómo se comporta el hormigón con agregado de parafina sólida encapsulada, en reemplazo de árido grueso en distintos porcentajes es que se realizará este programa experimental, el cual permitirá estudiar la influencia de la mezcla y cómo se comporta en relación a aislación térmica y resistencia a compresión en comparación con un hormigón patrón.

Se confeccionará un tipo de hormigón patrón, y una vez obtenida la dosificación de este hormigón se dosificarán las mezclas reemplazando el árido grueso por cápsulas de parafina sólida en porcentajes que se mencionarán más adelante.

#### **3.2.2. Diseño de la experiencia**

Para obtener hormigones con cápsulas de parafina incorporadas y evaluar las características antes mencionadas, se diseñó la experiencia considerando lo siguiente:

- Tipo de probetas: Según NCh 1017 Of. 75 para ensayos a compresión se emplearán probetas cúbicas.
- Hormigón patrón: es aquel que no contiene parafina sólida encapsulada. Se realizará la dosificación de este hormigón y se mantendrán constantes los parámetros de diseño de este.
- Hormigón con cápsulas de parafina: Para la dosificación del hormigón patrón se realizará un reemplazo de gravilla por cápsulas de parafina sólida, en porcentajes de 6%, 9% y 12 %.
- Pruebas de aislación térmica: para estas pruebas se realizarán paneles de 60x60x7 cm los cuales se ensayarán en la cámara térmica ubicada en los laboratorios utilizando el equipo Xplorer para realizar las mediciones.

### **3.2. Planteamiento y definición de variables**

#### **3.2.1. Variable independiente**

- a) Cantidad de Cápsulas de parafina sólida a sustituir: según el estado del arte del hormigón con adiciones de PCM se recomienda no sustituir más allá del 20% para que los efectos sobre la resistencia mecánica no sean significativos. Por lo que se usará un rango de 6, 9 y 12 % de cápsulas de parafina solida sustituido en volumen del árido grueso.
- b) Tamaño de las cápsulas de parafina: de acuerdo a la producción artesanal de estas cápsulas el tamaño utilizado será de entre 6 y 10 mm de lado.

#### **3.2.2. Variables dependientes**

- a) Propiedad de resistencia a compresión.
- b) Capacidad de aislación térmica: su finalidad es determinar la capacidad de aislación térmica logrado con el hormigón con adiciones de cápsulas de parafina sólida.

#### **3.2.3. Detalles experimentales**

##### **3.2.3.1. Caracterización de los materiales**

- Cemento Portland puzolánico grado corriente
  - Grava Dn 20 mm y arena, cada uno de estos materiales se ensayará por triplicado, para determinar: densidad aparente, densidad real, absorción y granulometría.
  - Parafina sólida encapsulada en resina epóxica de nombre comercial, sikadur 32 gel.
- a) Se utilizarán áridos fluviales de la zona de Valparaíso, Se caracterizarán dichos áridos de acuerdo a las normas Chilenas NCh163 Of79 Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales, NCh165 Of77 Tamizado y determinación de la granulometría, NCh1116 Of2008 Determinación de la densidad aparente, NCh1117 Of2010 Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas, NCh1239 Of77 Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las arenas.
  - b) Se utilizará parafina sólida disponible en mercado chileno, el tipo será “Parafina p.f. 42 – 44 °C”, la cual está compuesta de hidrocarburos de cadena larga, es color blanca, inodora, insoluble en agua, con punto de fusión entre 42 y 44 °C.

### **3.3. Preparación y clasificación de la parafina sólida**

#### **3.3.1. Encapsulación de la parafina sólida**

- a) Por medio de calentamiento directo en olla, se fundirá la cera de parafina, dejándola en estado líquido para facilitar su manipulación, una vez completamente líquida se vaciará sobre una lata lisa de acero con bordes doblados para contener la cera líquida, en el vaciado de la cera se tendrá cuidado de dejar una capa de no más de 10 mm de espesor, en esta lata se dejará solidificar la cera lentamente. Mientras solidifica la cera y aún está en estado semi

solido se procede a cortar con cuchillo en forma longitudinal y transversal, para lograr una vez solidificada la cera de parafina, cubos de a lo más 10 mm de lado, todo este procedimiento junto con el de encapsulado será totalmente manual, se almacenarán los cubos de parafina en un lugar fresco y seco, a la espera de la encapsulación.

- b) Preparación de la resina epóxica: En un recipiente de un litro se mezclarán cada uno de los componentes de la resina epóxica (en este caso resina de epoxi más endurecedor, del tipo usado en construcción, se usará Sikadur 32 gel, ya que es el epoxi con mejores prestaciones de entre los disponibles, usados durante el proceso de pruebas) en proporciones indicadas según fabricante, esta resina de viscosidad media tiene un tiempo de trabajo de unos 10 minutos y una solidificación completa de 12 horas, debido al tiempo limitado de trabajo que proporciona el epoxi, la preparación de la mezcla se debe hacer en pequeñas porciones. Preparada la resina se procederá a la inmersión de la cera en esta, cubriéndola completamente, este proceso se hará cubo por cubo individualmente. Cubierto completamente cada cubo de parafina este será colocado sobre una superficie lisa cubierta de plástico alusa del tipo usado en cocina, ya que este film no se adhiere al epoxi por lo que luego, una vez solidificado, el retiro de las cápsulas de parafina será más fácil.

### 3.3.2. Caracterización de las cápsulas de parafina sólida

Cápsulas de parafina sólida, en adelante CPS.

Determinación de las densidades aparentes suelta del CPS, se hará utilizando un recipiente cilíndrico de peso y volumen conocido, vertiendo en este el CPS y determinando el peso del conjunto, similar al procedimiento usado para determinar la densidad aparente suelta de la gravilla o arena. Determinación de la densidad real del CPS, Se hará tomando una muestra de masa X y sumergiéndola en agua midiendo el agua desplazada y en relación al peso del CPS se puede determinar la densidad real de este.

## 3.4. Dosificaciones, preparación de las probetas, curado y ensayos

### 3.4.1. Dosificaciones

- Se considerará una cantidad de cemento fija de 300 kg/m<sup>3</sup> para la dosificación
- Para el hormigón se establecerá un asentamiento de  $6 \pm 2$  cm.
- Se diseñará una dosificación base, y en base a la consistencia de esta se ajustará la cantidad de agua para cumplir con el asentamiento del cono.
- La dosificación se hará mediante el método IDIEM, variante propuesta por Juan Egaña, en su método para dosificar hormigones del 2014.

### 3.4.2. Preparación de las probetas

Se realizarán 2 tipos de probetas de diferente geometría (cubo y panel) y por cada una de estas 2 probetas de diferente geometría, se harán 3 probetas de hormigón (3 cubo y 3 panel) como mínimo para cada dosificación de CPS, se realizarán 3 distintas dosificaciones de material, 6%, 9% y 12% de volumen de CPS x volumen de grava reemplazada, con lo que se tendrá un total de 18 probetas con CPS

y 6 probetas sin CPS como mínimo (Ver tabla 3.1). Los tipos de probetas serán los siguientes, una probeta cubica de dimensiones normadas y una en forma de panel de dimensiones de 60X60X8 cm. La fabricación del hormigón se hará en los laboratorios Docentes de la Escuela.

El vaciado en moldes y curado de cada probeta será de acuerdo a lo indicado en la norma Chilena NCh1017, aplicable a probetas cúbicas, para las probetas tipo panel el vaciado y curado se hará basándose en la NCh1017, para probetas prismáticas.

Dosis de CPS %	N° de Probetas cúbicas	N° de Probetas panel
0	3	3
6	3	3
9	3	3
12	3	3
<b>TOTAL</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
	<b>TOTAL, DE PROBETAS</b>	<b>24</b>

**Tabla 3.1: Cantidad de probetas y diferentes dosificaciones de CPS.  
Fuente: Elaboración propia**

#### 3.4.3. Tratamiento de curado

- Curado convencional, 7 días bajo agua y el resto del tiempo al aire bajo techo.

#### 3.4.4. Ensayos

Con cada una de las mezclas que serán fabricadas se prepararán 6 probetas, de las cuales 3 son cúbicas de arista 20 cm y 3 son panel de 60X60X7 cm.

Los ensayos a realizar serán los siguientes:

- Asentamiento.
- Resistencia a la compresión a los 28 días de edad.
- Aislación térmica a los 28 días de edad.

##### 3.4.4.1. Procedimiento para medir asentamiento según NCh 1019 Of. 74

Se coloca el molde sobre la plancha de apoyo, ambos limpios y humedecidos solo con agua. Se llenará el molde en tres capas cada una un tercio aproximado de la altura del molde, el operador se debe parar sobre las pisaderas evitando el movimiento del molde durante el llenado.

Cada capa deberá ser apisonada con 25 golpes de la varilla-pisón, distribuidos uniformemente en toda la sección.

La capa inferior será apisonada en toda su profundidad, la capa media y superior se apisona penetrando hasta la capa subyacente. Durante el apisonado de la última capa, mantener un exceso de hormigón sobre el borde superior del molde.

Finalizada la compactación de la última capa, enrasar la superficie haciendo rotar sobre ella la varilla pisón. Luego se limpia el hormigón derramado en la zona adyacente al molde. Una vez llenado el

molde se procede inmediatamente a levantarlo, donde, se deben cargar las asas con las manos dejando libre las pisaderas.

#### **a) Medición del asentamiento**

Una vez levantado el molde, medir inmediatamente la disminución de altura del hormigón, con aproximación de 5 mm.

Si el hormigón moldeado se inclina hacia un lado o sufre disgregaciones, se debe repetir el ensayo; en caso de que suceda por segunda vez considerar que el hormigón no es apto para efectuar el ensayo, por carecer de plasticidad y cohesión necesaria.

### 3.4.4.2. Ensayo de compresión en probetas cúbicas

#### **a) Generalidades**

La resistencia a compresión se determinará por medio de ensayo de compresión de probetas cúbicas, basado en la norma NCh 1037 Of 77.

#### **b) Aparatos**

La prensa de ensayo, balanza y la regla graduada que se utilizarán en el laboratorio, cumplen con las exigencias estipuladas en la listada norma.

#### **c) Procedimiento**

Se deben medir las probetas según los pasos siguientes: colocar el cubo con la cara de llenado en un plano vertical frente al operador.

Medir los anchos de las cuatro caras laterales del cubo aproximadamente en el eje horizontal de cada cara.

Medir las alturas de las cuatro caras laterales aproximadamente en el eje vertical de cada cara.

Expresar estas medidas en milímetros con aproximación a 1 mm.

Para comenzar el ensayo, se debe limpiar la superficie de las placas y de las caras de ensayo de la probeta, colocando la probeta sobre la placa inferior alineando su eje central con el centro de esta placa. Las probetas cúbicas se deben situar con la cara de llenado en un plano perpendicular a la placa inferior de la prensa; asentando la placa sobre la probeta, guiándola suavemente con la mano, para obtener un apoyo de la placa lo más uniforme posible.

La carga se aplica continua y con choques, a una velocidad uniforme, que permita cumplir las siguientes condiciones:

- Alcanzar una franca rotura de la probeta en un tiempo igual o superior a 100 segundos
- No superar la velocidad de 0.35 N/m<sup>2</sup>/seg.

Una vez fijada la velocidad y la carga no se hará modificaciones de ella hasta el término del ensayo. Obtenida la carga máxima, se registra como P expresada en Newtons.

#### 3.4.4.3. Aislación térmica

##### a) Generalidades

La NCh 851 indica la metodología para la determinación de la conductividad térmica y capacidad de aislación térmica de un determinado material o elemento constructivo. Este ensayo permite obtener resultados en probetas razonablemente significativas de los elementos constructivos, mediante el análisis dentro de una cámara térmica, por lo que es ideal para el estudio.

##### b) Aparatos

Para realizar este ensayo, se usa una cámara térmica (Fig. 3.1) que se encuentra en las dependencias de los laboratorios docentes, la cual fue construida en estructura de madera de pino de 2X2 pulgadas de escuadría y revestimiento de terciado estructural de 15 mm. Esta cámara cuenta con aislación continua de poliestireno expandido y lana de vidrio, para evitar las pérdidas de calor, en todos los lugares donde existan puentes térmicos (aristas, tapa, etc.) se sella la cámara al momento de los ensayos con una fibra sintética (fisiterm) la cual evita pérdidas o ganancias de calor dentro de la cámara.



Figura 3.2: Cámara térmica.

Fuente: Elaboración Propia.

Para efectuar las mediciones se hará uso del equipo de medición Xplorer GLX marca Pasco (Fig. 3.2), el cual se encuentra disponible en los laboratorios docentes de la universidad.



Figura 3.3: Xplorer GLX.

Fuente: Elaboración propia.

### c) Procedimiento

Para realizar el ensayo, dentro de la cámara se instala de manera vertical el muro de hormigón (Probeta panel), el cual tiene la misma dimensión de la distancia interior libre entregada por la cámara, creando dos espacios dentro de la cámara, cada uno de ellos separado por el muro, espacios A y B, en uno de los espacios (espacio A) se ubican 2 halógenos de 500 watts cada uno, la energía entregada para la cámara A será constante durante 2,5 horas, por lo que la temperatura se elevará en cada experimento hasta llegar a un punto de equilibrio cercano a los 66°C. El objetivo del ensayo es medir temperaturas en ambas caras del panel o muro confeccionado. Para esto se montan dos sensores del equipo de medición uno en cada cara del panel y se mide las diferencias de temperatura entre ambas caras y el tiempo que toma que las temperaturas se igualen, o en este caso la diferencia de temperaturas entre ambas caras durante las 2,5 horas que se entrega energía. Como se estará trabajando con materiales cambio de fase que almacenan energía, es que se propone una variante al ensayo hecho de manera regular, dicha variación será: entregar una energía constante durante 2,5 horas, pasado este tiempo se descubrirá la cámara A, dejando escapar el calor y se ventilará esta cámara durante 2 horas, de esta forma se verá la capacidad aislante de cada panel, así como también la capacidad para el almacenaje de energía de cada panel.

Estos ensayos se harán sobre el panel patrón y los paneles con contenidos de parafina solida encapsulada, en donde mediante comparación, se determinará el nivel de aislación térmica de los paneles de hormigón propuesto.

*Capítulo IV*  
*Descripción del experimento*

## 4. Descripción del experimento

### 4.1. Introducción

En este capítulo se dará a conocer los resultados y análisis de las pruebas realizadas en los diferentes ensayos para los distintos materiales componentes, así como también procedimiento de fabricación de materias primas según corresponda.

Los ensayos y estudios son los siguientes:

- Parafina sólida: fundición y creación de las cápsulas.
- Granulometría de los áridos componentes.
- Densidades aparentes, netas y absorción de agua de los áridos componentes
- Dosificación base para ajuste de proporciones en dosificación
- Ensayos de asentamiento para dosificación base.

### 4.2. Parafina sólida

#### 4.2.1. Fundición y determinación de las temperaturas de fusión y solidificación de la parafina sólida

Se verificaron puntos de fusión de la cera de parafina usada mientras se realizaba el procedimiento para fabricación de los cubos de cera de parafina, esto se hizo mediante termómetro digital en el momento en que se comenzaba a fundir y solidificar la cera de parafina obteniendo los siguientes resultados:

Temperatura de fusión estimada	:	42 °C Aproximadamente
Temperatura estimada en la que comienza la solidificación	:	43 °C Aproximadamente
Temperatura ambiente	:	22 °C



Figura 4.1: Medición de la temperatura de fusión de la parafina.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.2: Medición de la temperatura de solidificación de la parafina.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.3: Medición de la temperatura ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

Durante los experimentos Se observa que a partir de aproximadamente los 42 °C (Fig. 4.1) la parafina comienza a fundirse, a temperatura ambiente de 22 °C (Fig. 4.3), desde este punto en que se alcanzan los 42 °C el proceso de fundición demora aproximadamente 7 minutos en completarse para una

cantidad de 1.5 kg aproximadamente de parafina sólida, una vez completamente líquida se deja a fuego en la olla hasta alcanzar los 82 °C aprox. momento en que se quita del fuego y se vierte en la bandeja ya preparada donde se deja enfriar, luego de 20 minutos aprox. en la bandeja enfriándose a temperatura ambiente, la parafina comienza a solidificarse, en este momento se realizan mediciones de temperatura en la superficie de la parafina registrándose una temperatura en su superficie de 43 °C aproximadamente (Fig. 4.2), estando en estado aun blando.

#### 4.2.2. Fabricación de los cubos de parafina

Se realiza de la forma descrita en el capítulo anterior, punto 3.3.1.



**Figura 4.4: Parafina en proceso de solidificación.**  
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 4.5: Corte de los cubos de parafina sólida.**  
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 4.6: Cubos de parafina ya confeccionados.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.2.3. Encapsulación de la cera de parafina.

La encapsulación se realizó con resina epóxica de 2 componentes, de nombre comercial Sikadur 32 gel, debido a que esta resina fue la que mejores resultados y mayor simplicidad generó al momento de la encapsulación, cada cubo se dispone de forma individual sobre una superficie plástica (Fig. 4.7).

Para estos propósitos se usó otras 2 distintas resinas (sikadur 31 HMG), que resultó ser demasiado viscosa para los propósitos requeridos, complejizando la tarea, También se usó resina epóxica para fabricación de piezas en fibra de vidrio, la cual dio buenos resultados de encapsulación, pero, se adhería a las superficies donde se colocaban las cápsulas dificultando la tarea de recolección de estas.



**Figura 4.7: Parafina solida encapsulada.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.2.4. Medición de la densidad real y aparente suelta de las cápsulas de cera de parafina

Se determinaron ambas densidades de la forma descrita en el capítulo anterior, punto 3.3.2. Obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 4.1: Densidades real y aparente suelta de las capsulas de parafina.**

PARAFINA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	2056,4	2052,5	2054,45
D. AP SUELTA (gr/cm <sup>3</sup> )	0,544	0,540	0,542
D. AP SUELTA (Kg/m <sup>3</sup> )	544	540	542

D. real (gr/cm <sup>3</sup> )	0,84
-------------------------------	------

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. Caracterización de áridos

Los áridos que se usarán son grava de tamaño máximo nominal 20 mm y arena de tamaño máximo nominal 5 mm, se reemplazará grava por cápsulas de parafina en proporciones 0, 6, 9, 12 por ciento.

#### 4.3.1. Granulometría de la arena

La arena que se utilizó presentó un alto contenido de árido grueso, se tomaron 3 muestras representativas del material para obtener un resultado representativo de la arena a utilizar. La tabla siguiente muestra la granulometría de las 3 muestras de arena.

TAMIZ		PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	%	GRANULOMETRICA NCH1630F79	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 79	MUESTRA 1 (gr)	MUESTRA 2 (gr)	MUESTRA 3 (gr)	Promedio (gramos)	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	QUE PASA CORREGIDO	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
3/8	10	0	0	0	0	0	0	100		100	100
4	5	97	69	91	86	17	17	83	100	95	100
8	2,5	89	83	94	88	18	35	65	79	80	100
16	1,25	50	50	52	51	10	45	55	66	50	85
30	0,63	33	38	34	35	7	52	48	58	25	60
50	0,315	72	71	60	67	14	66	34	42	10	30
100	0,16	137	157	139	144	29	95	5	7	2	10
BAJO 100		20	32	30	27	5	100	0			

**Tabla 4.2: Granulometría de la arena.**

Fuente: Elaboración propia.

La arena utilizada reveló que su tamaño máximo nominal es mayor que el correspondiente al tamiz N°4, según la NCh 163 en estos casos se debe efectuar una conversión matemática, considerando como el 100% del material aquel que para por el tamiz N°4.

Esta arena tiene un módulo de finura de 3.1 este valor junto a su granulometría la describen como una arena de tamaño medio o normal. Corresponden fundamentalmente con las recomendaciones de la norma 163, La necesidad de cemento, la energía de compactación y la sensibilidad a la segregación están dentro de lo normal. Su uso es común en la elaboración de hormigones corrientes.

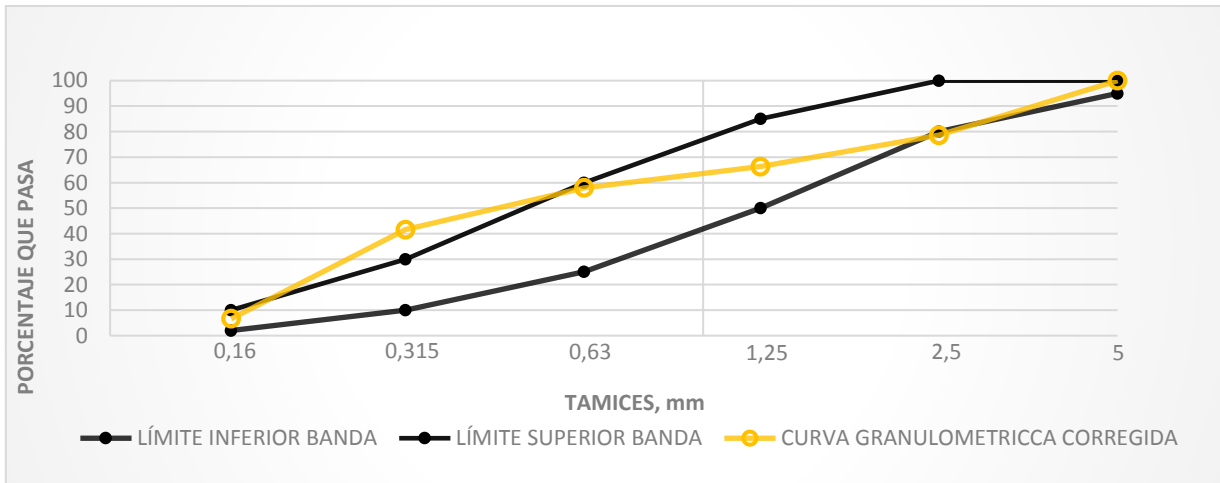


Figura 4.8: Curva granulométrica de la arena, muestra corregida.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.9: Tamizado de la arena.

Fuente: Elaboración propia

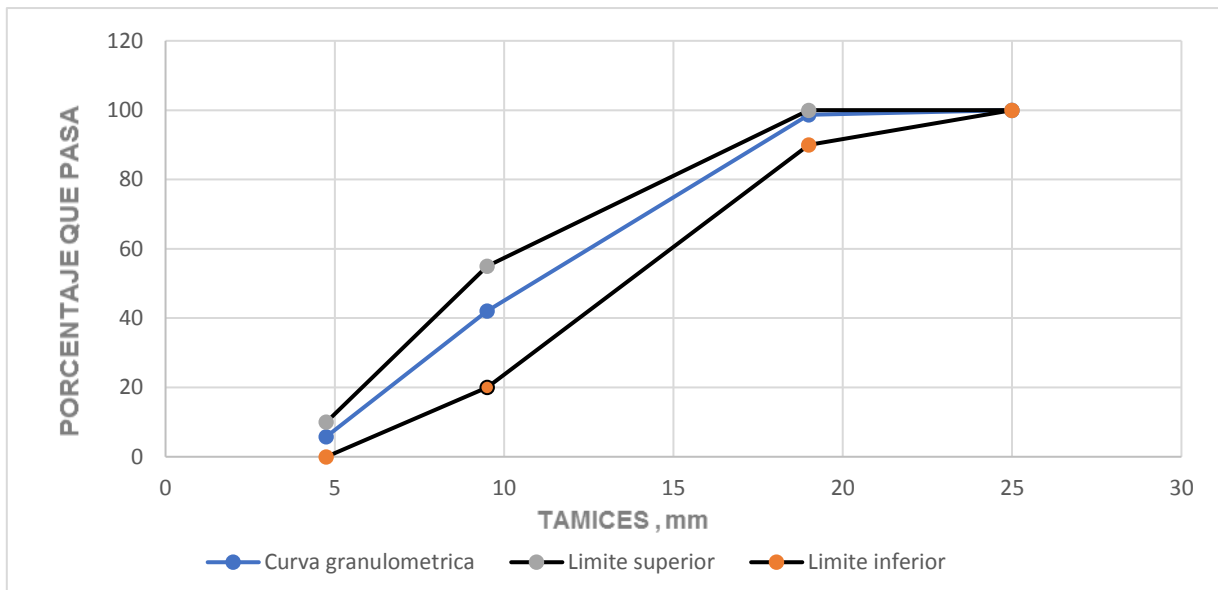
### 4.3.2. Granulometría de la grava

Se usó grava de tamaño máximo nominal 20 mm. Al igual que la arena se tomó 3 muestras representativas del material en el acopio.

**Tabla 4.3: Granulometría de la grava Dn 20 mm.**

TAMIZ		PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	BANDA GRANULOMÉTRICA - NCH163 Of 79	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 Of 79	MUESTRA 1 (gr)	MUESTRA 2 (gr)	MUESTRA 3 (gr)	(gramos)	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
1"	25	0	0	0	0	0	0	100	100	100
3/4"	20	92	112	118	107	1	1	99	90	100
3/8"	10	4502	4366	4672	4513	57	58	42	20	55
4"	5	2868	2944	2868	2893	36	94	6	0	10
BAJO 4		512	516	364	464	6	100	0	0	5

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.10: Curva granulométrica de la grava.**

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.11: Tamizado de la grava.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.3. Densidad real, neta y absorción de agua de los áridos

En gravas el procedimiento consiste en preparar la muestra, determinando su masa por pesada al aire ambiente en condiciones seca y saturada superficialmente seca, luego se establece su volumen por diferencia entre pesadas al aire y sumergida en agua, con los datos anteriores es posible calcular la densidad real, neta y absorción de agua.

Tabla 4.4: Densidad real, neta y absorción de agua de la grava.

GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
MASA SUMERGIDA (gr) - A	1090,4	1128,7	1110
MASA Mss (gr) - B	1749,7	1797,9	1774
Ms (gr) - C	1727,2	1765,3	1746
$\rho$ NETA (Kg/m <sup>3</sup> )	2712	2773	2743
$\rho$ REAL SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	2620	2638	2629
$\rho$ REAL SSS (Kg/m <sup>3</sup> )	2654	2687	2670
% ABSORCIÓN	1,3	1,8	1,6

Fuente: Elaboración propia.

En arenas luego de preparar la muestra se debe medir su masa en condición seca y saturada superficialmente seca, para calcular el volumen como la masa de agua desplazada por la arena sumergida en un matraz aforado, finalmente se calculan las densidades real, neta y la absorción de agua en función de los valores obtenidos en las diferentes condiciones de determinación de las masas.

**Tabla 4.5: Densidad real, neta y absorción de agua de la arena.**

ARENA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
MATRAZ CON AGUA (gr) - Ma	685,7	685,3	685,5
MATRAZ CON MUESTRA (gr) - Mm	742,9	742,5	742,7
Msss (gr)	92,5	92,5	92,5
Ms (gr)	91,2	91,1	91,15
$\rho$ NETA (Kg/m <sup>3</sup> )	2682	2687	2685
$\rho$ REAL SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	2584	2581	2582
$\rho$ REAL SSS (Kg/m <sup>3</sup> )	2620	2620	2620
% ABSORCIÓN	1,4	1,5	1,5

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.6: Resumen densidad real, neta y absorción de agua de la arena y grava.**

CARACTERISTICA	ARENA	NORMA	GRAVILLA	NORMA
$\rho$ NETA (Kg/m <sup>3</sup> )	2685	NCH 1239 Of 77	2743	NCH 1117 Of 2010
$\rho$ REAL SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	2582	NCH 1239 Of 77	2629	NCH 1117 Of 2010
$\rho$ REAL SSS (Kg/m <sup>3</sup> )	2620	NCH 1239 Of 77	2670	NCH 1117 Of 2010
$\rho$ Ap. SUELTA (Kg/m <sup>3</sup> )	1713	NCH 1116 Of 2008	1562	NCH 1116 Of 2008
$\rho$ . Ap. COMPACTADA (Kg/m <sup>3</sup> )	1833	NCH 1116 Of 2008	1692	NCH 1116 Of 2008
% ABSORCIÓN	1,5	NCH 1239 Of 77	1,6	NCH 1117 Of 2010

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4. Dosificación

Para el cálculo de las dosificaciones se empleará el método IDIEM, variante propuesta por J. Egaña en 2014. Considerando las granulometrías de los áridos y de acuerdo a recomendaciones empíricas del método señalado, se establece la proporción de arena que garantiza una docilidad adecuada para las mezclas.

Es necesario establecer las dosificaciones de arena y grava, para formar un árido que al estar combinado resulte apropiado en la conformación de mezcla, para obtener la consistencia buscada en el hormigón.

Considerando los valores promedios de las granulometrías realizadas. Se mezclarán los áridos, de modo que el porcentaje de árido combinado que pasa por la malla 4 sea del 42%, lo que corresponde a un hormigón armado de muy buena trabajabilidad. Por lo tanto, mirando el tamiz N° 4 los porcentajes de arena y grava que pasan son 83 y 6 por ciento respectivamente.

Por medio de la siguiente ecuación se puede obtener los porcentajes finales de arena y grava a utilizar de acuerdo a la granulometría de estas:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & 83A + 6G = 42(A + G) \\
 2) \quad & 41A - 36G = 0 \\
 3) \quad & A/G = 36/41 \\
 4) \quad & A = 36/(36 + 41) \rightarrow A = 0,47 ; G = 0,53
 \end{aligned}$$

Donde:

A = Porcentaje de arena en la mezcla de áridos.

G = Porcentaje de grava en la mezcla de áridos.

A + G = 100, puesto que ambos porcentajes sumarán el porcentaje completo de áridos.

Resolviendo el sistema de ecuaciones se determinó que para el árido combinado se necesita agregar un 47% de arena y un 53% de grava.

Con Una dosis fija de cemento por metro cubico de 300 kg, solo resta encontrar la cantidad de agua, para esto se recurre al método para dosificar Hormigones de J. Egaña. Donde se estima una dosis de agua para 300 kg/m<sup>3</sup> de cemento de 184 litros. Este mismo método estima un peso por metro cúbico de hormigón de 2420 kg/m<sup>3</sup> para un árido de tamaño máximo 20 mm.

La dosificación final para un metro cúbico de hormigón, queda como sigue:

Cemento	=	300 kg
Agua	=	184 kg
Arena	=	910 kg
Grava	=	1026 kg

Sumatoria: 300 + 184 + 910 + 1026 = 2420 kg

#### 4.4.1. Cono de Abrams y verificación del asentamiento para la dosificación de prueba

Se realiza un Hormigón con la dosificación calculada anteriormente, volumen de la colada 30 litros, de este se obtiene un asentamiento de cono de 7 cm. De esta manera observando la consistencia del hormigón logrado más su asentamiento se puede decir que la dosificación es satisfactoria.

Se fabrican 3 probetas cúbicas de arista 20 cm con el hormigón fabricado, las cuales serán ensayadas a compresión a los 28 días, para conocer la resistencia lograda con este hormigón, luego de ensayadas las probetas y dependiendo de las resistencias obtenidas, se realizarán modificaciones a la dosificación de ser necesario.



Figura 4.12, 4.13: Asentamiento del cono.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.14: Probetas de prueba, con dosificación inicial.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.2. Pruebas preliminares

##### a) Verificación de la dosificación de prueba

Luego del ensayo de cono de Abrams del punto 4.3.1. y con las probetas fabricadas para ensayo a compresión, con el fin de ajustar la dosificación, se realiza el ensayo a compresión de dichas probetas obteniendo los resultados presentes en la tabla 4.7, en la cual se presentan los resultados a compresión en las probetas de prueba de la dosificación inicial.

**Tabla 4.7: Resistencia en hormigones de prueba a los 28 días.**

MUESTRA	EDAD (DÍAS)	ÁREA (cm <sup>2</sup> )	CARGA (kN)	RESISTENCIA (MPa)
1-7D	28	400,4	524844	13,37
2-7D	28	400,4	554089	14,11
3-7D	28	399,8	540278	13,78

**Fuente: Elaboración propia.**

Promedio: 13,75 MPa

Durante las pruebas de resistencia a compresión para la dosificación de prueba, se obtuvo una resistencia a compresión máxima de 138 kg/cm<sup>2</sup> lo que se considera una resistencia baja para la dosis de cemento utilizada, por lo que se efectuarán correcciones a la dosificación.

##### b) Verificación de la relación A/C

Agua total utilizada durante la colada de prueba: 184 litros por metro cúbico, no se realizaron correcciones por humedades libres en áridos por lo que la cantidad de agua total presente en la mezcla puede haber sido mayor aun, cabe destacar que dejar pasar por alto un detalle tan importante como lo es la corrección de agua, contribuyó de manera negativa la resistencia a compresión del hormigón, por eso es que es muy necesario cuidar la cantidad de agua y la relación A/C presente en la mezcla, al momento de la fabricación.

- Relación A/C de la dosificación antes probada:  $184/300 = 0,61$  aproximadamente; Se observa una relación A/C bastante elevada por lo que se corregirá la cantidad de agua para las dosificaciones finales del hormigón patrón y con agregado de cápsulas de parafina, además se tendrán muy en consideración las correcciones necesarias antes del proceso de fabricación de las coladas.

#### 4.4.3. Dosificación de hormigón corregida

La dosificación final propuesta para la confección de hormigones queda como sigue:

Cemento	= 300 kg
Agua	= 160 kg
Arena	= 921 kg
Grava	= 1039 kg

#### 4.5. Dosificación de hormigón con cápsulas de parafina y patrón

La dosificación de las distintas cantidades de CPS para las distintas dosis de esta, se realizará reemplazando porcentajes de 6%, 9% y 12 % de volumen de grava por volumen de CPS. Las Distintas cantidades de material por metro cúbico, antes de correcciones por humedad presente en áridos, para los distintos porcentajes de reemplazo son las siguientes:

a) Hormigón patrón:

Cemento	: 300 kg
Agua	: 160 kg
Arena	: 921 kg
Grava	: 1039 kg

b) Hormigón 6% CPS:

Cemento	: 300 kg
Agua	: 160 kg
Arena	: 921 kg
Grava	: 977,2 kg
CPS	: 19,6 kg

c) Hormigón 9% CPS:

Cemento	: 300 kg
Agua	: 160 kg
Arena	: 921 kg
Grava	: 945,2 kg
CPS	: 29,4 kg

d) Hormigón 12% CPS:

Cemento	: 300 kg
Agua	: 160 kg
Arena	: 921 kg
Grava	: 913,1 kg
CPS	: 39,2 kg

#### 4.6. Confección de las coladas de hormigón

##### 4.6.1. Coladas de hormigón

Para la fabricación de los hormigones se tuvo presente el volumen a utilizar para cada porcentaje de reemplazo, considerando que el volumen máximo manejado por la betonera es de 60 litros aproximadamente es que se preparan los hormigones de la siguiente manera:

Volumen a ocupar por probetas:

- a) Compresión = 3.4 litros x 3 probetas = 11 litros aproximadamente
- b) Aislación = 25 litros x 3 probetas = 75 litros
- c) Exceso conveniente = 10 litros

Total, de litros a usar por colada = 96 litros aproximadamente, debido a que el volumen máximo manejado por la betonera de manera confiable es 60 litros, se realizarán 2 coladas por dosificación, cada una de 50 litros.

#### 4.6.2. Dosificación para 50 litros

A continuación, se presenta la tabla 4.7, la cual contiene las cantidades exactas en kilogramos a usar para cada uno de los reemplazos a utilizar por dosificación, Previos a correcciones por humedad de arena y grava.

**Tabla 4.8: Cantidad de material a usar por colada**

PATRON	Cemento	15,00
	agua	8,00
	arena	46,06
	grava	51,94

6% PARAFINA	Cemento	15,000
	agua	8,000
	arena	46,060
	grava	48,824
	6% parafina	0,980

9% PARAFINA	Cemento	15,000
	agua	8,000
	arena	46,060
	grava	47,265
	9% parafina	1,471

12% PARAFINA	Cemento	15,000
	agua	8,000
	arena	46,060
	grava	45,707
	12% parafina	1,961

**Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.6.3. Preparación de los moldes

Los moldes que se ocupan para la confección de probetas destinadas a ensayos de resistencia a compresión deben estar acordes en las tolerancias establecidas en la NCh 1017 Of. 75.

Previo a ser llenados, se les debe aplicar el producto desmoldante, el cual, en el caso de la escuela, se usa aceite quemado para tal efecto.

Para las probetas de ensayo a aislación térmica, se utilizan moldes fabricados especialmente para este propósito, debido a que el tipo de probeta necesaria es un panel de hormigón de dimensiones 60x60x7 cm, es que se fabrican moldes con estas dimensiones dejando como cara de llenado una de las dos de mayor área, para facilitar el llenado de estos. En la figura 4.15 pueden observarse los moldajes preparados para cada una de las coladas.



**Figura 4.15: Preparación de moldes.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.6.4. Determinación de docilidad de la mezcla

La docilidad de la mezcla se determinará para cada una de las coladas con el método de asentamiento del cono de Abrams y cuyo procedimiento y alcances de aplicación se establecen en la NCh 1019 Of. 74, en la Figura 4.16 se observa el método de toma de asentamiento, siendo este representativo para cada una de las mediciones que se realizarán para cada una de las distintas coladas.



**Figura 4.16: medición de asentamiento del cono de Abrams.  
Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.6.5. Llenado, desmolde y curado de probetas

El llenado de las probetas se realizará según NCh 1017 Of. 75, efectuándose en 2 capas y compactando a través de medios mecánicos

El desmolde de las probetas, para todas las coladas, se realizará una vez cumplido el plazo mínimo de 24 horas después de realizado el llenado de estas.

Con respecto al curado de las probetas, estas serán sumergidas en agua durante 7 días y luego serán retiradas y dejadas bajo techo, el tiempo restante hasta enterar los 28 días, cumplido el plazo, serán ensayadas y se registrarán y analizarán los resultados.

En la figura 4.17, 4.18 y 4.19 se pueden observar los procesos de llenado, vibrado y desmolde de moldes respectivamente.



**Figura 4.17: llenado de moldes.  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 4.18: Vibrado de moldes.**  
**Fuente: Elaboración propia**



**Figura 4.19: Desmoldaje de probetas.**  
**Fuente: Elaboración propia**

*Capítulo V*  
*Presentación y análisis de resultados*

## 5. Presentación y análisis de resultados

### 5.1. Generalidades

Cumpliendo con el protocolo de lo señalado en el capítulo anterior se presentan los primeros resultados obtenidos y a su vez se realiza su respectivo análisis.

La metodología de análisis tiene una secuencia lógica desde la fabricación de hormigón hasta la ejecución de los ensayos.

### 5.2. Obtención y análisis de resultados preliminares

#### 5.2.1. Coladas y nomenclaturas

A continuación, se expone en la tabla 5.1 la nomenclatura y las cantidades de coladas de hormigón fabricado para cada uno de los reemplazos.

**Tabla 5.1: Tipos de hormigón.**

Tipo de hormigón	Nomenclatura	Número de coladas
PATRON	HP-300C	2
6% parafina	HC-300C-6	2
9% parafina	HC-300C-9	2
12% parafina	HC-300C-12	2

Fuente: Elaboración propia

### 5.3. Propiedades en estado fresco

#### 5.3.1. Ensayos de asentamientos

Docilidad: La obtención de la docilidad de las mezclas, se determinó para cada colada en base al método de asentamiento del cono de Abrams. La tabla 5.2 muestra los resultados de los asentamientos obtenidos para las distintas coladas.

**Tabla 5.2: Asentamiento y demanda de agua en función de porcentajes de reemplazo.**

Hormigón	colada	asentamiento en cm	agua extra en kg
HP-300C	1	5	0,25
	2	4,5	0,20
HC-300C-6	3	4	0,15
	4	4,5	0,17
HC-300C-9	5	5	0,10
	6	4,5	0,10
HC-300C-12	7	4	0,00
	8	3,5	0,00

Fuente: Elaboración propia

Para mantener el asentamiento dentro de los límites establecidos, fue necesario corregir el agua de amasado, según se indica en la tabla 5.2.

En la tabla 5.2 se puede observar que a medida que aumenta el reemplazo de grava por cápsulas de parafina, la cantidad de agua necesaria para mantener la docilidad, disminuye, esto debido a que las cápsulas de parafina no son porosas y no absorben agua, debido a esto, a pesar de la disminución de agua de amasado, los hormigones mantienen su plasticidad, permitiendo la colocación y compactación dentro de los moldes sin dificultad, o sea, mantienen una docilidad satisfactoria.

### 5.3.2. Relaciones agua cemento de cada una de las coladas

- a) En la tabla 5.3 se presenta la corrección por humedad realizada. Tanto la arena como la grava, se encuentran acopiadas en sacos bajo techo, por lo que la humedad presente en estas es bastante constante en el tiempo.

**Tabla 5.3: Humedad libre en áridos.**

Hormigón	colada	material	Humedad total	% absorción	Humedad libre	agua en kg
HP-300C	1	Arena	2,7	1,5	1,2	0,55
		Grava	1,7	1,6	0,1	0,05
	2	Arena	2,7	1,5	1,2	0,55
		Grava	1,7	1,6	0,1	0,05
HC-300C-6	3	Arena	2,6	1,5	1,1	0,51
		Grava	1,7	1,6	0,1	0,05
	4	Arena	2,6	1,5	1,1	0,51
		Grava	1,7	1,6	0,1	0,05
HC-300C-9	5	Arena	2,5	1,5	1	0,46
		Grava	1,6	1,6	0	0,00
	6	Arena	2,5	1,5	1	0,46
		Grava	1,6	1,6	0	0,00
HC-300C-12	7	Arena	2,5	1,5	1	0,46
		Grava	1,6	1,6	0	0,00
	8	Arena	2,5	1,5	1	0,46
		Grava	1,6	1,6	0	0,00

**Fuente: Elaboración propia**

- b) Con los datos obtenidos en la tabla 5.3 se corrige la cantidad de agua de cada colada, la que queda como se indica a continuación en la tabla 5.4, además de la corrección por humedad en áridos, durante la fabricación de cada colada de acuerdo a la experiencia e inspecciones visuales durante el proceso de mezclado en betonera se agrega pequeñas cantidades de agua extra a la calculada para la dosificación, la que se registra y se suma a la cantidad total de agua agregada a cada una de las coladas.

**Tabla 5.4: Agua final utilizada por colada.**

Hormigón	colada	agua corregida	agua extra agregada	agua final por colada
HP-300C	1	7,40	0,25	7,65
	2	7,40	0,20	7,60
HC-300C-6	3	7,44	0,15	7,59
	4	7,44	0,17	7,61
HC-300C-9	5	7,54	0,10	7,64
	6	7,54	0,10	7,64
HC-300C-12	7	7,54	0,00	7,54
	8	7,54	0,00	7,54

Fuente: Elaboración propia

- c) Con los datos de la tabla 5.4 se puede obtener la relación agua / cemento de cada una de las coladas las que se muestran en la tabla 5.5.

**Tabla 5.5: Relación agua / cemento por colada.**

Hormigón	colada	relación A/C
HP-300C	1	0,51
	2	0,51
HC-300C-6	3	0,51
	4	0,51
HC-300C-9	5	0,51
	6	0,51
HC-300C-12	7	0,50
	8	0,50

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la relación A/C, esta se mantiene constante en cada uno de los reemplazos, en comparación con el hormigón patrón, exceptuando el último reemplazo de 12 % en el cual la relación A/C disminuye en 1 punto, esto debido a que durante la fabricación mediante inspección visual de las coladas 7 y 8, mientras se mezclaba y bajo la experiencia personal en mezclas de hormigón, se determinó que no era necesario agregar agua extra a la mezcla, lo que contribuyó a esa baja en la relación agua cemento. A esto se suma un asentamiento de cono levemente inferior en cuanto al promedio general, sin embargo, la docilidad de la mezcla es similar al resto, permitiendo una colocación en moldes y compactación mediante vibrado igual al de las coladas anteriores.

- d) En relación al aspecto visual de cada una de las mezclas, se puede observar una consistencia similar en cada una de las mezclas, a pesar de los distintos porcentajes de reemplazos, la docilidad es igual en cada una de las mezclas.

#### 5.4. Ensayo térmico

El presente ensayo es de elaboración propia y fue desarrollado con el fin de establecer parámetros comparativos entre los paneles de muro diseñados, con incorporación del material cambio de fase, y los paneles de muro diseñados como patrón.

Este somete a los paneles a una diferencia de temperatura entre una cara y otra, esto se realiza dentro de una cámara hermética, a la cual el panel separa en dos ambientes, uno caliente, que es donde se encuentra la fuente emisora de calor y un ambiente frío, que es el volumen de la cámara en el lado opuesto de la cara del panel que recibe el calor.

Para la generación de calor se utilizó dos halógenos de 500 Watts cada uno, entregando una energía de 1000 Watts en la cámara caliente (Cámara A). Para la medición de temperaturas se colocaron los sensores térmicos del Xplorer GLX en ambas caras del panel. Se usa el software "PASCO Capstone" conectado de forma constante al Xplorer para de esta forma monitorear en todo momento las temperaturas.

En la figura 5.1 se muestra un esquema con la disposición del panel dentro de la cámara, así como también la disposición de los sensores dentro de la cámara. En la figura 5.2 y 5.3 se muestra el panel en posición y la fuente de calor, respectivamente.

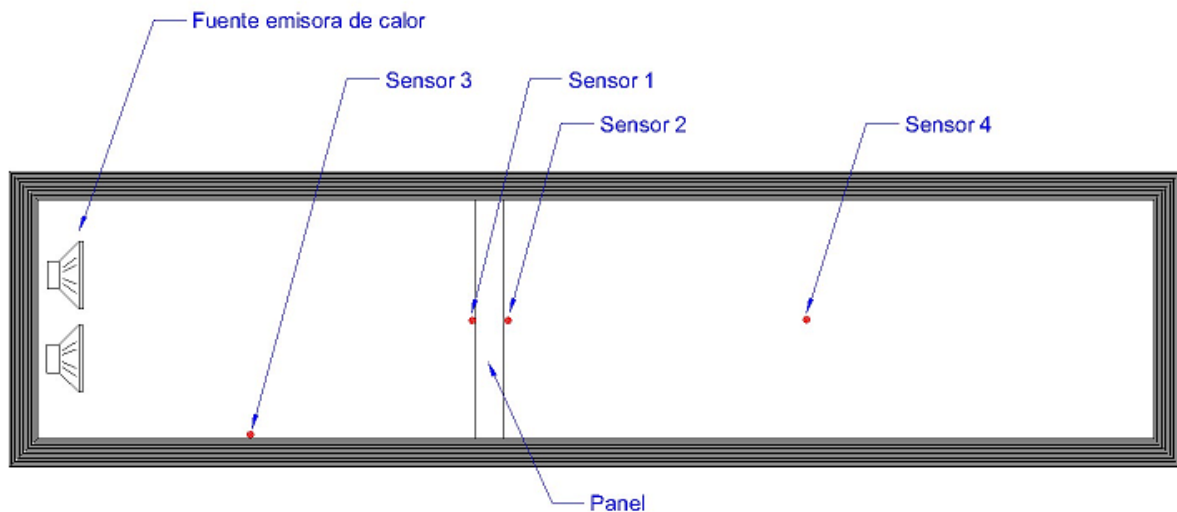


Figura 5.1: Esquema con ubicación panel y sensores en cámara térmica.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.2: Panel en posición dentro de la cámara térmica.  
Fuente: Elaboración propia**



**Figura 5.3: Fuente generadora de calor.  
Fuente: Elaboración propia**

En la figura 5.4 se observa la instrumentación usada durante los ensayos térmicos. Cada ensayo se realizó durante 4,5 horas a cada uno de los paneles, se comenzó con los ensayos a la misma hora,

procurando una temperatura ambiente similar en cada uno de los inicios de los ensayos, la cual se encontró para todos los ensayos entre los 17 y 19 grados Celsius con promedio general de temperaturas al comenzar los ensayos de 18 °C, la toma de muestras se realizó con intervalos de tiempo de 60 segundos obteniéndose un total de 270 datos para cada panel ensayado. Debido a la energía entregada por la fuente de calor, la elevación de temperatura durante los primeros minutos se realizó de manera rápida por lo que durante los primeros 5 minutos la temperatura se elevaba desde los 17 a los 22 grados Celsius, por lo que cuando se comenzaba con temperatura ambiente superior a 17 grados se tuvo en cuenta esto restando la cantidad de minutos al tiempo en que se mantenía la fuente de calor encendida, para que durante la comparación y superposición de los gráficos de temperatura en el lado caliente (cámara A) fuese similar en todos los casos, y de esta forma también la entrega de energía al panel fuese la misma.

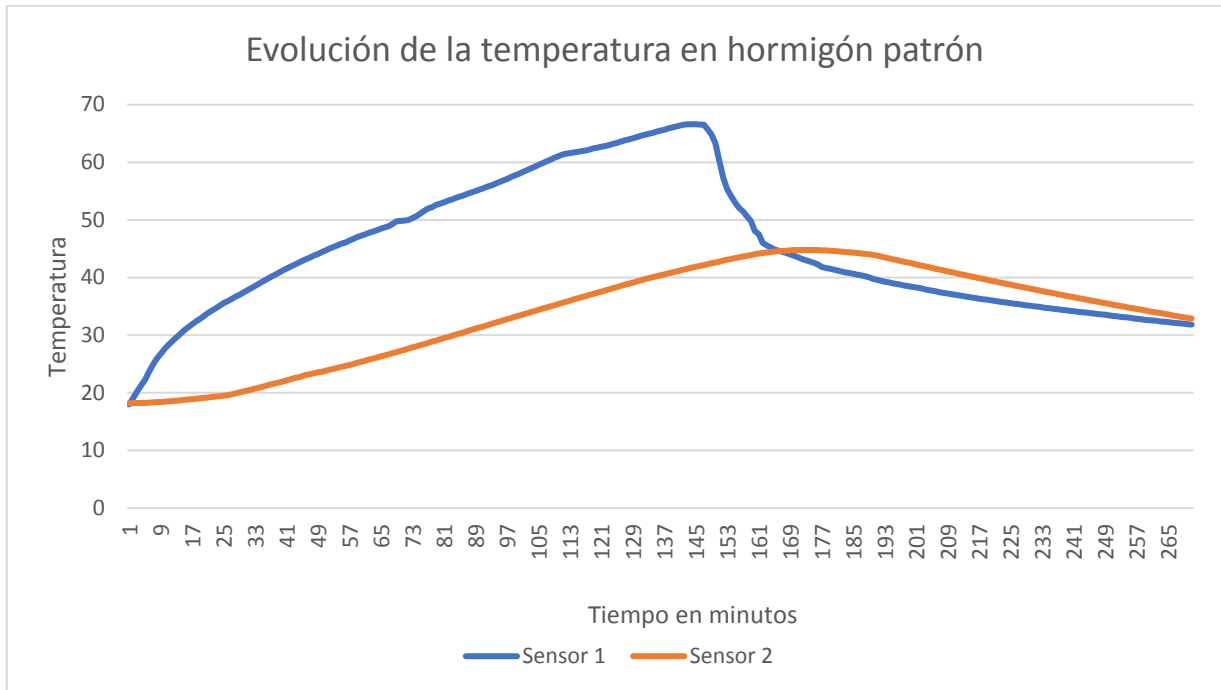


**Figura 5.4: instrumentos usados en el experimento.  
Fuente: Elaboración propia**

#### 5.4.1. Resultados ensayo térmico panel patrón

Se ensayó el panel de hormigón patrón en su disposición horizontal de medidas 60x60x7cm, dentro de la cámara térmica, cerrando esta y dejándola lo más hermética posible usando aislantes sintéticos como son el Fisiterm. Se ensayaron los paneles durante un tiempo de 4,5 horas cada uno, debido al tiempo que tarda el ensayo se procedió a hacer un ensayo por día, en días consecutivos, en los cuales la temperatura ambiente fue similar durante los días en que se ensayó, junto a esto se tuvo en consideración el ensayo de un tipo de panel por día, de esta manera la mayor diferencia de tiempo entre los ensayos de cada panel de distinto porcentaje de reemplazo fue de solo 1 día, y no de 4 días como hubiese ocurrido de hacer los tres ensayos de panel de cada tipo consecutivamente. Se evaluaron los resultados de los paneles ensayados, los cuales promediaron para el posterior análisis.

El gráfico de la figura 5.5 muestra las temperaturas promedio de los paneles, en ambas caras de este. La tabla 5.6 muestra un resumen de las temperaturas obtenidas.



**Figura 5.5: Gráfico de temperatura en panel patrón.**  
**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 5.6: Temperaturas significativas HP.**

Valor	Temp. (°C) cara A (Sensor 1)	Temp. (°C) cara B (Sensor 2)
Mínimo	17,94	18,02
Máximo	66,55	44,59
Delta de temp. Entre máx.	21,96 °C	

**Fuente: Elaboración propia**

Las temperaturas para el lado A de la cámara térmica (el que contiene la fuente emisora de calor) fluctúan entre los 17,94 °C y los 66,55 °C, desde el gráfico se puede observar que la temperatura a partir de los 32 °C aproximadamente comienza a subir de manera lineal alcanzando un punto máximo de 66,55 °C en el minuto 145 (2 horas 25 minutos) luego de mantenerse una temperatura estable durante 10 minutos entre las 2 horas 20 minutos y las 2 horas 30 minutos. La diferencia máxima de temperatura fue de 21,96 °C, la diferencia de temperatura de las caras se mantuvo estable entre los 19 y los 22 °C aproximadamente durante la mayor parte del tiempo, como se puede apreciar en el gráfico de la figura 5.5. En el lado B de la cámara térmica las temperaturas fluctúan entre los 18,02 y los 44,59 °C, es posible notar una diferencia entre las temperaturas iniciales, esto es debido al error presente en los distintos

sensores de Xplorer GLX, se tuvo presente este error y se usaron los mismos sensores en las mismas superficies para obtener los mismos resultados representativos en todos los ensayos.

Determinación del flujo de calor por unidad de tiempo, debido a la conducción a través del material patrón:

$$Q = \frac{k * A}{x} * (T_1 - T_2)$$

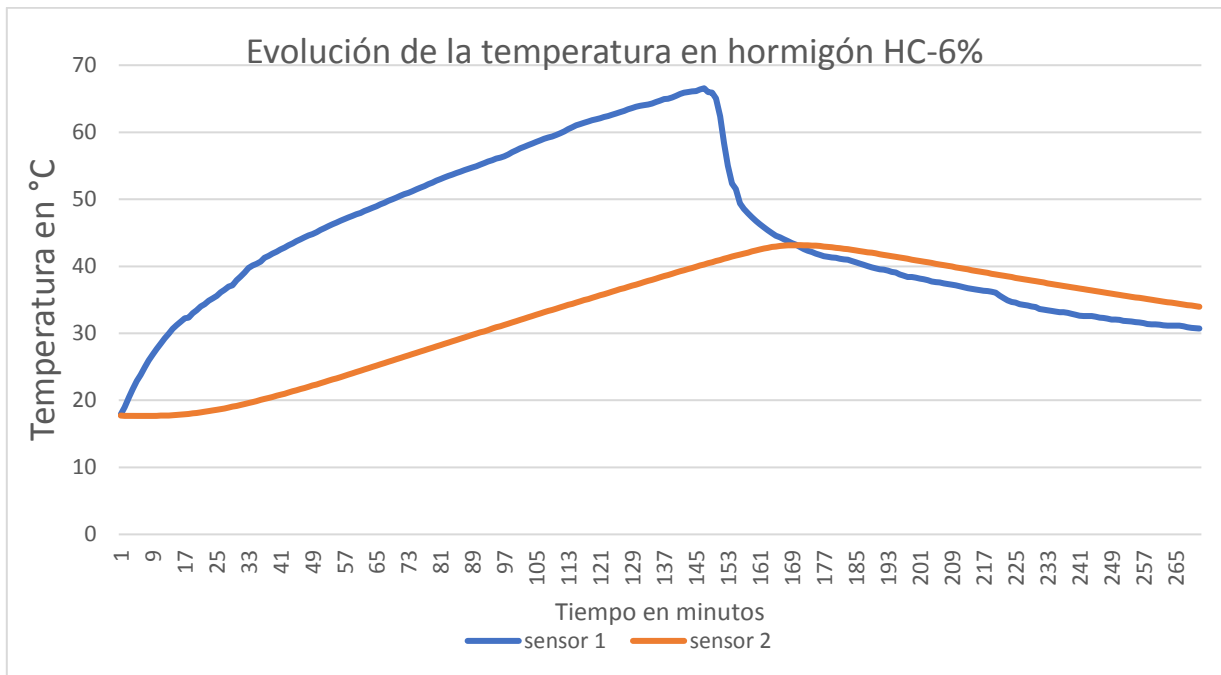
$$Q = \frac{1,63 * 0,36}{0,07} * (21,96) \rightarrow Q = 184,088 \text{ W}$$

Luego, teniendo en cuenta que, para el hormigón común vibrado, con densidad aproximada de 2400 kg/m<sup>3</sup> el coeficiente de conductividad térmica es de 1,63  $\frac{W}{m * K}$ , el calor transmitido en estas condiciones es de 184,088 W aproximadamente. Teniendo en cuenta este valor de calor transmitido durante el momento de mayor diferencia de temperaturas, es que se procederá en los distintos paneles siguientes a determinar el nuevo coeficiente de conductividad térmica de los distintos paneles con los distintos porcentajes de reemplazo de material cambio de fase.

#### 5.4.2. Resultados ensayo térmico panel con 6% de reemplazo de cápsulas de parafina encapsulada

Este ensayo fue realizado bajo las mismas condiciones que el ensayo anterior, pero esta vez el elemento analizado corresponde al panel de hormigón fabricado con un reemplazo de 6% de cápsulas de parafina por árido grueso.

El gráfico de la figura 5.6 muestra las temperaturas promedio de los paneles, en ambas caras de este. La tabla 5.7 muestra un resumen de las temperaturas obtenidas.



**Figura 5.6: Gráfico de temperatura en panel con 6% de cápsulas.**  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.7: Temperaturas significativas panel HC-6%**

Valor	Temp. (°C) cara A (Sensor 1)	Temp. (°C) cara B (Sensor 2)
Mínimo	17,9	17,72
Máximo	66,56	43,16
Delta de temp. Entre máx.	23,4	

Fuente: Elaboración propia

Las temperaturas para el lado A de la cámara térmica (el que contiene la fuente emisora de calor) fluctúan entre los 17,9 °C y los 66,56 °C, desde el gráfico se puede observar que la temperatura a partir de los 40 °C aproximadamente comienza a subir de manera lineal alcanzando un punto máximo de 66,56 °C en el minuto 147 (2 horas 27 minutos) luego de mantenerse una temperatura estable durante 10 minutos entre las 2 horas 20 minutos y las 2 horas 30 minutos. La diferencia máxima de temperatura fue de 23,4 °C, la diferencia de temperatura de las caras se mantuvo estable entre los 20 y los 26 °C aproximadamente durante la mayor parte del tiempo, como se puede apreciar en el gráfico de la figura 5.6. En el lado B de la cámara térmica las temperaturas fluctúan entre los 17,72 y los 43,16 °C, observándose una baja de temperatura máxima de aproximadamente 1,6 °C respecto al panel patrón.

Determinación del coeficiente de conducción térmica de este hormigón con 6% de cápsulas de parafina, considerando como calor transmitido aquel que se determinó en el panel de hormigón patrón.

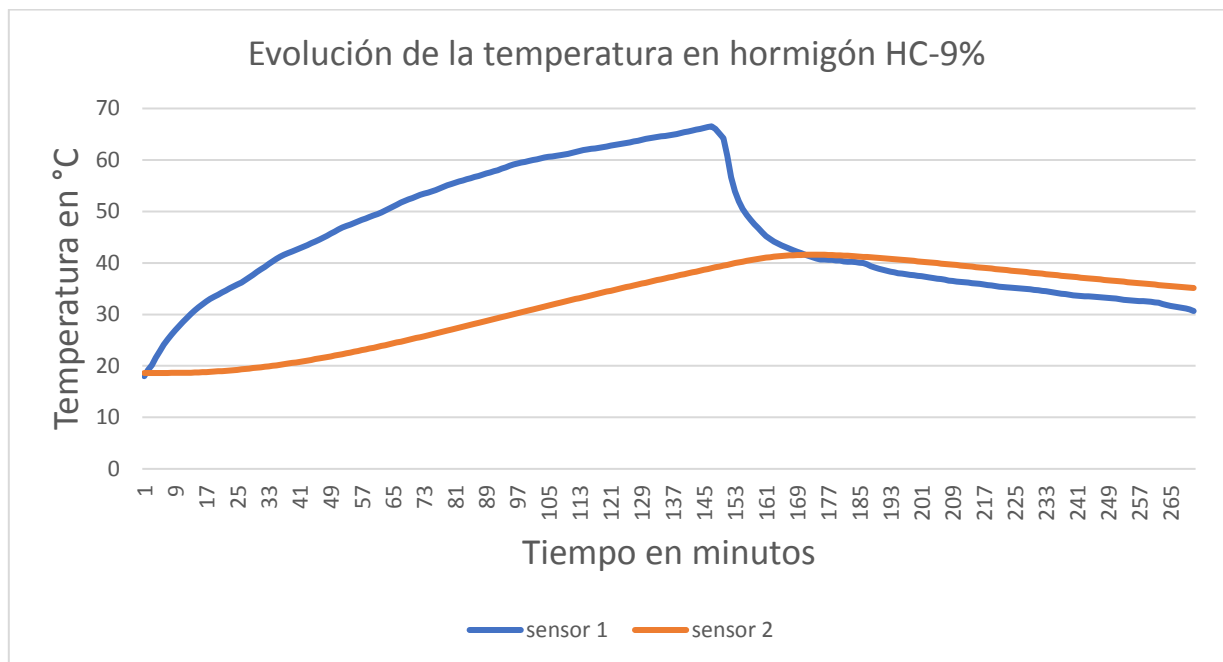
$$184,088 = \frac{k * 0,36}{0,07} * (23,4) \rightarrow k = 1,53 \frac{W}{m * K}$$

Luego, se puede observar que con un 6% de reemplazo el coeficiente de conductividad térmica baja a  $1,53 \frac{W}{m * K}$ . Una disminución de 0,1 puntos respecto a un hormigón convencional vibrado, de densidad  $2400 \text{ kg/m}^3$

#### 5.4.3. Resultados ensayo térmico panel con 9% de reemplazo de cápsulas de parafina encapsulada

Este ensayo fue realizado bajo las mismas condiciones que el ensayo anterior, pero esta vez el elemento analizado corresponde al panel de hormigón fabricado con un reemplazo de 9% de cápsulas de parafina por árido grueso.

El gráfico de la figura 5.7 muestra las temperaturas promedio de los paneles, en ambas caras de este. La tabla 5.8 muestra un resumen de las temperaturas obtenidas.



**Figura 5.7: Gráfico de temperatura en panel con 9% de cápsulas.**

**Fuente: Elaboración propia**

Tabla 5.8: Temperaturas significativas panel HC-9%

Valor	Temp. (°C) cara A (Sensor 1)	Temp. (°C) cara B (Sensor 2)
Mínimo	18	18,62
Máximo	66,52	41,6
Delta de temp. Entre máx.	24,92	

Fuente: Elaboración propia

Las temperaturas para el lado A de la cámara térmica (el que contiene la fuente emisora de calor) fluctúan entre los 18,0 °C y los 66,52 °C, desde el gráfico se puede observar que la temperatura a partir de los 32 °C aproximadamente comienza a subir de manera lineal alcanzando un punto máximo de 66,52 °C en el minuto 147 (2 horas 27 minutos) luego de mantenerse una temperatura estable durante 10 minutos entre las 2 horas 20 minutos y las 2 horas 30 minutos. La diferencia máxima de temperatura fue de 24,92 °C, la diferencia de temperatura de las caras se mantuvo estable entre los 22 y los 28 °C aproximadamente durante la mayor parte del tiempo, como se puede apreciar en el gráfico de la figura 5.7. En el lado B de la cámara térmica las temperaturas fluctúan entre los 18,62 y los 41,6 °C, observándose una baja de temperatura máxima de aproximadamente 3,2 °C respecto al panel patrón.

Determinación del coeficiente de conducción térmica de este hormigón con 9% de cápsulas de parafina, considerando como calor transmitido aquel que se determinó en el panel de hormigón patrón.

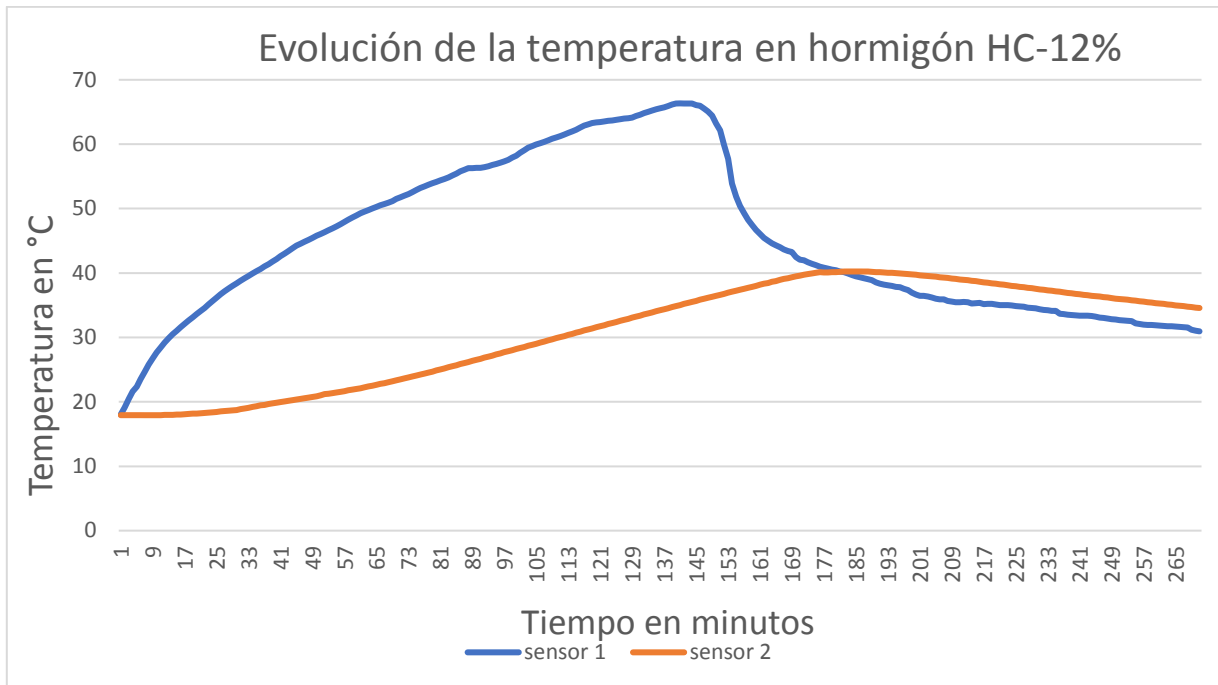
$$184,088 = \frac{k * 0,36}{0,07} * (24,92) \rightarrow k = 1,44 \frac{W}{m * K}$$

Luego, se puede observar que con un 9% de reemplazo el coeficiente de conductividad térmica baja a  $1,44 \frac{W}{m * K}$ . Una disminución de 0,19 puntos respecto a un hormigón convencional vibrado, de densidad 2400 kg/m<sup>3</sup>

#### 5.4.4. Resultados ensayo térmico panel con 12% de reemplazo de cápsulas de parafina encapsulada

Este ensayo fue realizado bajo las mismas condiciones que el ensayo anterior, pero esta vez el elemento analizado corresponde al panel de hormigón fabricado con un reemplazo de 12% de cápsulas de parafina por árido grueso.

El gráfico de la figura 5.8 muestra las temperaturas promedio de los paneles, en ambas caras de este. La tabla 5.9 muestra un resumen de las temperaturas obtenidas.



**Figura 5.8:** Gráfico de temperatura en panel con 12% de cápsulas.  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.9:** Temperaturas significativas panel HC-12%

Valor	Temp. (°C) cara A (Sensor 1)	Temp. (°C) cara B (Sensor 2)
Mínimo	18,04	17,93
Máximo	66,34	40,24
Delta de temp. Entre máx.	26,1	

Fuente: Elaboración propia

Las temperaturas para el lado A de la cámara térmica (el que contiene la fuente emisora de calor) fluctúan entre los 18,04 °C y los 66,34 °C, desde el gráfico se puede observar que la temperatura a partir de los 33 °C aproximadamente comienza a subir de manera lineal alcanzando un punto máximo de 66,34 °C en el minuto 141 (2 horas 21 minutos) luego de mantenerse una temperatura estable durante 10 minutos entre las 2 horas 15 minutos y las 2 horas 30 minutos. La diferencia máxima de temperatura fue de 26,1 °C, la diferencia de temperatura de las caras se mantuvo estable entre los 26 y los 31 °C aproximadamente durante la mayor parte del tiempo, como se puede apreciar en el gráfico de la figura

5.8. En el lado B de la cámara térmica las temperaturas fluctúan entre los 17,93 y los 40,24 °C, observándose una baja de temperatura máxima de aproximadamente 4,5 °C respecto al panel patrón.

Determinación del coeficiente de conducción térmica de este hormigón con 12% de cápsulas de parafina, considerando como calor transmitido aquel que se determinó en el panel de hormigón patrón.

$$184,088 = \frac{k * 0,36}{0,07} * (26,1) \rightarrow k = 1,37 \frac{W}{m * K}$$

Luego, se puede observar que con un 12% de reemplazo el coeficiente de conductividad térmica baja a  $1,37 \frac{W}{m * K}$ . Una disminución de 0,26 puntos respecto a un hormigón convencional vibrado, de densidad 2400 kg/m<sup>3</sup>

## 5.5. Superposición de temperaturas en los paneles

### 5.5.1. Superposición de temperaturas en cara A de los paneles

El gráfico de la figura 5.9 muestra la superposición de temperaturas en la cara A de los paneles (cara que se encuentra en el lado de la cámara que contiene la fuente emisora de calor), en este se aprecia la semejanza en las temperaturas.

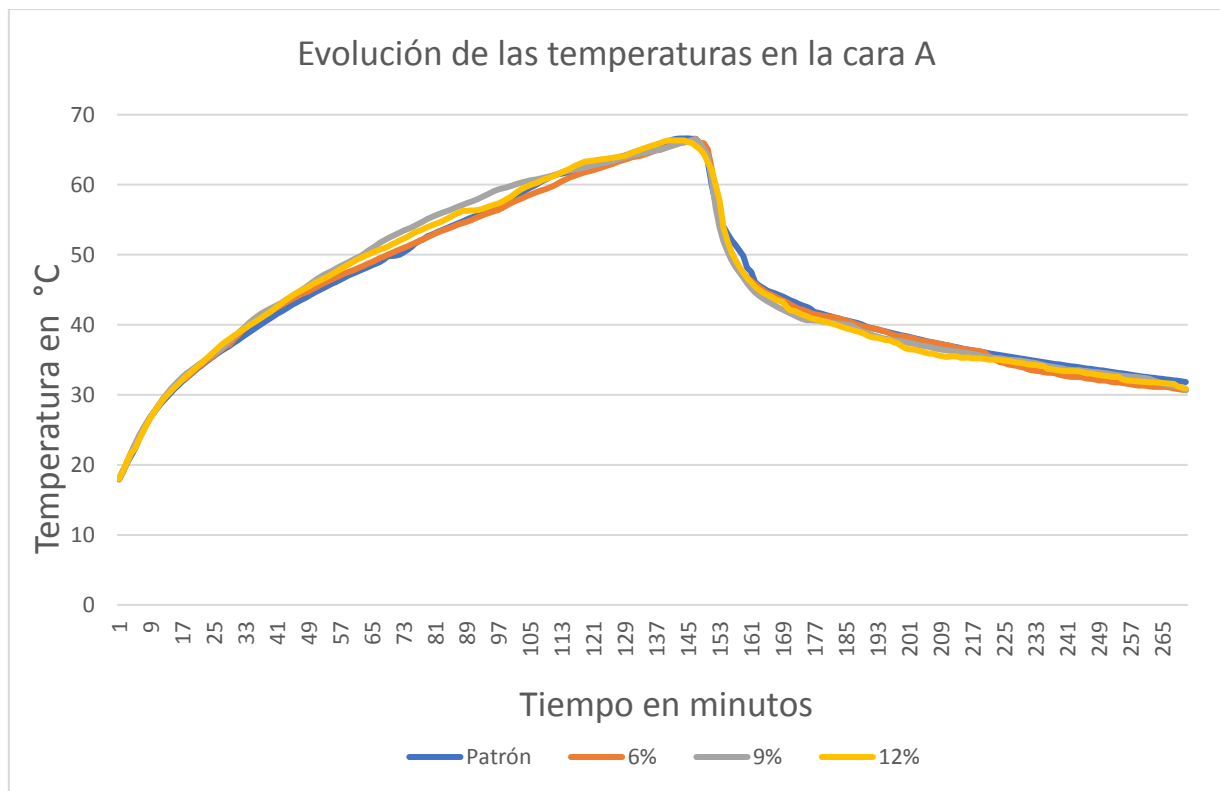


Figura 5.9: Gráfico comparativo de temperaturas en caras A de los paneles.

**Fuente: Elaboración propia**

Como se aprecia en el gráfico de la figura 5.9, la temperatura para cada uno de los experimentos se eleva de manera similar, esto debido al cuidado al momento de hacer los ensayos, procurando comenzar cada ensayo a la misma hora en días con temperaturas al momento de iniciar el experimento similares, variando entre los 18 y 19 °C a las 9 de la mañana, además la energía entregada en la cara A de la cámara fue en todos los experimentos de 1000 Watts y el volumen de la cámara A siempre fue el mismo, es debido a estos cuidados que para cada experimento se tiene que la elevación de temperatura en las caras A de los paneles fue siempre similar. De esta manera la comparación entre cada uno de los paneles es objetiva y se puede llegar a una conclusión representativa de la realidad.

En el gráfico se aprecia que, al llegar a un peak de temperatura, esta baja abruptamente, esto es debido a que durante el experimento se entregó calor durante 2 horas 30 minutos, para luego dejar de entregar energía y abrir el lado A de la cámara, ventilando así este y de esta forma bajar la temperatura de la parte A de la cámara térmica, esto se hizo con motivo de crear de manera artificial un periodo de “carga y descarga” de energía dentro del panel. El descenso abrupto en la temperatura es debido a la gran diferencia de temperaturas al momento de abrir la cámara, entre la temperatura ambiente y la temperatura dentro de la cámara A. La que luego de llegar a un valor cercano a los 45 grados deja de bajar por lo que se hace necesario una ventilación forzada para hacer bajar la temperatura de la cara A del panel, esta ventilación forzada se realiza con un ventilador que proporciona 4 flujos distintos de aire, se tuvo cuidado durante esta parte del experimento en hacer bajar la temperatura a la misma velocidad tomando como referencia el primer experimento realizado y el flujo de aire utilizado durante ese experimento, de esta forma variando el flujo de aire cuando era necesario es que se obtuvo para cada experimento un descenso de temperatura similar.

### 5.5.2. Superposición de temperaturas en cara B de los paneles

El gráfico de la figura 5.10 muestra la superposición de temperaturas en la cara B de los paneles. Esta cara corresponde a la cara donde se encuentra el sensor número 2 del Xplorer GLX.

Como se puede apreciar en el gráfico de la figura 5.10 presente en la página siguiente a medida que aumenta la proporción de cápsulas de parafina en el hormigón, aumenta también el nivel de aislación térmica obteniéndose una diferencia entre las temperaturas peak de 4,5 °C en el caso de la comparación entre el hormigón patrón y el hormigón con mayor porcentaje de cápsulas de parafina incorporada, en este caso el 12% de sustitución. También se puede observar que se genera una inercia térmica en los paneles de hormigón con agregados de cápsulas de parafina, esto se puede observar a partir del minuto 223 aproximadamente, donde la temperatura del panel de hormigón con cápsulas de parafina disminuye de manera más lenta que en el panel de hormigón patrón. Esto se corresponde de manera satisfactoria con los resultados esperados.

Queda reflejado en el gráfico que la incorporación de material cambio de fase, en este caso cápsulas de parafina sólida, mejora las propiedades de aislación térmica, así como también aumenta la inercia térmica del hormigón.

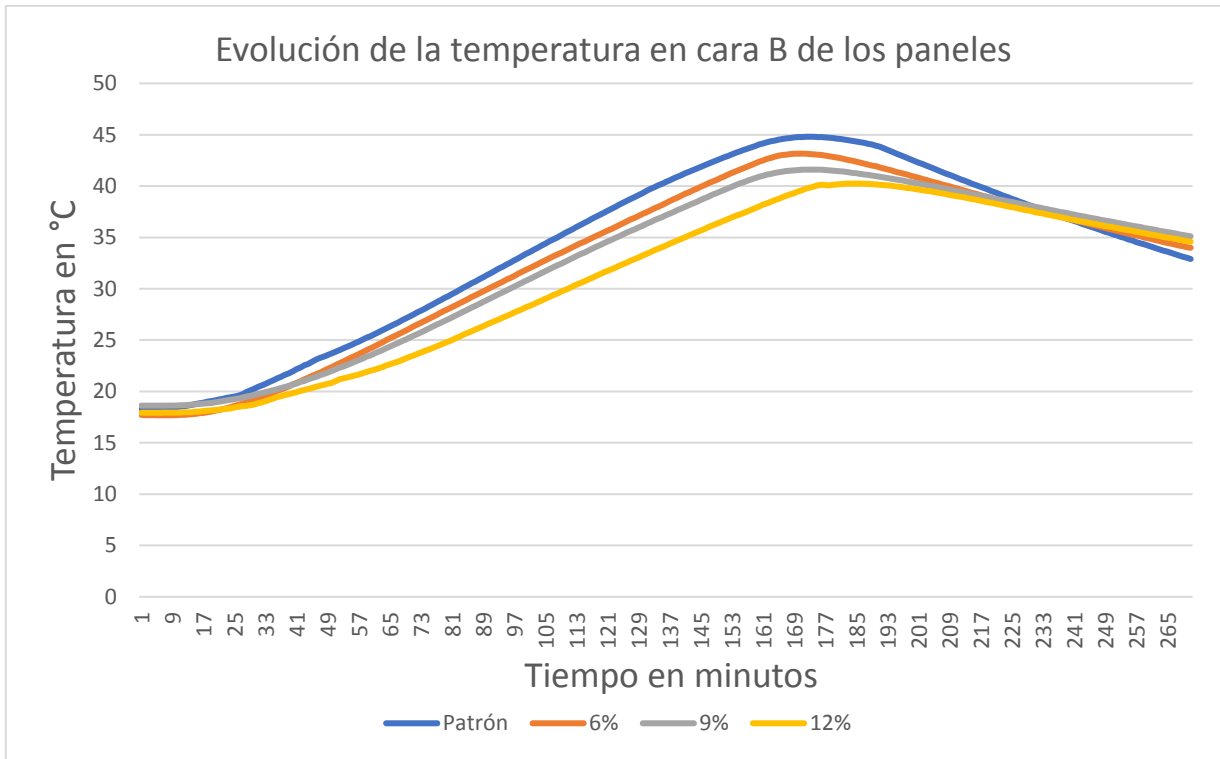


Figura 5.10: Gráfico comparativo de temperatura en caras B de los paneles.

Fuente: Elaboración propia

### 5.5.3. Superposición de temperaturas en ambas caras de los paneles

El gráfico de la figura 5.11 muestra la superposición de todos los gráficos de temperaturas.

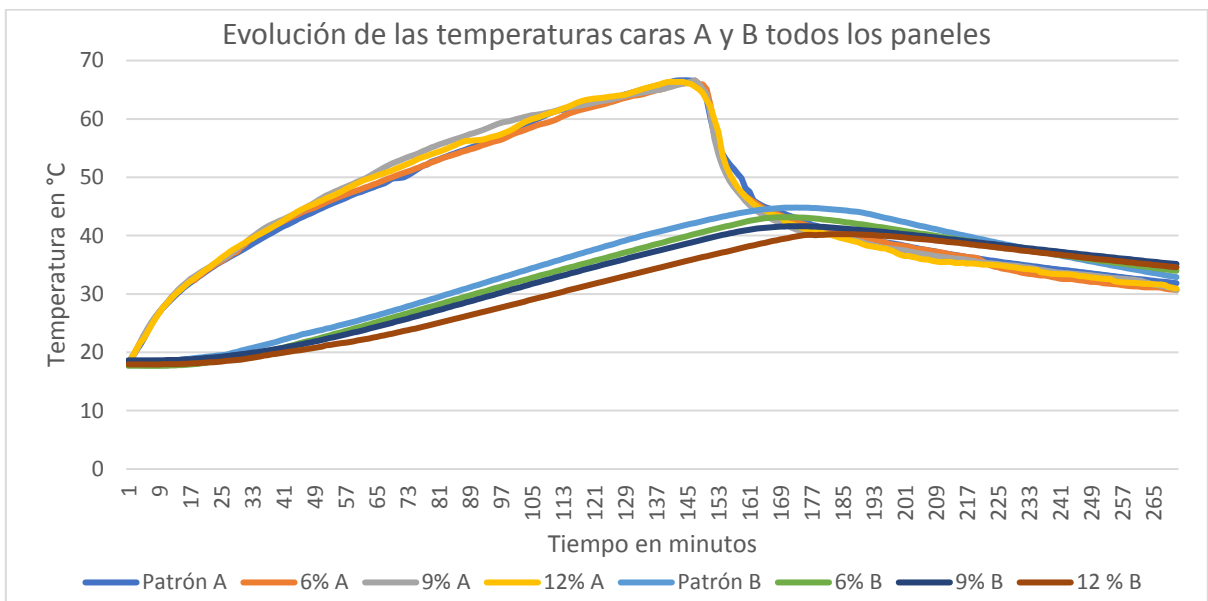


Figura 5.11: Gráfico comparativo de temperatura en ambas caras de los paneles.

Fuente: Elaboración propia

## 5.6. Resistencias y densidades de los hormigones

### 5.6.1. Resultados ensayo resistencia a compresión a 28 días

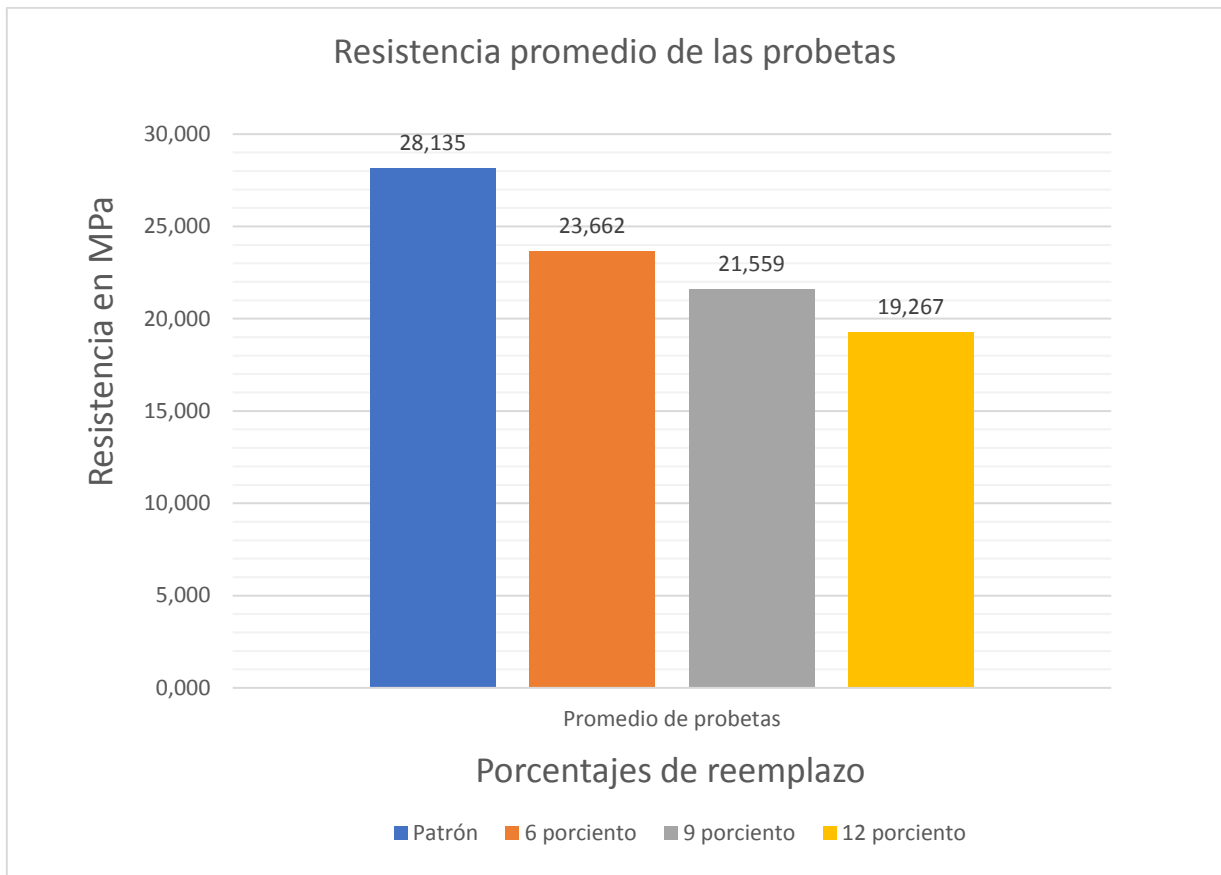
A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los ensayos a compresión a los hormigones a edad de 28 días, se toma como resistencia representativa aquella lograda con el hormigón patrón, en la tabla 5.10 se muestran los datos obtenidos en mega Pascales y el promedio de las resistencias, así como también el porcentaje de estas respecto del hormigón patrón, respectivamente.

**Tabla 5.10: Resistencia en MPa y porcentajes de pérdida de resistencia.**

	resistencia en MPa			<b>Promedio 3 probetas</b>	<b>Resistencia porcentaje</b>
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3		
PATRON	28,141	27,870	28,394	<b>28,135</b>	100%
6%	23,365	23,680	23,943	<b>23,662</b>	84%
9%	21,771	21,245	21,660	<b>21,559</b>	77%
12%	19,350	18,988	19,464	<b>19,267</b>	68%

**Fuente: Elaboración propia**

En el gráfico de la figura 5.12 se muestra la resistencia obtenida en cada grupo de probetas, se puede apreciar claramente una disminución significativa en la resistencia para las probetas fabricadas con 6% de capsulas en comparación al hormigón patrón, sin embargo, si analizamos los datos se obtiene que la disminución de resistencia se genera de forma lineal, esto se demuestra en la tabla 5,11 y el gráfico de la figura 5.13.

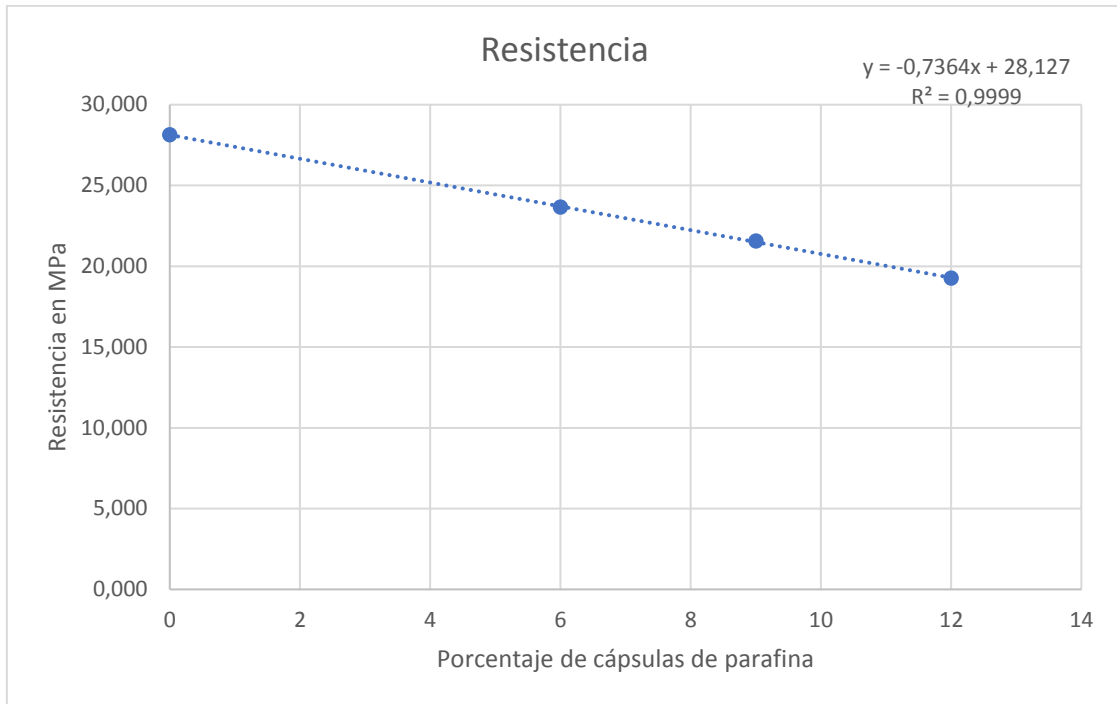


**Figura 5.12: Gráfico comparativo de resistencia a compresión en las probetas cúbicas.**  
**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 5.11: Coeficiente de correlación**

% de capsulas de parafina	Resistencia promedio
0	28,135
6	23,662
9	21,559
12	19,267
Coeficiente de correlación	-0,9999267

**Fuente: Elaboración propia**



**Figura 5.13: Gráfico con línea de tendencia de disminución de la resistencia**  
**Fuente: Elaboración propia**

Al analizar los resultados se puede notar una tendencia clara, la cual es, que a medida que se sustituye árido grueso por cápsulas de parafina, la resistencia baja progresivamente, si esta sustitución de árido grueso por cápsulas de parafina se hace de forma gradual, la resistencia también disminuye de forma gradual, se puede decir que la disminución de resistencia a compresión tiene una relación directa en función de la cantidad de árido grueso que se sustituye por cápsulas de parafina.

A continuación, en la tabla 5.12 se presentan los resultados individuales de cada una de las probetas ensayadas a compresión, con la nomenclatura de cada una de estas y las resistencias a compresión en kgf/cm<sup>2</sup> obtenidas por cada una, se presenta también la desviación estándar de cada uno de los grupos.

**Tabla 5.12: Resumen de resistencias y desviación estándar de los grupos**

	Tipo de hormigón	Resistencia en kgf/cm <sup>2</sup>	Promedio	Desviación estándar
Patrón	HP-300C (pb1)	286,95	286,89	2,674
	HP-300C (pb2)	284,19		
	HP-300C (pb3)	289,53		
6% capsulas	HP-300C-6 (pb1)	238,25	241,28	2,951
	HP-300C-6 (pb2)	241,46		
	HP-300C-6 (pb3)	244,14		

9% capsulas	HP-300C-9 (pb1)	222,00	219,84	2,825
	HP-300C-9 (pb2)	216,64		
	HP-300C-9 (pb3)	220,87		
12% capsulas	HP-300C-12 (pb1)	197,31	196,47	2,531
	HP-300C-12 (pb2)	193,63		
	HP-300C-12 (pb3)	198,47		

Fuente: Elaboración propia

### 5.6.2. Densidades de los hormigones a los 28 días

La tabla 5.13 muestra los pesos y las densidades promedio de los distintos hormigones.

Tabla 5.13: densidades promedio de los hormigones

Volumen m3	PESOS probeta de 15x15x15			Promedio	Densidad	%
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3			
0,003375						
PATRON	7935,3	7811,7	7948,5	7898,5	2340,3	100%
6%	7696,1	7703,4	7722,1	7707,2	2283,6	98%
9%	7673,6	7641,4	7669,5	7661,5	2270,1	97%
12%	7539,1	7527,5	7544,7	7537,1	2233,2	95%

Fuente: Elaboración propia

Analizando los resultados se puede decir que la disminución de densidades, tomando como referencia el hormigón patrón, es ínfima, disminuyendo en solo un 5% la densidad en el caso del hormigón con mayor cantidad de cápsulas de parafina en reemplazo del árido grueso. Por lo que este hormigón con reemplazos de hasta 12% de árido grueso por cápsulas de parafina, en ningún caso puede ser considerado como un hormigón liviano.

### 5.7. Observaciones luego de los ensayos

En la figura 5.14 se puede observar la rotura de algunas de las cápsulas superficiales en los paneles, esto debido a lo rígido y frágil del encapsulamiento, el cual no permitió de buena forma la expansión que se genera en la parafina al momento de cambiar de fase de sólido a líquido. El panel de hormigón muestra manchas que indica que cápsulas superficiales se rompieron dejando escapar la parafina líquida, para futuras investigaciones, se debe cambiar el tipo de encapsulamiento por uno de mayor flexibilidad, que permita la expansión del material de forma adecuada.



**Figura 5.14: Panel con manchas debido a la rotura de cápsulas**  
**Fuente: Elaboración propia**

*Capítulo VI*  
*Conclusiones y propuesta de futuras*  
*investigaciones*

## 6. Conclusiones y propuesta de futuras investigaciones

### 6.1. Conclusiones

Se logran establecer las siguientes conclusiones a partir de los resultados obtenidos en la presente investigación.

1.- Se establece como respuesta al objetivo principal que el uso de parafina sólida encapsulada cumple con el propósito para el cual se estaba usando, en este caso, mejorar la capacidad de aislación térmica, así como también la inercia térmica que posee el hormigón.

2.- El diseño y posterior fabricación de las cápsulas de parafina resultó ser trabajoso, consumiendo la mayor parte del tiempo de esta investigación, por lo que, se debe mejorar el procedimiento.

3.- El encapsulamiento no cumplió de la mejor forma su labor de contener la parafina una vez esta cambia de estado sólido a líquido, debido a la rigidez del encapsulamiento que no permitió la expansión que se produce en la parafina al cambiar de fase.

4.- En cuanto a la influencia sobre la aislación térmica del hormigón con las distintas dosis de reemplazo de cápsulas de parafina, el resultado fue satisfactorio y el esperado, aumentando la aislación térmica del panel de hormigón a medida que el porcentaje de cápsulas de parafina era mayor, siendo el porcentaje de reemplazo del 12% el que mejores resultados otorgo en cuanto a aislación térmica.

5.- Al ser la parafina sólida un material menos denso, de comportamiento plástico, con resistencia a compresión insignificante en relación a un árido convencional, era de esperar una disminución en la resistencia final del hormigón con este tipo de agregados, por lo que la pérdida de resistencia de los hormigones era esperada, cabe destacar, que esta pérdida de resistencia se hace de manera lineal a medida que aumentan los porcentajes de reemplazo, ocurriendo que para la configuración utilizada el factor de correlación entre los hormigones sin cápsulas de parafina y los hormigones con distintos porcentajes de reemplazo se acercó a 1, siendo específicamente 0,999, lo que indica una relación directa entre el porcentaje de reemplazo de cápsulas de parafina y la pérdida de resistencia, siendo, el hormigón con 12% de reemplazo de árido grueso por cápsulas de parafina el que menor resistencia a compresión alcanzó, logrando una resistencia a la compresión final de solo el 68% de la resistencia lograda con el hormigón patrón. En vista que este hormigón con esta cantidad de reemplazo (12%), logró una disminución en la temperatura máxima de 4,5 °C en relación al hormigón patrón, perdiendo una resistencia a compresión cercana al 32%, se vuelve un material interesante para el uso en viviendas de 1 piso, debido a que para dosis de cemento de 300 kg/m<sup>3</sup> se alcanzan resistencias a compresión cercanas a los 200 kgf/cm<sup>2</sup>, resistencias aceptables para el uso en este tipo de edificaciones, mejorando así el confort térmico de la vivienda.

6.- En relación a la densidad, se aprecia que a medida que aumenta el porcentaje de cápsulas de parafina que reemplazan áridos gruesos, el hormigón se vuelve más liviano, disminuyendo su densidad para el caso de 12% de reemplazo de solo el 5% en relación al hormigón patrón, por lo que este hormigón no puede ser considerado un hormigón liviano.

Considerando los resultados obtenidos y obviando el tipo de encapsulamiento, en definitiva, se puede concluir que el material propuesto cumple a cabalidad con los resultados esperados, por lo que, este material puede ser utilizado como aislante térmico en viviendas.

## **6.2. Propuestas para futuras investigaciones**

De acuerdo a las conclusiones expuestas y a los resultados obtenidos, se considera útil proponer las diferentes futuras investigaciones:

- Investigar un nuevo tipo de encapsulamiento, considerando la expansión de la parafina al cambiar de fase. Este nuevo encapsulamiento debe proveer cierta elasticidad y dejar espacio para que, durante el cambio de fase, la parafina pueda expandirse de manera satisfactoria.
- Sería interesante conocer qué es lo que ocurre con las otras propiedades mecánicas del hormigón con cápsulas de parafina, como son la resistencia a la tracción indirecta, flexo tracción y resistencia al impacto de estos hormigones.
- Investigar qué efectos tiene sobre el comportamiento acústico del hormigón, el agregar cápsulas de parafina a este.
- Investigar la forma de industrializar de manera eficiente y económica la forma de fabricar las cápsulas de parafina.
- Investigar hormigones con cápsulas de parafina de tamaño menor, de modo de sustituir dichas cápsulas por arena en vez de gravilla, determinando si ocurren mejoras en cuanto a la aislación térmica y la resistencia a compresión.

## BIBLIOGRAFIA

- Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar energy*, 30(4), 313-332.
- Cabeza, L. F., Castellon, C., Nogues, M., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, 39(2), 113-119.
- Cabeza, L. F., Medrano Martorell, M., Castellón, C., Castell, A., Solé, C., Roca Enrich, J., & Nogués Aymamí, M. (2007). Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes. *Contributions to Science, 2007, vol. 3, núm. 4, p. 501–510.*
- Castell, A., Martorell, I., Medrano, M., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2010). Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*, 42(4), 534-540.
- Egaña, Juan. (2014). Metodo para dosificar hormigones.
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy conversion and management*, 45(9), 1597-1615.
- Félix, M., & Aguiar, J. (2009). *Study of a cement mortar with incorporation of PCM microcapsules*. Paper presented at the 6th Asian Symposium on Polymers in Concrete.
- Gomá, F. (1979). El cemento portland y otros aglomerantes. Reverte.
- Hunger, M., Entrop, A., Mandilaras, I., Brouwers, H., & Founti, M. (2009). The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 731-743.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. Pearson Educación.
- Izurieta Carvajal, O., Cuellar Lozano, P. A., & Cedeño Cuellar, J. E. (2009). Fisuras por retracción en el hormigón (Bachelor's thesis).
- Kosmatka Steven, H., Kerkhoff, B., Panarese William, C., & Tenesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Skokie, Illinois, EE. UU: Portland Cement Association.
- Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J.-J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 379-391.
- Meshgin, P., & Xi, Y. (2012). Effect of Phase-Change Materials on Properties of Concrete. *ACI Materials Journal*, 109(1).
- NCh 163. Of 2013. Aridos para morteros y hormigones - Requisitos generales

- NCh 165. Of 1977. Aridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría
- NCh 851. Of 1983. Aislación térmica - Determinación de coeficientes de transmisión térmica por el método de la cámara térmica
- NCh 1019. Of 1974. Construcción - Hormigón - Determinación de la docilidad - Método de asentamiento del cono de Abrams
- NCh 1037. Of 1977. Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas
- NCh 1116. Of 2008. Aridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente
- NCh 1117. Of 2010. Aridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas
- NCh 1498. Of 1982. Hormigón - Agua de amasado - Requisitos
- Neila, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*.
- Neville, A. (1995). Tecnología del Concreto (4° Edición). *Pitman Publishing. Londres, Inglaterra*.
- Oliver, A., Neila, F., & García-Santos, A. (2012). PCM choosing and classification according to their characteristics for their application for thermal energy storage systems. *Materiales de Construcción*, 62(305), 131-140.
- Oliver Ramírez, A. (2009). *Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios*. Arquitectura,
- Sá, A. V., Azenha, M., de Sousa, H., & Samagaio, A. (2012). Thermal enhancement of plastering mortars with phase change materials: experimental and numerical approach. *Energy and Buildings*, 49, 16-27.
- Tyagi, V. V., & Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings: a state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1146-1166.
- Videla, C. (2010). Curso de tecnología del hormigón. *Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile*.
- Wang, X., Zhang, Y., Xiao, W., Zeng, R., Zhang, Q., & Di, H. (2009). Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope. *Chinese science bulletin*, 54(6), 920-928.
- Zabaleta, H. (1992). Compendio de Tecnología del Hormigón (2° Edición). *Instituto del cemento y del hormigón de Chile. Santiago, Chile*.
- Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., & Di, H. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and environment*, 42(6), 2197-2209.



## ANEXOS

Granulometría de la gravilla.

MUESTRA 1							
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	%	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIA L	ACUMULADO	QUE PASA	BANDA GRANULOMETRIC A	
2"	50	0	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2	37,5	0	0,00	0,00	100,00	100	100
1	25	0	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4	19	92	1,15	1,15	98,85	90	100
3/8	9,5	4502	56,46	57,61	42,39	20	55
4	4,75	2868	35,97	93,58	6,42	0	10
BAJO 4		512	6,42	100,00	0,00	0	5
MASA REAL (gr)		7974					
MASA INICIAL (gr)		8018					
ERROR		0,55%					

MUESTRA 2							
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	%	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIA L	ACUMULADO	QUE PASA	BANDA GRANULOMETRIC A	
2"	50	0	0,00	0,00	100,00	100	100
1,5	37,5	0	0,00	0,00	100,00	100	100
1	25	0	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4	19	112	1,41	1,41	98,59	90	100
3/8	9,5	4366	55,00	56,41	43,59	20	55
4	4,75	2944	37,09	93,50	6,50	0	10
BAJO 4		516	6,50	100,00	0,00	0	5
MASA REAL		7938					
MASA INICIAL		8010					
ERROR		0,90%					

MUESTRA 3							
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	%	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	BANDA GRANULOMETRICA	
2"	50	0	0,00	0,00	100,00	100	100
1,5	37,5	0	0,00	0,00	100,00	100	100
1	25	0	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4	19	118	1,47	1,47	98,53	90	100
3/8	9,5	4672	58,24	59,71	40,29	20	55
4	4,75	2868	35,75	95,46	4,54	0	10
BAJO 4		364	4,54	100,00	0,00	0	5
MASA REAL		8022					
MASA INICIAL		8032					
ERROR		0,12%					

## Granulometría arena

MUESTRA 1							
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	%	%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	QUE PASA CORREGIDO	BANDA GRANULOMETRICA NCH163OF2013
3/8	9,5	0,0	0	0	100		100 100
4	4,75	97,2	19	19	81	100	95 100
8	2,36	89,0	18	37	63	78	80 100
16	1,18	50,3	10	47	53	65	50 85
30	0,6	32,8	7	54	46	57	25 60
50	0,3	71,8	14	68	32	39	5 30
100	0,15	137,1	27	96	4	5	0 10
BAJO 100		20,4	4	100	0		
MASA REAL		498,6					
MASA INICIAL		500,2					
ERROR		0,32%					

MUESTRA 2								
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	%	%	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	QUE PASA CORREGIDO	BANDA GRANULOMETRICA NCH163OF2013	
3/8	9,5	0,0	0	0	100		100	100
4	4,75	68,7	14	14	86	100	95	100
8	2,36	82,6	17	30	70	81	80	100
16	1,18	49,8	10	40	60	69	50	85
30	0,6	37,5	8	48	52	60	25	60
50	0,3	70,9	14	62	38	44	5	30
100	0,15	156,8	31	94	6	7	0	10
BAJO 100		31,7	6	100	0			
MASA REAL		498,0						
MASA INICIAL		500,0						
ERROR		0,40%						

MUESTRA 3								
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%	%	%	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA	QUE PASA CORREGIDO	BANDA GRANULOMETRICA NCH163OF2013	
3/8	9,5	0,0	0	0	100		100	100
4	4,75	90,8	18	18	82	100	95	100
8	2,36	93,6	19	37	63	77	80	100
16	1,18	51,7	10	47	53	64	50	85
30	0,6	33,5	7	54	46	56	25	60
50	0,3	59,5	12	66	34	42	5	30
100	0,15	139,3	28	94	6	7	0	10
BAJO 100		30,0	6	100	0			
MASA REAL		498,4						
MASA INICIAL		500,0						
ERROR		0,32%						

## Características de la arena y gravilla

ARENA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
MATRAZ CON AGUA (gr) - Ma	685,7	685,3	685,5
MATRAZ CON MUESTRA (gr) - Mm	742,9	742,5	742,7
Msss (gr)	92,5	92,5	92,5
Ms (gr)	91,2	91,1	91,15
$\rho$ NETA (Kg/m <sup>3</sup> )	2682	2687	2685
$\rho$ REAL SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	2584	2581	2582
$\rho$ REAL SSS (Kg/m <sup>3</sup> )	2620	2620	2620
% ABSORCIÓN	1,4	1,5	1,5
GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
MASA SUMERGIDA (gr) - A	1090,4	1128,7	1110
MASA Mss (gr) - B	1749,7	1797,9	1774
Ms (gr) - C	1727,2	1765,3	1746
$\rho$ NETA (Kg/m <sup>3</sup> )	2712	2773	2743
$\rho$ REAL SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	2620	2638	2629
$\rho$ REAL SSS (Kg/m <sup>3</sup> )	2654	2687	2670
% ABSORCIÓN	1,3	1,8	1,6

ARENA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO	P. TACHO (gr)	V. TACHO (cm <sup>3</sup> )
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	3094	3100	3097	1315	1040
D. AP SUELTA (gr/cm <sup>3</sup> )	1,711	1,716	1,713		
D. AP SUELTA (Kg/m <sup>3</sup> )	1711	1716	1713		

ARENA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO	P. TACHO (gr)	V. TACHO (cm <sup>3</sup> )
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	3222	3220	3221	1315	1040
D. AP COMPACTADA (gr/cm <sup>3</sup> )	1,834	1,832	1,833		
D. AP COMPACTADA (Kg/m <sup>3</sup> )	1834	1832	1833		

GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO	P. TACHO (gr)	V. TACHO (cm3)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	11813,9	11723,9	11768,9	3688	5173
D. AP. SUELTA (gr/cm3)	1,571	1,553	1,562		
D. AP SUELTA (Kg/m3)	1571	1553	1562		

GRAVILLA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO	P. TACHO (gr)	V. TACHO (cm3)
PESO MUESTRA + TACHO (gr)	12483,3	12398,9	12441,1	3688	5173
D. AP COMPACTADA (gr/cm3)	1,700	1,684	1,692		
D. AP COMPACTADA (Kg/m3)	1700	1684	1692		

Dosificación de hormigones.

Dosificación para 300 kg de cemento					
	Kg/m3	para cono	para panel	para cubo	
cemento	300	7070	7560	1012,5	gramos
agua	160	3770	4032	540	gramos
arena	921	21708	23214	3109	gramos
gravilla	1039	24479	26178	3506	gramos
6% parafina	19,6		494,1	66,2	gramos
9% parafina	29,4		741,2	99,3	gramos
12% parafina	39,2		988,3	132,4	gramos

Dosificación hormigón patrón				
Tipo de Probeta	N° probeta	material	cantidad	
<b>panel</b>	3	cemento	22,7	kg
		agua	12,1	kg
		arena	69,6	kg
		gravilla	78,5	kg
<b>cubo</b>	3	cemento	3,0	kg
		agua	1,6	kg
		arena	9,3	kg
		gravilla	10,5	kg

Dosificación hormigón con 6% parafina				cantidad total X 3 (kg)
tipo de probeta	N° probeta	material	cantidad UN	
<b>panel</b>	3	cemento	7560	22,7
		agua	4032	12,1
		arena	23214	69,6
		gravilla	25684	77,1
		parafina	494,1	1,482
<b>cubo</b>	3	cemento	1012,5	3,0
		agua	540	1,6
		arena	3109	9,3
		gravilla	3440	10,3
		parafina	66,2	0,199

Dosificación hormigón con 9% parafina				cantidad total X 3 (kg)
tipo de probeta	N° probeta	material	cantidad UN	
<b>panel</b>	3	cemento	7560	22,7
		agua	4032	12,1
		arena	23214	69,6
		gravilla	25437	76,3
		parafina	741,2	2,224
<b>cubo</b>	3	cemento	1012,5	3,0
		agua	540	1,6
		arena	3109	9,3
		gravilla	3407	10,2
		parafina	99,3	0,298

Dosificación hormigón con 12% parafina				cantidad total X 3 (kg)
tipo de probeta	N° probeta	material	cantidad UN	
<b>panel</b>	3	cemento	7560	22,7
		agua	4032	12,1
		arena	23214	69,6
		gravilla	25189	75,6
		parafina	988,3	2,965
<b>cubo</b>	3	cemento	1012,5	3,0
		agua	540	1,6
		arena	3109	9,3
		gravilla	3374	10,1
		parafina	132,4	0,397

Datos obtenidos de los ensayos térmicos

HP-300C			
Minuto	sensor 1	sensor 2	Dif. De T°
1	17,94	18,02	-0,08
2	19,05	18,02	1,04
3	20,18	18,02	2,16
4	21,15	18,04	3,11
5	22,22	18,06	4,16
6	23,55	18,09	5,46
7	24,78	18,13	6,66
8	25,83	18,18	7,66
9	26,75	18,22	8,53
10	27,54	18,26	9,29
11	28,27	18,31	9,97
12	28,94	18,36	10,59
13	29,57	18,43	11,15
14	30,17	18,49	11,69
15	30,76	18,58	12,19
16	31,32	18,64	12,69
17	31,83	18,71	13,13
18	32,31	18,78	13,54
19	32,79	18,86	13,94
20	33,28	18,93	14,36
21	33,75	19,00	14,76
22	34,20	19,07	15,14
23	34,62	19,15	15,48
24	35,04	19,22	15,83
25	35,47	19,29	16,19
26	35,85	19,37	16,49
27	36,22	19,51	16,72
28	36,59	19,71	16,89
29	36,94	19,87	17,08
30	37,32	20,04	17,29
31	37,70	20,21	17,50
32	38,10	20,38	17,73
33	38,51	20,55	17,97
34	38,90	20,72	18,19
35	39,27	20,89	18,39
36	39,65	21,06	18,60
37	40,03	21,23	18,81

38	40,39	21,40	19,00
39	40,76	21,57	19,20
40	41,14	21,76	19,39
41	41,51	21,96	19,56
42	41,83	22,12	19,72
43	42,14	22,35	19,80
44	42,48	22,46	20,03
45	42,84	22,68	20,17
46	43,15	22,90	20,26
47	43,44	23,05	20,40
48	43,75	23,19	20,57
49	44,05	23,34	20,72
50	44,37	23,50	20,88
51	44,67	23,65	21,03
52	44,98	23,82	21,17
53	45,26	23,98	21,29
54	45,54	24,14	21,41
55	45,82	24,32	21,51
56	46,07	24,49	21,59
57	46,37	24,66	21,72
58	46,67	24,83	21,85
59	46,98	25,01	21,98
60	47,21	25,19	22,03
61	47,42	25,38	22,05
62	47,70	25,56	22,15
63	47,93	25,75	22,19
64	48,18	25,93	22,26
65	48,43	26,12	22,32
66	48,67	26,30	22,38
67	48,88	26,49	22,40
68	49,28	26,69	22,60
69	49,72	26,88	22,85
70	49,74	27,08	22,67
71	49,83	27,27	22,57
72	49,95	27,47	22,49
73	50,25	27,67	22,59
74	50,62	27,87	22,76
75	51,06	28,07	23,00
76	51,54	28,27	23,28
77	51,92	28,47	23,46
78	52,14	28,67	23,48

79	52,56	28,88	23,69
80	52,78	29,08	23,71
81	53,01	29,29	23,73
82	53,26	29,49	23,78
83	53,51	29,69	23,83
84	53,76	29,90	23,87
85	53,99	30,10	23,90
86	54,23	30,31	23,93
87	54,47	30,51	23,97
88	54,71	30,72	24,00
89	54,95	30,92	24,04
90	55,21	31,12	24,10
91	55,45	31,33	24,13
92	55,68	31,54	24,15
93	55,92	31,75	24,18
94	56,18	31,95	24,24
95	56,46	32,16	24,31
96	56,74	32,36	24,39
97	57,04	32,56	24,49
98	57,35	32,76	24,60
99	57,65	32,97	24,69
100	57,95	33,18	24,78
101	58,26	33,38	24,89
102	58,56	33,59	24,98
103	58,87	33,79	25,09
104	59,17	33,99	25,19
105	59,48	34,19	25,30
106	59,78	34,39	25,40
107	60,09	34,59	25,51
108	60,39	34,79	25,61
109	60,70	34,99	25,72
110	61,00	35,20	25,81
111	61,24	35,39	25,86
112	61,41	35,59	25,83
113	61,52	35,80	25,73
114	61,63	36,00	25,64
115	61,74	36,20	25,55
116	61,85	36,40	25,46
117	61,96	36,60	25,37
118	62,12	36,79	25,34
119	62,35	36,99	25,37

120	62,48	37,18	25,31
121	62,62	37,38	25,25
122	62,74	37,58	25,17
123	62,94	37,77	25,18
124	63,14	37,97	25,18
125	63,34	38,16	25,19
126	63,53	38,35	25,19
127	63,73	38,55	25,19
128	63,92	38,74	25,19
129	64,10	38,93	25,18
130	64,30	39,12	25,19
131	64,51	39,31	25,21
132	64,69	39,50	25,20
133	64,87	39,68	25,20
134	65,05	39,85	25,21
135	65,24	40,02	25,23
136	65,42	40,19	25,24
137	65,61	40,36	25,26
138	65,79	40,53	25,27
139	65,97	40,70	25,28
140	66,14	40,86	25,29
141	66,33	41,03	25,31
142	66,50	41,19	25,32
143	66,52	41,35	25,18
144	66,54	41,51	25,04
145	66,55	41,66	24,90
146	66,50	41,81	24,70
147	66,49	41,97	24,52
148	65,67	42,13	23,55
149	64,73	42,28	22,46
150	63,26	42,43	20,84
151	60,02	42,59	17,44
152	57,21	42,73	14,49
153	55,28	42,88	12,41
154	53,97	43,03	10,95
155	52,92	43,16	9,77
156	52,06	43,30	8,77
157	51,37	43,44	7,94
158	50,53	43,57	6,97
159	49,74	43,70	6,05
160	48,06	43,83	4,24

161	47,46	43,94	3,53
162	45,96	44,05	1,92
163	45,54	44,15	1,40
164	45,18	44,23	0,96
165	44,85	44,31	0,55
166	44,58	44,38	0,21
167	44,40	44,43	-0,02
168	44,19	44,48	-0,28
169	43,95	44,52	-0,56
170	43,69	44,55	-0,85
171	43,42	44,57	-1,14
172	43,16	44,58	-1,41
173	42,91	44,59	-1,67
174	42,70	44,58	-1,87
175	42,50	44,57	-2,06
176	42,21	44,55	-2,33
177	41,77	44,53	-2,75
178	41,63	44,50	-2,86
179	41,48	44,46	-2,97
180	41,31	44,41	-3,09
181	41,15	44,36	-3,20
182	40,99	44,31	-3,31
183	40,83	44,26	-3,42
184	40,69	44,19	-3,49
185	40,58	44,13	-3,54
186	40,45	44,06	-3,60
187	40,31	43,99	-3,67
188	40,16	43,92	-3,75
189	39,99	43,84	-3,84
190	39,70	43,73	-4,02
191	39,53	43,61	-4,07
192	39,38	43,46	-4,07
193	39,23	43,30	-4,06
194	39,10	43,15	-4,04
195	38,96	42,99	-4,02
196	38,82	42,84	-4,01
197	38,69	42,69	-3,99
198	38,57	42,53	-3,95
199	38,45	42,38	-3,92
200	38,33	42,23	-3,89
201	38,21	42,08	-3,86

202	38,08	41,93	-3,84
203	37,93	41,78	-3,84
204	37,78	41,62	-3,83
205	37,65	41,47	-3,81
206	37,53	41,32	-3,78
207	37,41	41,17	-3,75
208	37,30	41,02	-3,71
209	37,18	40,88	-3,69
210	37,06	40,73	-3,66
211	36,95	40,58	-3,62
212	36,83	40,43	-3,59
213	36,72	40,28	-3,55
214	36,60	40,14	-3,53
215	36,48	39,99	-3,50
216	36,37	39,84	-3,46
217	36,27	39,70	-3,42
218	36,18	39,56	-3,37
219	36,08	39,41	-3,32
220	35,99	39,27	-3,27
221	35,89	39,13	-3,23
222	35,79	38,98	-3,18
223	35,69	38,84	-3,14
224	35,59	38,70	-3,10
225	35,50	38,56	-3,05
226	35,41	38,42	-3,00
227	35,31	38,28	-2,96
228	35,21	38,14	-2,92
229	35,12	38,00	-2,87
230	35,04	37,87	-2,82
231	34,95	37,73	-2,77
232	34,86	37,59	-2,72
233	34,77	37,46	-2,68
234	34,69	37,32	-2,62
235	34,60	37,19	-2,58
236	34,51	37,05	-2,53
237	34,43	36,92	-2,48
238	34,34	36,79	-2,44
239	34,25	36,65	-2,39
240	34,18	36,52	-2,33
241	34,10	36,39	-2,28
242	34,02	36,26	-2,23

243	33,94	36,13	-2,18
244	33,86	36,00	-2,13
245	33,78	35,87	-2,08
246	33,70	35,74	-2,03
247	33,62	35,61	-1,98
248	33,54	35,48	-1,93
249	33,47	35,35	-1,87
250	33,39	35,23	-1,83
251	33,30	35,10	-1,79
252	33,21	34,98	-1,76
253	33,12	34,85	-1,72
254	33,05	34,73	-1,67
255	32,97	34,60	-1,62
256	32,88	34,48	-1,59
257	32,80	34,35	-1,54
258	32,71	34,23	-1,51
259	32,63	34,11	-1,47
260	32,55	33,99	-1,43
261	32,48	33,87	-1,38
262	32,42	33,75	-1,32
263	32,35	33,62	-1,26
264	32,27	33,51	-1,23
265	32,20	33,39	-1,18
266	32,13	33,27	-1,13
267	32,06	33,15	-1,08
268	31,99	33,03	-1,03
269	31,92	32,91	-0,98
270	31,85	32,80	-0,94
271	31,78	32,68	-0,89

HC-300C-6%			
Minuto	sensor 1	sensor 2	Dif. De T°
1	17,90	17,72	0,18
2	18,98	17,70	1,28
3	20,39	17,69	2,70
4	21,64	17,69	3,95
5	22,88	17,68	5,20
6	23,79	17,68	6,11
7	24,95	17,68	7,27
8	25,95	17,68	8,27

9	26,85	17,68	9,17
10	27,65	17,69	9,96
11	28,45	17,71	10,74
12	29,22	17,73	11,49
13	29,96	17,75	12,21
14	30,66	17,78	12,88
15	31,23	17,82	13,41
16	31,72	17,87	13,85
17	32,26	17,92	14,34
18	32,35	17,98	14,37
19	32,99	18,05	14,94
20	33,45	18,12	15,33
21	34,01	18,20	15,81
22	34,34	18,28	16,06
23	34,87	18,38	16,49
24	35,22	18,48	16,74
25	35,59	18,58	17,01
26	36,09	18,69	17,40
27	36,47	18,80	17,67
28	36,98	18,93	18,05
29	37,17	19,05	18,12
30	37,91	19,18	18,73
31	38,45	19,32	19,13
32	39,06	19,45	19,61
33	39,73	19,60	20,13
34	40,12	19,75	20,37
35	40,36	19,89	20,47
36	40,68	20,05	20,63
37	41,28	20,20	21,08
38	41,57	20,35	21,22
39	41,88	20,51	21,37
40	42,18	20,67	21,51
41	42,49	20,84	21,65
42	42,81	21,00	21,81
43	43,12	21,17	21,95
44	43,43	21,34	22,09
45	43,74	21,51	22,23
46	44,05	21,68	22,37
47	44,34	21,85	22,49
48	44,59	22,02	22,57
49	44,81	22,20	22,61

50	45,11	22,38	22,73
51	45,41	22,56	22,85
52	45,70	22,74	22,96
53	45,98	22,92	23,06
54	46,27	23,11	23,16
55	46,54	23,29	23,25
56	46,79	23,47	23,32
57	47,06	23,65	23,41
58	47,30	23,84	23,46
59	47,53	24,03	23,50
60	47,75	24,21	23,54
61	47,97	24,40	23,57
62	48,24	24,59	23,65
63	48,48	24,78	23,70
64	48,72	24,97	23,75
65	48,96	25,16	23,80
66	49,22	25,35	23,87
67	49,49	25,54	23,95
68	49,75	25,74	24,01
69	50,00	25,93	24,07
70	50,25	26,12	24,13
71	50,52	26,32	24,20
72	50,76	26,50	24,26
73	50,97	26,69	24,28
74	51,21	26,89	24,32
75	51,48	27,08	24,40
76	51,72	27,27	24,45
77	51,97	27,46	24,51
78	52,23	27,65	24,58
79	52,49	27,84	24,65
80	52,76	28,03	24,73
81	53,03	28,22	24,81
82	53,26	28,41	24,85
83	53,48	28,61	24,87
84	53,66	28,80	24,86
85	53,90	28,98	24,92
86	54,13	29,18	24,95
87	54,37	29,37	25,00
88	54,56	29,55	25,01
89	54,74	29,74	25,00
90	54,92	29,94	24,98

91	55,16	30,13	25,03
92	55,40	30,31	25,09
93	55,62	30,50	25,12
94	55,85	30,70	25,15
95	56,06	30,89	25,17
96	56,22	31,07	25,15
97	56,42	31,26	25,16
98	56,70	31,45	25,25
99	57,01	31,64	25,37
100	57,32	31,83	25,49
101	57,60	32,02	25,58
102	57,85	32,21	25,64
103	58,07	32,40	25,67
104	58,33	32,58	25,75
105	58,57	32,76	25,81
106	58,81	32,95	25,86
107	59,03	33,14	25,89
108	59,20	33,32	25,88
109	59,36	33,50	25,86
110	59,59	33,68	25,91
111	59,83	33,87	25,96
112	60,14	34,05	26,09
113	60,47	34,23	26,24
114	60,75	34,41	26,34
115	61,02	34,59	26,43
116	61,23	34,77	26,46
117	61,43	34,95	26,48
118	61,62	35,13	26,49
119	61,80	35,31	26,49
120	61,95	35,49	26,46
121	62,09	35,66	26,43
122	62,28	35,84	26,44
123	62,44	36,02	26,42
124	62,62	36,20	26,42
125	62,81	36,39	26,42
126	63,01	36,57	26,44
127	63,20	36,75	26,45
128	63,41	36,93	26,48
129	63,59	37,11	26,48
130	63,78	37,28	26,50
131	63,95	37,45	26,50

132	64,05	37,63	26,42
133	64,13	37,81	26,32
134	64,30	37,99	26,31
135	64,50	38,17	26,33
136	64,71	38,35	26,36
137	64,93	38,53	26,40
138	65,01	38,71	26,30
139	65,19	38,89	26,30
140	65,44	39,06	26,38
141	65,69	39,24	26,45
142	65,92	39,41	26,51
143	66,01	39,59	26,42
144	66,07	39,76	26,31
145	66,14	39,93	26,21
146	66,36	40,10	26,26
147	66,56	40,27	26,29
148	66,11	40,44	25,67
149	65,94	40,61	25,33
150	65,14	40,77	24,37
151	62,45	40,94	21,51
152	58,75	41,11	17,64
153	55,33	41,27	14,06
154	52,65	41,44	11,21
155	51,53	41,59	9,94
156	49,37	41,74	7,63
157	48,58	41,89	6,69
158	47,92	42,05	5,87
159	47,31	42,21	5,10
160	46,75	42,36	4,39
161	46,28	42,51	3,77
162	45,82	42,64	3,18
163	45,38	42,76	2,62
164	44,94	42,87	2,07
165	44,57	42,95	1,62
166	44,31	43,02	1,29
167	44,05	43,07	0,98
168	43,76	43,12	0,64
169	43,47	43,14	0,33
170	43,22	43,15	0,07
171	42,89	43,16	-0,27
172	42,56	43,15	-0,59

173	42,30	43,13	-0,83
174	42,14	43,10	-0,96
175	41,91	43,06	-1,15
176	41,71	43,01	-1,30
177	41,52	42,96	-1,44
178	41,42	42,90	-1,48
179	41,31	42,84	-1,53
180	41,25	42,77	-1,52
181	41,14	42,70	-1,56
182	41,05	42,62	-1,57
183	40,99	42,54	-1,55
184	40,78	42,46	-1,68
185	40,58	42,37	-1,79
186	40,42	42,28	-1,86
187	40,23	42,19	-1,96
188	40,01	42,10	-2,09
189	39,82	42,01	-2,19
190	39,70	41,92	-2,22
191	39,56	41,81	-2,25
192	39,48	41,72	-2,24
193	39,35	41,62	-2,27
194	39,17	41,52	-2,35
195	39,05	41,42	-2,37
196	38,79	41,32	-2,53
197	38,57	41,21	-2,64
198	38,41	41,11	-2,70
199	38,39	41,00	-2,61
200	38,29	40,90	-2,61
201	38,16	40,80	-2,64
202	38,09	40,69	-2,60
203	37,91	40,58	-2,67
204	37,73	40,48	-2,75
205	37,65	40,37	-2,72
206	37,58	40,27	-2,69
207	37,47	40,17	-2,70
208	37,34	40,06	-2,72
209	37,25	39,96	-2,71
210	37,14	39,85	-2,71
211	37,03	39,74	-2,71
212	36,88	39,64	-2,76
213	36,71	39,53	-2,82

214	36,62	39,42	-2,80
215	36,54	39,32	-2,78
216	36,46	39,21	-2,75
217	36,36	39,11	-2,75
218	36,28	39,01	-2,73
219	36,22	38,90	-2,68
220	36,06	38,79	-2,73
221	35,62	38,69	-3,07
222	35,27	38,59	-3,32
223	34,92	38,48	-3,56
224	34,68	38,38	-3,70
225	34,57	38,28	-3,71
226	34,36	38,17	-3,81
227	34,25	38,07	-3,82
228	34,15	37,97	-3,82
229	34,00	37,87	-3,87
230	33,90	37,77	-3,87
231	33,64	37,67	-4,03
232	33,53	37,57	-4,04
233	33,45	37,47	-4,02
234	33,36	37,37	-4,01
235	33,26	37,27	-4,01
236	33,17	37,18	-4,01
237	33,17	37,08	-3,91
238	33,04	36,98	-3,94
239	32,89	36,89	-4,00
240	32,75	36,79	-4,04
241	32,63	36,69	-4,06
242	32,57	36,59	-4,02
243	32,56	36,50	-3,94
244	32,57	36,40	-3,83
245	32,47	36,30	-3,83
246	32,32	36,21	-3,89
247	32,30	36,11	-3,81
248	32,18	36,02	-3,84
249	32,05	35,92	-3,87
250	32,04	35,83	-3,79
251	31,99	35,73	-3,74
252	31,87	35,64	-3,77
253	31,80	35,55	-3,75
254	31,76	35,46	-3,70

255	31,69	35,36	-3,67
256	31,60	35,28	-3,68
257	31,51	35,19	-3,68
258	31,40	35,10	-3,70
259	31,34	35,00	-3,66
260	31,32	34,92	-3,60
261	31,27	34,83	-3,56
262	31,18	34,74	-3,56
263	31,15	34,65	-3,50
264	31,14	34,56	-3,42
265	31,13	34,47	-3,34
266	31,14	34,39	-3,25
267	31,06	34,31	-3,25
268	30,90	34,22	-3,32
269	30,81	34,14	-3,33
270	30,75	34,06	-3,31
271	30,70	33,98	-3,28

HC-300C-9%			
Minuto	sensor 1	sensor 2	Dif. De T°
1	18,00	18,62	-0,62
2	19,25	18,62	0,63
3	20,18	18,62	1,56
4	21,57	18,62	2,95
5	22,91	18,62	4,29
6	24,10	18,62	5,48
7	25,14	18,62	6,52
8	26,07	18,63	7,44
9	26,92	18,63	8,29
10	27,72	18,64	9,08
11	28,55	18,66	9,89
12	29,36	18,67	10,69
13	30,10	18,69	11,41
14	30,78	18,71	12,07
15	31,40	18,74	12,66
16	31,96	18,77	13,19
17	32,53	18,80	13,73
18	33,00	18,84	14,16
19	33,44	18,88	14,56
20	33,86	18,94	14,92

21	34,27	18,99	15,28
22	34,65	19,06	15,59
23	35,06	19,11	15,95
24	35,45	19,18	16,27
25	35,83	19,25	16,58
26	36,21	19,32	16,89
27	36,68	19,40	17,28
28	37,18	19,49	17,69
29	37,70	19,57	18,13
30	38,21	19,65	18,56
31	38,72	19,74	18,98
32	39,26	19,83	19,43
33	39,80	19,92	19,88
34	40,31	20,02	20,29
35	40,78	20,12	20,66
36	41,24	20,23	21,01
37	41,61	20,33	21,28
38	41,93	20,44	21,49
39	42,23	20,56	21,67
40	42,53	20,67	21,86
41	42,81	20,79	22,02
42	43,13	20,92	22,21
43	43,47	21,04	22,43
44	43,81	21,17	22,64
45	44,16	21,31	22,85
46	44,52	21,44	23,08
47	44,88	21,58	23,30
48	45,27	21,72	23,55
49	45,67	21,85	23,82
50	46,08	22,00	24,08
51	46,49	22,14	24,35
52	46,86	22,29	24,57
53	47,17	22,44	24,73
54	47,45	22,59	24,86
55	47,75	22,74	25,01
56	48,06	22,90	25,16
57	48,35	23,06	25,29
58	48,64	23,22	25,42
59	48,91	23,38	25,53
60	49,22	23,53	25,69
61	49,51	23,70	25,81

62	49,80	23,86	25,94
63	50,17	24,03	26,14
64	50,55	24,20	26,35
65	50,93	24,37	26,56
66	51,31	24,54	26,77
67	51,71	24,71	27,00
68	52,03	24,88	27,15
69	52,33	25,05	27,28
70	52,62	25,24	27,38
71	52,91	25,41	27,50
72	53,19	25,59	27,60
73	53,44	25,77	27,67
74	53,68	25,96	27,72
75	53,90	26,13	27,77
76	54,16	26,32	27,84
77	54,48	26,50	27,98
78	54,79	26,68	28,11
79	55,08	26,86	28,22
80	55,34	27,05	28,29
81	55,59	27,24	28,35
82	55,83	27,42	28,41
83	56,03	27,60	28,43
84	56,25	27,79	28,46
85	56,47	27,98	28,49
86	56,69	28,16	28,53
87	56,91	28,35	28,56
88	57,14	28,54	28,60
89	57,37	28,73	28,64
90	57,57	28,91	28,66
91	57,79	29,10	28,69
92	58,02	29,29	28,73
93	58,29	29,47	28,82
94	58,57	29,65	28,92
95	58,85	29,84	29,01
96	59,12	30,03	29,09
97	59,33	30,22	29,11
98	59,48	30,40	29,08
99	59,61	30,59	29,02
100	59,78	30,78	29,00
101	59,97	30,97	29,00
102	60,14	31,15	28,99

103	60,32	31,34	28,98
104	60,49	31,52	28,97
105	60,61	31,71	28,90
106	60,70	31,89	28,81
107	60,81	32,08	28,73
108	60,92	32,26	28,66
109	61,06	32,44	28,62
110	61,20	32,62	28,58
111	61,36	32,81	28,55
112	61,55	32,99	28,56
113	61,74	33,17	28,57
114	61,91	33,35	28,56
115	62,03	33,53	28,50
116	62,14	33,71	28,43
117	62,25	33,89	28,36
118	62,34	34,07	28,27
119	62,48	34,24	28,24
120	62,63	34,42	28,21
121	62,79	34,60	28,19
122	62,91	34,77	28,14
123	63,02	34,95	28,07
124	63,14	35,12	28,02
125	63,27	35,29	27,98
126	63,42	35,47	27,95
127	63,58	35,64	27,94
128	63,75	35,81	27,94
129	63,92	35,98	27,94
130	64,10	36,15	27,95
131	64,24	36,32	27,92
132	64,35	36,49	27,86
133	64,45	36,66	27,79
134	64,56	36,82	27,74
135	64,67	36,99	27,68
136	64,78	37,16	27,62
137	64,90	37,32	27,58
138	65,03	37,49	27,54
139	65,21	37,66	27,55
140	65,37	37,82	27,55
141	65,53	37,99	27,54
142	65,73	38,15	27,58
143	65,90	38,32	27,58

144	66,05	38,49	27,56
145	66,21	38,66	27,55
146	66,39	38,82	27,57
147	66,52	38,98	27,54
148	66,16	39,15	27,01
149	65,18	39,31	25,87
150	64,26	39,47	24,79
151	60,99	39,63	21,36
152	56,98	39,79	17,19
153	53,56	39,95	13,61
154	51,88	40,10	11,78
155	50,48	40,25	10,23
156	49,29	40,39	8,90
157	48,34	40,53	7,81
158	47,52	40,67	6,85
159	46,75	40,79	5,96
160	45,93	40,91	5,02
161	45,21	41,01	4,20
162	44,64	41,11	3,53
163	44,16	41,20	2,96
164	43,75	41,27	2,48
165	43,39	41,35	2,04
166	43,06	41,41	1,65
167	42,75	41,46	1,29
168	42,44	41,50	0,94
169	42,17	41,54	0,63
170	41,90	41,56	0,34
171	41,61	41,58	0,03
172	41,35	41,59	-0,24
173	41,08	41,60	-0,52
174	40,84	41,60	-0,76
175	40,66	41,59	-0,93
176	40,64	41,58	-0,94
177	40,62	41,56	-0,94
178	40,61	41,53	-0,92
179	40,48	41,50	-1,02
180	40,43	41,47	-1,04
181	40,30	41,43	-1,13
182	40,24	41,39	-1,15
183	40,21	41,34	-1,13
184	40,15	41,29	-1,14

185	40,02	41,24	-1,22
186	39,98	41,19	-1,21
187	39,74	41,13	-1,39
188	39,36	41,08	-1,72
189	39,08	41,02	-1,94
190	38,84	40,96	-2,12
191	38,66	40,90	-2,24
192	38,46	40,84	-2,38
193	38,31	40,78	-2,47
194	38,15	40,72	-2,57
195	38,01	40,65	-2,64
196	37,90	40,59	-2,69
197	37,81	40,52	-2,71
198	37,70	40,45	-2,75
199	37,62	40,39	-2,77
200	37,52	40,31	-2,79
201	37,42	40,25	-2,83
202	37,32	40,18	-2,86
203	37,18	40,11	-2,93
204	37,06	40,03	-2,97
205	36,95	39,96	-3,01
206	36,85	39,88	-3,03
207	36,72	39,81	-3,09
208	36,59	39,73	-3,14
209	36,48	39,66	-3,18
210	36,38	39,58	-3,20
211	36,30	39,51	-3,21
212	36,24	39,43	-3,19
213	36,17	39,35	-3,18
214	36,09	39,28	-3,19
215	36,01	39,20	-3,19
216	35,94	39,12	-3,18
217	35,83	39,05	-3,22
218	35,71	38,97	-3,26
219	35,60	38,90	-3,30
220	35,49	38,82	-3,33
221	35,39	38,74	-3,35
222	35,32	38,67	-3,35
223	35,26	38,59	-3,33
224	35,20	38,51	-3,31
225	35,11	38,43	-3,32

226	35,04	38,36	-3,32
227	34,98	38,28	-3,30
228	34,93	38,21	-3,28
229	34,87	38,13	-3,26
230	34,78	38,05	-3,27
231	34,69	37,98	-3,29
232	34,60	37,90	-3,30
233	34,53	37,82	-3,29
234	34,41	37,75	-3,34
235	34,27	37,67	-3,40
236	34,13	37,60	-3,47
237	34,03	37,52	-3,49
238	33,92	37,45	-3,53
239	33,82	37,38	-3,56
240	33,73	37,30	-3,57
241	33,63	37,23	-3,60
242	33,58	37,15	-3,57
243	33,53	37,08	-3,55
244	33,50	37,01	-3,51
245	33,45	36,93	-3,48
246	33,38	36,86	-3,48
247	33,30	36,78	-3,48
248	33,25	36,71	-3,46
249	33,19	36,64	-3,45
250	33,13	36,57	-3,44
251	33,05	36,50	-3,45
252	32,95	36,43	-3,48
253	32,86	36,36	-3,50
254	32,78	36,28	-3,50
255	32,70	36,21	-3,51
256	32,65	36,14	-3,49
257	32,61	36,07	-3,46
258	32,56	36,00	-3,44
259	32,50	35,93	-3,43
260	32,43	35,86	-3,43
261	32,36	35,79	-3,43
262	32,25	35,72	-3,47
263	32,03	35,65	-3,62
264	31,82	35,59	-3,77
265	31,64	35,52	-3,88
266	31,50	35,45	-3,95

267	31,38	35,38	-4,00
268	31,25	35,31	-4,06
269	31,13	35,25	-4,12
270	30,94	35,18	-4,24
271	30,64	35,11	-4,47

HC-300C-12%			
Minuto	sensor 1	sensor 2	Dif. De T°
1	18,04	17,93	0,11
2	19,05	17,93	1,12
3	20,44	17,93	2,51
4	21,60	17,93	3,67
5	22,34	17,93	4,41
6	23,52	17,93	5,59
7	24,68	17,94	6,74
8	25,78	17,94	7,84
9	26,77	17,94	8,83
10	27,66	17,95	9,71
11	28,47	17,95	10,52
12	29,22	17,96	11,26
13	29,89	17,97	11,92
14	30,48	17,99	12,50
15	31,04	18,02	13,02
16	31,60	18,04	13,56
17	32,15	18,09	14,06
18	32,65	18,12	14,53
19	33,14	18,15	14,99
20	33,64	18,19	15,45
21	34,13	18,22	15,91
22	34,59	18,28	16,31
23	35,11	18,32	16,79
24	35,64	18,36	17,28
25	36,17	18,43	17,74
26	36,69	18,50	18,19
27	37,17	18,55	18,62
28	37,61	18,61	19,00
29	38,00	18,67	19,33
30	38,39	18,72	19,67
31	38,78	18,85	19,93
32	39,17	18,95	20,22

33	39,54	19,05	20,49
34	39,95	19,20	20,75
35	40,30	19,31	20,99
36	40,65	19,46	21,19
37	41,01	19,53	21,48
38	41,37	19,66	21,71
39	41,76	19,75	22,01
40	42,17	19,85	22,32
41	42,60	19,95	22,65
42	43,01	20,05	22,96
43	43,43	20,15	23,28
44	43,85	20,25	23,60
45	44,24	20,35	23,89
46	44,57	20,45	24,12
47	44,87	20,55	24,32
48	45,15	20,65	24,50
49	45,46	20,75	24,71
50	45,79	20,85	24,94
51	46,07	20,99	25,08
52	46,35	21,19	25,16
53	46,64	21,27	25,37
54	46,94	21,37	25,57
55	47,26	21,47	25,79
56	47,60	21,57	26,03
57	47,95	21,66	26,29
58	48,28	21,78	26,50
59	48,61	21,89	26,72
60	48,94	22,01	26,93
61	49,26	22,12	27,14
62	49,53	22,25	27,28
63	49,77	22,38	27,39
64	50,02	22,51	27,51
65	50,28	22,64	27,64
66	50,51	22,78	27,73
67	50,73	22,91	27,82
68	50,93	23,06	27,87
69	51,17	23,20	27,97
70	51,49	23,35	28,14
71	51,76	23,50	28,26
72	52,02	23,65	28,37
73	52,28	23,79	28,49

74	52,58	23,94	28,64
75	52,90	24,08	28,82
76	53,21	24,24	28,97
77	53,46	24,39	29,07
78	53,68	24,54	29,14
79	53,96	24,70	29,26
80	54,17	24,86	29,31
81	54,38	25,03	29,35
82	54,60	25,20	29,40
83	54,86	25,36	29,50
84	55,14	25,53	29,61
85	55,45	25,69	29,76
86	55,77	25,86	29,91
87	56,01	26,03	29,98
88	56,27	26,19	30,08
89	56,27	26,36	29,91
90	56,32	26,53	29,79
91	56,34	26,69	29,65
92	56,42	26,85	29,57
93	56,57	27,02	29,55
94	56,77	27,19	29,58
95	56,94	27,35	29,59
96	57,13	27,52	29,61
97	57,33	27,69	29,64
98	57,59	27,85	29,74
99	57,91	28,02	29,89
100	58,24	28,19	30,05
101	58,66	28,36	30,30
102	59,06	28,52	30,54
103	59,44	28,69	30,75
104	59,71	28,86	30,85
105	59,95	29,03	30,92
106	60,16	29,19	30,97
107	60,36	29,37	30,99
108	60,61	29,54	31,07
109	60,84	29,71	31,13
110	61,05	29,88	31,17
111	61,26	30,03	31,23
112	61,50	30,21	31,29
113	61,76	30,39	31,37
114	62,02	30,56	31,46

115	62,27	30,73	31,54
116	62,58	30,90	31,68
117	62,87	31,07	31,80
118	63,08	31,24	31,84
119	63,29	31,41	31,88
120	63,37	31,58	31,79
121	63,46	31,74	31,72
122	63,53	31,91	31,62
123	63,62	32,07	31,55
124	63,70	32,24	31,46
125	63,79	32,40	31,39
126	63,88	32,57	31,31
127	63,97	32,74	31,23
128	64,05	32,89	31,16
129	64,15	33,06	31,09
130	64,36	33,23	31,13
131	64,59	33,39	31,20
132	64,81	33,56	31,25
133	65,01	33,73	31,28
134	65,22	33,89	31,33
135	65,42	34,05	31,37
136	65,58	34,22	31,36
137	65,72	34,38	31,34
138	65,94	34,54	31,40
139	66,17	34,71	31,46
140	66,33	34,87	31,46
141	66,34	35,03	31,31
142	66,33	35,20	31,13
143	66,33	35,36	30,97
144	66,32	35,52	30,80
145	66,09	35,68	30,41
146	65,96	35,84	30,12
147	65,50	36,00	29,50
148	65,10	36,17	28,93
149	64,42	36,32	28,10
150	63,23	36,47	26,76
151	62,17	36,63	25,54
152	59,93	36,78	23,15
153	57,74	36,94	20,80
154	53,92	37,09	16,83
155	51,87	37,24	14,63

156	50,43	37,40	13,03
157	49,30	37,55	11,75
158	48,26	37,70	10,56
159	47,44	37,86	9,58
160	46,68	38,02	8,66
161	46,03	38,18	7,85
162	45,45	38,33	7,12
163	45,01	38,47	6,54
164	44,60	38,62	5,98
165	44,32	38,76	5,56
166	44,02	38,92	5,10
167	43,66	39,07	4,59
168	43,43	39,20	4,23
169	43,25	39,33	3,92
170	42,48	39,47	3,01
171	42,05	39,60	2,45
172	41,95	39,74	2,21
173	41,70	39,84	1,86
174	41,44	39,95	1,49
175	41,23	40,05	1,18
176	40,97	40,13	0,84
177	40,83	40,10	0,73
178	40,69	40,08	0,61
179	40,54	40,13	0,41
180	40,41	40,15	0,26
181	40,24	40,20	0,04
182	40,12	40,22	-0,10
183	39,93	40,24	-0,31
184	39,70	40,24	-0,54
185	39,51	40,24	-0,73
186	39,36	40,24	-0,88
187	39,17	40,22	-1,05
188	39,03	40,21	-1,18
189	38,87	40,18	-1,31
190	38,57	40,16	-1,59
191	38,33	40,13	-1,80
192	38,19	40,10	-1,91
193	38,12	40,06	-1,94
194	37,99	40,02	-2,03
195	37,83	39,98	-2,15
196	37,80	39,94	-2,14

197	37,53	39,88	-2,35
198	37,35	39,83	-2,48
199	36,97	39,78	-2,81
200	36,68	39,72	-3,04
201	36,48	39,66	-3,18
202	36,48	39,60	-3,12
203	36,35	39,54	-3,19
204	36,22	39,49	-3,27
205	36,02	39,42	-3,40
206	35,91	39,36	-3,45
207	35,90	39,29	-3,39
208	35,66	39,22	-3,56
209	35,57	39,14	-3,57
210	35,46	39,08	-3,62
211	35,46	39,01	-3,55
212	35,53	38,94	-3,41
213	35,47	38,87	-3,40
214	35,29	38,80	-3,51
215	35,31	38,73	-3,42
216	35,36	38,65	-3,29
217	35,19	38,57	-3,38
218	35,23	38,49	-3,26
219	35,21	38,42	-3,21
220	35,14	38,34	-3,20
221	35,02	38,26	-3,24
222	35,01	38,19	-3,18
223	35,03	38,10	-3,07
224	34,96	38,02	-3,06
225	34,89	37,94	-3,05
226	34,84	37,87	-3,03
227	34,76	37,79	-3,03
228	34,63	37,71	-3,08
229	34,56	37,63	-3,07
230	34,50	37,56	-3,06
231	34,35	37,46	-3,11
232	34,28	37,39	-3,11
233	34,23	37,31	-3,08
234	34,14	37,24	-3,10
235	34,12	37,16	-3,04
236	33,70	37,08	-3,38
237	33,64	37,01	-3,37

238	33,55	36,93	-3,38
239	33,46	36,85	-3,39
240	33,41	36,77	-3,36
241	33,39	36,70	-3,31
242	33,37	36,62	-3,25
243	33,36	36,54	-3,18
244	33,35	36,48	-3,13
245	33,21	36,41	-3,20
246	33,06	36,34	-3,28
247	33,04	36,25	-3,21
248	32,94	36,19	-3,25
249	32,82	36,12	-3,30
250	32,76	36,03	-3,27
251	32,68	35,97	-3,29
252	32,61	35,91	-3,30
253	32,58	35,84	-3,26
254	32,55	35,77	-3,22
255	32,18	35,69	-3,51
256	32,07	35,63	-3,56
257	32,00	35,56	-3,56
258	31,96	35,48	-3,52
259	31,92	35,41	-3,49
260	31,88	35,34	-3,46
261	31,84	35,27	-3,43
262	31,80	35,20	-3,40
263	31,76	35,13	-3,37
264	31,72	35,06	-3,34
265	31,68	34,99	-3,31
266	31,64	34,92	-3,28
267	31,60	34,85	-3,25
268	31,54	34,79	-3,25
269	31,21	34,72	-3,51
270	31,05	34,64	-3,59
271	30,92	34,58	-3,66