



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA Y DEL TIEMPO DE
FRAGUADO EN LA RESISTENCIA
ESTIMADA DEL HORMIGÓN
MEDIANTE MADUREZ**

EUGENIA MARÍA CARRILLO NEGRETE

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
CARLOS VIDELA CIFUENTES

Santiago de Chile, Diciembre, 2011

© MMXI, Eugenia María Carrillo Negrete



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA Y DEL TIEMPO DE
FRAGUADO EN LA RESISTENCIA
ESTIMADA DEL HORMIGÓN MEDIANTE
MADUREZ**

EUGENIA MARÍA CARRILLO NEGRETE

Miembros de Comisión:

CARLOS VIDELA C.

JAVIER CASTRO S.

CARLOS AGUILAR R.

JOSÉ LUIS ALMAZÁN C.

Tesis para optar al grado de :

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Diciembre, 2011

*Para Dios, mi familia, amigos y para
ti, que me apoyaron todos los días
para alcanzar este sueño.*

AGRADECIMIENTOS

Antes que todo me gustaría agradecer a mi familia: a mis padres, hermana y tía, que estuvieron apoyándome todos los días y haciéndome crecer no sólo como profesional, sino que como mejor persona también.

Muchas gracias también a mi profesor guía, don Carlos Videla, por su constante disposición, por sus consejos, apoyo y paciencia en esta importante etapa y que ayudaron a mi formación humana y académica. Agradecer también a los miembros de la comisión de tesis, Carlos Aguilar, Javier Castro y José Luis Almazán, por sus correcciones, comentarios y consejos que me ayudaron a poder terminar exitosamente esta tesis.

No puedo dejar de agradecer a Miguel Ángel González, Karina Tobar y Mauricio López por su ayuda y conocimiento, así como también a los técnicos del laboratorio docente y DICTUC: Mauricio Guerra, Patricio Pinilla, Claudio Valdés, Fabio Salinas y Rodolfo Díaz, no sólo por su ayuda en los ensayos de laboratorio, sino que por su colaboración en todos los ámbitos y que en varias ocasiones fue más allá de lo que les exigía su trabajo.

Agradecer enormemente también a mi amigo Josué Mena, por la ayuda invaluable en la realización de los ensayos de laboratorio que involucró mi investigación.

Quiero también agradecer especialmente el apoyo, el cariño y los consejos de mi novio, amigo y colega, Manuel Lobos.

Por último, me gustaría darle un especial agradecimiento a mis amigos del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción y de ingeniería: Maricarmen Guerra, Alan Sternberg, Camila Cabrera, Omar Zegarra, Daniel Moreno, Sandra Burgos, Edith Garrido, Lidia Soto, Ximena Araya, María Alejandra Oyuela, Franco Zunino, Mario Rodríguez, Valeria Ramírez y Cristina Jara.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 Antecedentes	19
1.2 Objetivos	20
1.3 Hipótesis.....	22
1.4 Estructura de Tesis	22
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 Temperatura en el Hormigón	24
2.2 Fenómenos Térmicos en el Hormigón	25
2.2.1 Calor de Hidratación.....	25
2.2.2 Factores que Afectan el Calor de Hidratación	28
2.2.3 Efecto sobre la Resistencia a Compresión	35
2.3 Estimación de Resistencia en Terreno	38
2.3.1 Método de Madurez	39
2.3.2 <i>Match Curing</i>	44
2.3.3 Otros Métodos para Estimar Resistencia en Terreno	46
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	49
3.1 Programa Experimental.....	49
3.1.1 Factorial de la Investigación.....	49
3.1.2 Métodos de Ensayo.....	51

4.	EFFECTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.....	53
4.1	Resumen.....	53
4.2	Introducción.....	55
4.3	Importancia de la Investigación.....	58
4.4	Programa de Investigación.....	59
4.4.1	Materiales Utilizados.....	59
4.4.2	Diseño de Experimentos.....	61
4.4.3	Metodología y Descripción de Ensayos.....	63
4.5	Presentación y Análisis de Resultados.....	66
4.5.1	Evolución de la Resistencia a Compresión.....	66
4.5.2	Aumento Relativo de Resistencia a Compresión del Hormigón.....	73
4.5.3	Efecto de la Temperatura Inicial y Temperatura Máxima en la Resistencia a Compresión del Hormigón.....	76
4.6	Conclusiones y Recomendaciones.....	81
5.	EFFECTO DE LAS ALTAS TEMPERATURAS DEL HORMIGÓN EN LA CALIDAD DE LA PREDICCIÓN DE RESISTENCIA MEDIANTE MADUREZ.....	84
5.1	Resumen.....	84
5.2	Introducción.....	86
5.2.1	Método de Madurez.....	88
5.2.2	Relación Resistencia-Madurez.....	89
5.3	Importancia de la Investigación.....	90
5.4	Programa de Investigación.....	91
5.4.1	Materiales Utilizados.....	92
5.4.2	Metodología y Descripción de Ensayos.....	96
5.5	Análisis de Resultados.....	100
5.5.1	Parámetros Método ASTM para Ecuaciones de Madurez.....	100
5.5.2	Evaluación del Método ASTM de Madurez.....	104
5.6	Mejoras Propuestas al Método ASTM.....	108
5.7	Conclusiones y Recomendaciones.....	114

6.	ANÁLISIS DEL EFECTO DEL TIEMPO DE FRAGUADO EN PARÁMETROS DE MADUREZ	117
6.1	Determinación de Tiempos de Fraguado en el Hormigón	117
6.2	Mezclas y Dosificación.....	119
6.3	Resultados y Análisis.....	122
6.3.1	Factores que Afectan el Tiempo de Fraguado.....	123
6.3.2	Efecto de los Tiempos de Fraguado en los Parámetros de Madurez	133
6.4	Conclusiones y Recomendaciones.....	139
7.	CONCLUSIONES GLOBALES Y RECOMENDACIONES	141
7.1	Efecto de la Temperatura en la Resistencia del Hormigón.....	142
7.2	Método de Madurez.....	143
7.3	Tiempos de Fraguado	144
7.4	Investigaciones Futuras	145
	REFERENCIAS	146
	ANEXOS	153
	ANEXO A: Caracterización de Cementos.....	154
	ANEXO B: Sistema de Ensayo Probetas Sometidas a Ciclos Térmicos	158
	ANEXO C: Ciclos Térmicos Medidos en Probetas de Hormigón.....	161
	ANEXO D: Resultados Resistencia a Compresión Probetas Cilíndricas Curadas en Régimen Térmico.....	171
	ANEXO E: Curvas de Mejor Ajuste a Relación Resistencia-Tiempo.....	188
	ANEXO F: Trabajabilidad del Hormigón a Diferentes Temperaturas	192
	ANEXO G: Análisis Ensayo Tiempo de Fraguado ASTM	194
	ANEXO H: Resistencia a Compresión Cilindros de Hormigón y Cubos de Mortero.....	195
	ANEXO I: Análisis Estadístico Resistencia a Compresión Cilindros de Hormigón y Cubos de Mortero	197
	ANEXO J: Artículo: Efecto de la Temperatura Máxima en la Resistencia a Compresión del Hormigón.....	198

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Variables independientes y dependientes de la investigación.	51
Tabla 2: Propiedades físicas y granulométricas de los áridos.	59
Tabla 3: Propiedades físicas y mecánicas de los cementos utilizados.	60
Tabla 4: Propiedades químicas de los cementos utilizados.	60
Tabla 5: Factorial del Experimento.	62
Tabla 6: Resistencias a compresión promedio medidas y desviación estándar para los diferentes hormigones y ciclos térmicos estudiados en la investigación.	68
Tabla 7: Propiedades físicas y granulométricas de los áridos.	92
Tabla 8: Propiedades físicas y mecánicas de los cementos utilizados en la investigación.	93
Tabla 9: Propiedades químicas de los cementos utilizados	94
Tabla 10: Diseño de experimentos.	96
Tabla 11: Temperaturas máximas calculadas para la simulación de ciclos térmicos en hormigón.	97
Tabla 12: Valores de k de morteros para el cálculo de T_0 y E_a	103
Tabla 13: Indicadores de error para resistencia estimada según madurez.	105
Tabla 14: Porcentaje de error en la estimación de resistencia según métodos de SN y FHP para T_0 y E_a calculados por ASM y $T_0 = -10$ °C.	107
Tabla 15: Valores de T_0 y E_a obtenidos según método propuesto.	110
Tabla 16: Indicadores de error para resistencia estimada según madurez con constantes propuestas y ecuación hiperbólica.	113
Tabla 17: Dosificación de hormigones para ensayos de tiempos de fraguado.	120
Tabla 18: Dosificación en peso de hormigones para estudiar tiempos de fraguados....	122
Tabla 19: Tiempos de fraguado y temperaturas promedio de las mezclas estudiadas.	123

Tabla 20: Volumen de árido, pasta y tiempos de fraguado medidos para diferentes hormigones.....	127
Tabla 21: Tiempos de inicio y término de fraguado medidos para hormigón patrón sin aditivo y hormigón con aditivos modificadores de fraguado.	129
Tabla 22: Temperatura Datum (T_0) y Energía de Activación (E_a) calculados según procedimientos propuestos por distintos autores.	135
Tabla 23: Porcentaje de error de estimación de tiempos de fraguado según método propuesto por Schindler y con función de Saul-Nurse.	138
Tabla 24: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del cemento Portland.....	155
Tabla 25: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia.....	156
Tabla 26: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del cemento Puzolánico Corriente.....	157
Tabla 27: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-350-10°C-S/A.....	171
Tabla 28: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-350-23°C-S/A.....	172
Tabla 29: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-350-40°C-S/A.....	173
Tabla 30: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-350-23°C-C/Re.....	174
Tabla 31: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-450-10°C-S/A.....	175
Tabla 32: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-450-23°C-S/A.....	176
Tabla 33: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-450-40°C-S/A.....	177
Tabla 34: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-350-10°C-S/A.....	178

Tabla 35: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-350-23°C-S/A.....	179
Tabla 36: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-350-40°C-S/A.....	180
Tabla 37: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-350-23°C-C/Re.....	181
Tabla 38: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-450-10°C-S/A.....	182
Tabla 39: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-450-23°C-S/A.....	183
Tabla 40: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-450-40°C-S/A.....	184
Tabla 41: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón P-350-23°C-S/A.....	185
Tabla 42: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón P-450-23°C-S/A.....	186
Tabla 43: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón P-450-40°C-S/A.....	187
Tabla 44: Relaciones resistencia-tiempo.....	188
Tabla 45: Parámetros de curvas de mejor ajuste a resistencia vs tiempo para las diferentes mezclas estudiadas bajo diferentes regímenes térmicos (Parte 1).....	190
Tabla 46: Parámetros de curvas de mejor ajuste a resistencia vs tiempo para las diferentes mezclas estudiadas bajo diferentes regímenes térmicos (Parte 2).....	191
Tabla 47: Trabajabilidad según temperatura de fabricación de la mezcla.....	192
Tabla 48: Estadísticos t para las diferentes dosificaciones estudiadas.....	197
Tabla 49: Tabla ANOVA y factorial del experimento.....	197

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Tasa de evolución de liberación de calor versus tiempo para cemento Portland	26
Figura 2: Tasa de liberación de calor versus tiempo para cemento Portland con distintos contenidos de yeso.....	28
Figura 3: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland a varias temperaturas de curado.	30
Figura 4: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland con distintos tipos de retardadores y dosis.....	31
Figura 5: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland con distintas dosis de CaCl_2	32
Figura 6: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland Tipo II con diferentes contenidos de reemplazo de escoria.	34
Figura 7: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland con diferentes dosis de escoria y a diferentes temperaturas de curado.....	34
Figura 8: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland con 40% de cenizas clase C y F. Patrón de 0%.	35
Figura 9: Efecto de la temperatura de curado en la resistencia comparada con un curado estándar.....	37
Figura 10: Resistencia a compresión en el tiempo de hormigón curado al vapor a diferentes temperaturas.	38
Figura 11: Esquema del procedimiento <i>match curing</i>	44
Figura 12: Parte del equipamiento desarrollado para realizar <i>match curing</i> en probetas de hormigón (Fuente: www.concret curing.com).	45
Figura 13: Registro de temperaturas en el centro y superficie de un elemento de hormigón masivo.....	56

Figura 14: Calor de hidratación para Cemento Portland, Portland Puzolánico Alta Resistencia y Puzolánico Corriente.....	61
Figura 15: Diagrama de ciclo térmico aplicado a hormigones.	64
Figura 16: Evolución de la temperatura medida en probetas de un mismo tipo de hormigón con diferentes temperaturas iniciales de colocación.....	65
Figura 17: Evolución de la resistencia de hormigones con cementos Portland.	69
Figura 18: Evolución de la resistencia de hormigones con cemento Alta Resistencia.....	69
Figura 19: Evolución de la resistencia de hormigones con cemento Corriente.	69
Figura 20: Evolución del cociente entre la resistencia a compresión del hormigón a una edad y su resistencia a 28 días, para hormigones con distinto ciclo térmico.	72
Figura 21: Evolución de la razón entre la resistencia a compresión del hormigón sometido a distintos ciclos térmicos y del hormigón curado a temperatura estándar (23°C) para cementos P.....	73
Figura 22: Evolución de la razón entre la resistencia a compresión del hormigón sometido a distintos ciclos térmicos y del hormigón curado a temperatura estándar (23°C) para cementos AR.....	74
Figura 23: Evolución de la razón entre la resistencia a compresión del hormigón sometido a distintos ciclos térmicos y del hormigón curado a temperatura estándar (23°C) para cementos CC.....	74
Figura 24: Efecto de la temperatura máxima del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a 28 y 60 días separados por tipo de cemento.....	77
Figura 25: Efecto de la temperatura inicial y temperatura máxima del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a diferentes edades para hormigones con cemento Portland.	77
Figura 26: Efecto de la temperatura inicial y temperatura máxima del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la	

resistencia bajo curado estándar a diferentes edades para hormigones con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia.	78
Figura 27: Efecto de la temperatura inicial y temperatura máxima del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a diferentes edades para hormigones con cemento Puzolánico Corriente.	78
Figura 28: Efecto de la temperatura máxima en el cuociente entre la resistencia medida a 28, 60 y 210 días; y la resistencia a 28 días del hormigón bajo curado estándar para cemento Portland.	80
Figura 29: Efecto de la temperatura máxima en el cuociente entre la resistencia medida a 28, 60 y 210 días; y la resistencia a 28 días del hormigón bajo curado estándar para cemento Alta Resistencia.	80
Figura 30: Efecto de la temperatura máxima en el cuociente entre la resistencia medida a 28, 60 y 210 días; y la resistencia a 28 días del hormigón bajo curado estándar para cemento Corriente.	81
Figura 31: Resultados de ensayos de compresión para cubos de mortero curados a diferentes temperaturas..	87
Figura 32: Calor de hidratación para Cemento Portland (0% PN), Cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% PN) y Cemento Puzolánico Corriente (35% PN).	95
Figura 33: Diagrama de ciclo térmico aplicado a hormigones.	98
Figura 34: Evolución de temperatura medidas en probetas de la misma mezcla, pero sometidas a diferentes ciclos térmicos.	99
Figura 35: Evolución de resistencia en el tiempo para 8 diferentes mezclas de mortero curados a distintas temperaturas.	102
Figura 36: Ejemplo de velocidad de reacción k versus temperatura de curado isotérmico para mezcla P-350-S/A.	102

Figura 37: Comparación entre resistencia a compresión medida y resistencia estimada para tiempo equivalente según Saul-Nurse con T_0 ASTM, Freiesleben Hansen con E_a ASTM y Saul-Nurse con $T_0 = -10^\circ\text{C}$	105
Figura 38: Comparación entre resistencia a compresión medida y resistencia estimada (a) según rango de aumento de temperatura y (b) tipo de cemento para tiempo equivalente según Saul-Nurse con T_0 calculado ASTM.	106
Figura 39: Ajuste de curvas resistencia versus tiempo para hormigón y mortero.	109
Figura 40: Comparación entre resistencia a compresión medida y resistencia estimada de morteros con tiempo equivalente según Saul-Nurse y T_0 modificado y Freiesleben Hansen y Pedersen con E_a modificado.	111
Figura 41: Comparación de resistencia estimada con método ASTM y ecuación hiperbólica para T_0 ASTM (a) y E_a ASTM (b).	113
Figura 42: (a) Equipamiento para medición de tiempos de fraguado.	118
Figura 43: Ejemplo de curva resistencia a la penetración versus tiempo).	119
Figura 44: Cubos de mortero de hormigón utilizados para medir el tiempo de fraguado.....	120
Figura 45: Comparación entre tiempos de fraguado de mortero obtenido por tamizado del hormigón (método ASTM) y mortero fabricado con dosificación equivalente.	121
Figura 46: Efecto de la razón W/C en resultados de ensayo de tiempo de fraguado para hormigones con igual dosis y tipo de cemento.	124
Figura 47: Tiempos de inicio y término de fraguado del hormigón con igual calidad de pasta (W/C=0,5) y diferente contenido de cemento.	125
Figura 48: Relación resistencia a la penetración vs tiempo a 23°C para morteros con diferentes dosis de cemento y W/C.	126
Figura 49: Tiempos de fraguado del hormigón fabricado con cemento AR y distintas W/C, en función del porcentaje de pasta en el hormigón.	127

Figura 50: Efecto del tipo y dosis de aditivo modificador de fraguado en la resistencia a la penetración vs tiempo para morteros de igual calidad y cantidad de pasta.....	128
Figura 51: Efecto del tipo de cemento en la relación resistencia a la penetración vs tiempo de hormigones con igual calidad y volumen de pasta de cemento.	130
Figura 52: Efecto de la temperatura del hormigón y tipo de cemento (AR y CC) en la relación resistencia a la penetración vs tiempo para hormigones con igual calidad de pasta (W/C=0,5) y volumen de pasta (68%).....	131
Figura 53: Efecto de la temperatura del hormigón y tipo de cemento (AR y CC) en la relación resistencia a la penetración vs tiempo para hormigones con igual calidad de pasta (W/C=0,5) y volumen de pasta (72%).....	132
Figura 54: Efecto de la temperatura del hormigón, tipo de cemento y aditivo retardador de fraguado en los tiempos de inicio y fin de fraguado de hormigones con igual calidad de pasta y volumen absoluto de pasta.....	133
Figura 55: Relación resistencia a la penetración vs tiempo para hormigones con 350 kg/m ³ de cemento AR según (a) distintas temperaturas del hormigón y (b) ajustados a una sola curva patrón según Schindler usando T_0 y función de Saul-Nurse.	136
Figura 56: Tiempo de inicio de fraguado.....	137
Figura 57: Tiempo de inicio de fraguado a edad equivalente (23°C).	137
Figura 58: Probetas cilíndricas antes de ser sometidas a ciclos térmicos.	158
Figura 59: Hormigón en piscinas sometidos a ciclos térmicos simulando hormigones masivos.....	159
Figura 60: Resistencia a compresión en el tiempo de hormigones sometidos a ciclos térmicos y a curado normalizado bajo diferentes condiciones de enfriamiento y desmolde.	160
Figura 61: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-10°C-S/A.....	161

Figura 62: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-10°C-S/A.....	162
Figura 63: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-23°C-S/A.....	162
Figura 64: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-40°C-S/A.....	163
Figura 65: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-23°C-C/Re.....	163
Figura 66: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-450-10°C-S/A.....	164
Figura 67: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-450-23°C-S/A.....	164
Figura 68: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-450-40°C-S/A.....	165
Figura 69: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-350-10°C-S/A.....	165
Figura 70: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-350-23°C-S/A.....	166
Figura 71: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-350-40°C-S/A.....	166
Figura 72: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-350-23°C-C/Re.....	167
Figura 73: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-450-10°C-S/A.....	167
Figura 74: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-450-23°C-S/A.....	168
Figura 75: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-450-40°C-S/A.....	168

Figura 76: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla P-350-23°C-S/A.	169
Figura 77: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla P-450-23°C-S/A.	169
Figura 78: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla P-450-40°C-S/A.	170
Figura 79: Descenso de cono vs temperatura inicial de hormigones con cemento Portland.	192
Figura 80: Descenso de cono vs temperatura inicial de hormigones con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia.	193
Figura 81: Descenso de cono vs temperatura inicial de hormigones con cemento Puzolánico Corriente.	193
Figura 82: Comparación de tiempos de fraguado entre mezcla dosificada y tamizada.	194
Figura 83: Evolución de resistencia para hormigones y morteros equivalentes.	195
Figura 84: Constantes “k” de hormigón vs mortero curados a 23 °C.	196

RESUMEN

La especificación de altas dosis de cemento en hormigones masivos estructurales genera importantes aumentos de temperatura en el hormigón, alcanzando valores superiores a lo recomendado por la literatura. En la presente investigación se estudia el deterioro de la resistencia a compresión en el hormigón debido a altas temperaturas, la estimación de resistencia mediante madurez, además de los tiempos de fraguado debido a la importancia de éstos en la planificación de obras en hormigones masivos. Para eso se analizó la resistencia a compresión y los tiempos de fraguado a distintas temperaturas, realizándose ensayos a temprana edad (1, 3 y 7 días) y largo plazo (28, 60 y 210 días) de un hormigón curado a temperaturas que simulaban un ciclo térmico real experimentado por un elemento de hormigón masivo estructural (entre 40 y 95 °C de temperatura máxima). Se comparó ésta con la resistencia a compresión del mismo hormigón curado bajo condiciones de temperatura estándar (23 °C). Se estudiaron como variables independientes el tipo de cemento (con distinto contenido de puzolana natural y finura Blaine) y dosis (350 y 450 kg/m³) y diferentes temperaturas de colocación (10, 23, 40 °C).

Se concluyó que a mayor temperatura máxima, mayor es la velocidad de ganancia de resistencia a temprana edad, pero menor la magnitud de la resistencia a mediano y largo plazo, respecto a igual hormigón en curado estándar. El comportamiento observado dependió de la dosis de puzolana y finura del cemento. Se concluyó que para hormigones con cemento con 0, 15 y 35% de puzolana es recomendable no sobrepasar los 55, 70 y 75°C, respectivamente.

Adicionalmente se estudió el método de madurez para predecir resistencia a compresión del hormigón sometido a altas temperaturas. Se analizaron limitaciones de predicción en cuanto a edad, tipo de cemento y rangos de temperaturas. Al evaluar el método ASTM C 1074-04, se obtuvieron valores entre -6,2 y 5,9 °C para T_0 y 25.000 y 47.000 J/mol para E_a . Al evaluar la exactitud de la predicción se concluye que el método tiene en promedio un 25% de error y a temperaturas muy altas (80 a 90 °C) puede sobreestimar más de un 50% la resistencia a 28 días. Se sugiere además utilizar una función de Resistencia – Tiempo Equivalente que incorpore el efecto de resistencia techo.

ABSTRACT

The specification of high cement dosages in massive structural concrete generates significant increases in concrete temperature, reaching higher values than recommended by the standards. The present study examines the possible deterioration of the concrete compressive strength due to high temperatures, the estimation of resistance through maturity and also the study of setting times due to their importance in planning massive concrete works. For this purpose the compressive strength and setting times were analyzed at different temperatures, performing early tests (1, 3 and 7 days) and long term tests (28, 60 and 210 days) in concrete cured at variable temperatures simulating thermal cycle happening in an element of structural massive concrete (ranging from 40 to 95 °C maximum temperature). This (the cycle, the temperature?) was compared against the compressive strength of the same cured concrete under conditions of standard temperature (23 °C). The type of cement (with different contents of natural pozzolan and Blaine fineness), dosages (350 and 450 kg/m³) and different temperatures curing (10, 23, 40 °C) were studied as independent variables.

The higher the maximum temperature, the greater the rate of strength gain at an early age was concluded, but to the same concrete under standard curing, the less the magnitude of resistance in the medium and long term. The observed behavior was associated to the pozzolan cement fineness. For cement concrete with dosages of 0,15 and 35% pozzolan is recommended not to exceed 60, 65 and 75 °C, respectively, to specify resistance based on the standard cure, it has been concluded.

In addition, the maturity method was studied for predicting the compressive strength of concrete exposed to high temperatures. Limitations of prediction were analyzed by age, type of cement and temperature ranges. Evaluating the accuracy of ASTM C 1074-04 method, values can be obtained between -6.2 and 5.9 °C for T_0 and 25,000 and 47,000 J/mol for E_a . By assessing the accuracy of prediction, it is concluded that the method is not entirely appropriate for this type of concrete, as it shows a 25% error on average when very high temperatures (80 to 90 °C) are reached and it might overestimate more than 50% resistance after 28 days. It is also suggested to use a feature of Resistance vs. Equivalent time that incorporates the effect of resistance roof.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El estudio del comportamiento a temprana edad es de vital importancia para los procesos constructivos en el hormigón. Tener un buen control de la compactación del hormigón, determinar el momento oportuno para realizar las juntas de construcción o los cortes en un pavimento, poder estimar la resistencia a compresión de una mezcla, entre otras propiedades, pueden determinar no sólo un buen comportamiento a temprana edad, sino también la durabilidad a futuro, optimización del tiempo, costo y calidad de la construcción de una obra de hormigón (Mehta y Monteiro, 2006). Es por esto que los diferentes métodos para poder estimar propiedades en terreno resultan de vital importancia. Métodos como madurez, ensayos de rebote, resistencia a la penetración, *pullout*, *break-off* o ultrasonido, son normalmente usados en terreno para determinar propiedades del hormigón a temprana edad sin mayor daño a la estructura (ACI 228, 2003).

Si bien en Chile se han realizado estudios sobre estimación de propiedades mediante ensayos no destructivos (Ferreira, 2004) o de comportamiento térmico y madurez a temprana edad en hormigones con cementos con puzolanas naturales (Videla y Parada, 1988; Bianchi, 1991; Videla *et al.*, 1995; Videla y Aguilar, 1998;), hasta ahora el conocimiento del hormigón ha sido estudiado hasta temperaturas cercanas a 40°C. Además, los parámetros de madurez relacionados con la sensibilidad a la temperatura (como Energía de Activación o Temperatura Datum para las funciones de madurez) podrían estudiarse con mayor profundidad.

Por otra parte, en el último tiempo las especificaciones de elementos de hormigón masivo estructural exigen altas dosis de cemento, lo que genera elevadas temperaturas en el hormigón a temprana edad (ACI 207, 2005). Dichas temperaturas pueden afectar negativamente el comportamiento en el largo plazo de los hormigones (Carino, 1991;

Brooks *et al.*, 2007; Carrasquillo, 2009). Es por esta razón que el uso de adiciones cementantes ha ido en aumento, específicamente para disminuir la cantidad de calor que se puede generar en un elemento de hormigón de grandes volúmenes.

La presente investigación tiene como objetivo estudiar y cuantificar el efecto de la temperatura del hormigón en sus propiedades a temprana edad, como resistencia a compresión y tiempos de fraguado. También se busca estimar dichas propiedades mediante el método de madurez, conociendo sus limitaciones tanto a temprana edad como a largo plazo.

Para este estudio se evaluaron 3 tipos de cementos comúnmente utilizados en Chile que presentan diferentes contenidos de puzolana natural: 0, 15 y 35% y diferentes dosis de estos cementos: 350 y 450 kg/m³. Además, para estudiar la importancia de la temperatura a temprana edad, se estudian 3 temperaturas de colocación: condición de curado normalizado (23 °C), hormigonado en tiempo frío (10 °C) y hormigonado en tiempo caluroso (40 °C). Adicionalmente se evaluará de forma parcial el efecto del uso de aditivos retardadores de fraguado.

1.2 Objetivos

Los objetivos de la presente tesis se dividen en objetivos principales y específicos según diferentes efectos a evaluar del comportamiento del hormigón.

Objetivo Principal: Estudiar el efecto de la temperatura y del tiempo de fraguado en la estimación de resistencia de hormigones. Se evaluó un elemento masivo hipotético caracterizado por: temperatura máxima, temperatura de colocación del hormigón, tiempo del *peak* de temperatura; y del tiempo de fraguado en la estimación de propiedades mecánicas a temprana edad mediante el método de madurez.

Objetivos Específicos:

En general, como objetivos secundarios o específicos, se pueden encontrar la evaluación de variables determinadas al comportamiento del hormigón, entre ellos:

- Evaluar el efecto de la temperatura de colocación y *peak* de temperatura del hormigón en la resistencia a temprana edad del hormigón.
- Evaluar posibles pérdidas de resistencia en hormigones curados a temperaturas extremas en comparación con curado estándar.
- Conocer el comportamiento de la resistencia a la compresión a temprana edad y a 28 días del hormigón a altas temperaturas, a diferentes temperaturas de colocación y con diferentes cementos con puzolanas naturales utilizadas en Chile.
- Caracterización de las siguientes propiedades relacionadas con la constructabilidad a temprana edad en hormigones con cementos chilenos puzolánicos en comparación con cementos Portland:
 - o Resistencia a compresión ($f(t)$)
 - o Evolución de temperatura ($g(t)$)
- Evaluación del efecto de los siguientes parámetros en las propiedades resistentes del hormigón:
 - o Tipo de Cemento
 - o Dosis de Cemento
 - o Tiempo de Fraguado
- Caracterización de parámetros de las funciones de madurez de hormigones tradicionales chilenos fabricados con adiciones puzolánicas, según distintas metodologías (Pinto y Hover, 1999; ASTM, 2004; Schindler, 2009).
- Evaluación del efecto de la temperatura del hormigón en el cálculo de parámetros de cálculo de madurez, como Energía de Activación (E_a) o Temperatura Datum (T_0) y la aplicabilidad del uso de cubos de morteros para caracterizar el comportamiento del hormigón con estos parámetros.
- Estudio de la relación entre madurez y tiempo de fraguado. Evaluación de la aplicabilidad de un modelo de predicción de fraguado de Schindler (2009) usando

tiempo equivalente específico (t_{eq}) para cementos chilenos. Evaluación de una sola curva de tiempo de fraguado en función de la Energía de Activación, independiente de la temperatura de curado.

- Calibrar ecuaciones de predicción de propiedades de hormigones chilenos para la aplicación del método de madurez y evaluación del error de predicción de resistencia mediante el método de madurez a temprana edad y largo plazo.

1.3 Hipótesis

La hipótesis de este trabajo de tesis es que la temperatura y los tiempos de fraguado afectan a la estimación de resistencia a compresión mediante madurez, por lo que un mejor estudio del efecto de estas variables, permitirá realizar una mejor predicción, conociendo limitaciones y ventajas del método y las variables involucradas.

1.4 Estructura de Tesis

La presente tesis se compone de siete capítulos y está estructurada de manera que la parte central de ella la componen dos artículos de revista y un capítulo adicional de análisis de resultados relacionados con tiempos de fraguado y parámetros de madurez. A continuación se describen los diferentes capítulos de la presente tesis.

En el Capítulo I se presenta una introducción general de la investigación realizada. Además se indican los objetivos principales y específicos además de la hipótesis a responder.

En el Capítulo II se presenta la revisión bibliográfica de los temas analizados en la presente investigación. Se revisan conceptos como hidratación, método para evaluar hidratación, calor de hidratación y métodos para estimar temperaturas en un elemento de hormigón masivo. Además se abarcan los conceptos de método de estimación de resistencia mediante madurez, tiempos de fraguado, hormigones masivos y efecto de las altas temperaturas en el hormigón.

En el Capítulo III se presenta la metodología de investigación y los ensayos realizados para poder comprobar la hipótesis y cumplir los objetivos principales y específicos planteados.

En el Capítulo IV se presenta el *paper* llamado “*Efecto de la Temperatura Máxima en la Resistencia a Compresión del Hormigón*”. Dicho *paper* presenta los resultados y análisis del efecto de la temperatura máxima del hormigón en la resistencia a compresión, tanto en su comportamiento a temprana edad como a largo plazo. Se compara el comportamiento de hormigones curados a temperatura estándar con aquellos sometidos a muy altas temperaturas a temprana edad.

En el Capítulo V se presenta un segundo *paper* llamado “*Efecto de las Altas Temperaturas del Hormigón en la Calidad de la Predicción de Resistencia por el Método de Madurez*”. En este capítulo se analizan resultados relacionados con la estimación de resistencia a compresión mediante el método ASTM de madurez. Se calculan los parámetros Temperatura Datum y Energía de Activación y se evalúa la calidad de la predicción a temprana edad y largo plazo según los diferentes factores involucrados. Se entregan recomendaciones para el uso del método y se propone un nuevo método para mejorar la estimación.

En el Capítulo VI se realiza una descripción del concepto de fraguado de la pasta de hormigón y de la metodología de ensayo ASTM. Se presentan además los resultados y análisis relacionados con las mediciones de tiempo de fraguado ante climas extremos. Se realiza un análisis sobre los factores que afectan el ensayo y aspectos relevantes de la dosificación como tipo y cantidad de cemento. Además se compara el comportamiento de los valores de Energía de Activación según el comportamiento en estado endurecido y de fraguado.

En el Capítulo VII se presentan las conclusiones globales de la investigación. Además se indican recomendaciones e investigaciones futuras relacionadas con el presente estudio.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Si bien el hormigón es uno de los materiales más usados en la construcción actual, debido su bajo costo y relativa facilidad de uso, alta resistencia y buena durabilidad, es este último punto el que puede verse seriamente afectado por malas condiciones ambientales o deficientes mecanismos de construcción y materiales utilizados (Neville, 1996; Mehta y Monteiro, 2006; Bentz, 2010).

Desde el inicio del fraguado hasta los 7 días, definido como temprana edad según ACI, es un periodo de vital relevancia debido a los cambios a nivel de microestructura, propiedades del hormigón y la relación e influencia con las propiedades a edades más tardías (ACI 231, 2003). Curados deficientes han demostrado que afectan la resistencia, serviciabilidad y durabilidad (ACI 207, 2007). El historial de temperatura a temprana edad también tiene un efecto dominante en cómo el hormigón puede desarrollar su resistencia potencial. Defectos en la microestructura provocados por altas temperaturas de curado pueden influir negativamente en la resistencia y la durabilidad (Verbeck y Helmuth, 1968), así “las propiedades mecánicas del hormigón dependen fuertemente de la porosidad de la pasta de cemento hidratada, y está a la vez depende de la razón agua-materiales cementantes, la finura de los materiales cementantes y la efectividad de las condiciones de curado”, estas últimas referidas a la humedad y la temperatura (ACI 231, 2003).

2.1 Temperatura en el Hormigón

Es sabido que a mayor temperatura de curado del hormigón se produce una mayor velocidad de pérdida de fluidez y más rápida hidratación del cemento, lo cual se traduce en un aceleramiento en el fraguado y en una menor resistencia del hormigón en el largo plazo (Neville, 1996).

Cuando el hormigón se hidrata a bajas temperaturas, hay mucho tiempo para que se produzca la hidratación y los productos de ésta sean uniformes en el espacio entre los granos de cemento. Si la hidratación es acelerada a una temperatura mayor, no hay tiempo suficiente para la formación uniforme de productos, y gran cantidad de dichos productos rodean inmediatamente el grano de cemento (ACI 231, 2003; Carrasquillo, 2009). Para hormigones este efecto es más complejo por la presencia del árido grueso que aumenta la zona intersticial (entre el árido y la pasta), lo que aumentaría su posibilidad de agrietamiento.

En el caso que hormigones experimenten altas temperaturas, se ha reportado que si bien se pueden obtener altos valores de resistencias a temprana edad, en un largo plazo esa resistencia disminuye (Kim *et al.*, 1998; Brooks *et al.*, 2007). Este fenómeno es descrito por Verbeck y Helmuth (1968), explicando que los productos de hidratación, cuando el hormigón es sometido a alta temperatura inicial, son de menor calidad que aquellos generados a más bajas temperaturas iniciales. Sin embargo, este efecto no se ve tan evidenciado en hormigones con adiciones minerales, las cuales parecieran compensar este efecto en el largo plazo, manteniendo incluso mayores resistencias a mayores temperaturas, por lo menos hasta una temperatura de curado de 40 °C (Videla y Parada, 1988; Videla *et al.*, 1995; Brooks *et al.*, 2007).

2.2 Fenómenos Térmicos en el Hormigón

2.2.1 Calor de Hidratación

La hidratación de los compuestos del cemento involucra reacciones exotérmicas, es decir, son reacciones que generan calor y aumento de temperatura de un elemento de hormigón. El calor causa expansión y bajo condiciones de restricción pueden causar aumento de la tensión interna de la estructura, lo que aumenta el riesgo de agrietamiento térmico (Mehta y Monteiro, 2006; ACI 207, 2007).

Durante todo este proceso de liberación de calor es cuando el hormigón fragua (empieza la rigidización de la pasta) y comienza a ganar resistencia. Si las condiciones de disipación son adiabáticas, el calor y *peak* de temperatura podría extenderse por varios días. Esta liberación de calor depende fuertemente del tipo y cantidad de materiales cementicios y de los aditivos que se utilicen en la mezcla.

Algunas investigaciones dividen en cinco etapas la hidratación de los compuestos del cemento Portland (Kondo y Ueda, 1969). Esta división se puede observar en la Figura 1 y se caracteriza por distintas fases de liberación de calor en el tiempo por unidad de masa de material cementicio (Neville, 1996; ACI 231, 2003).

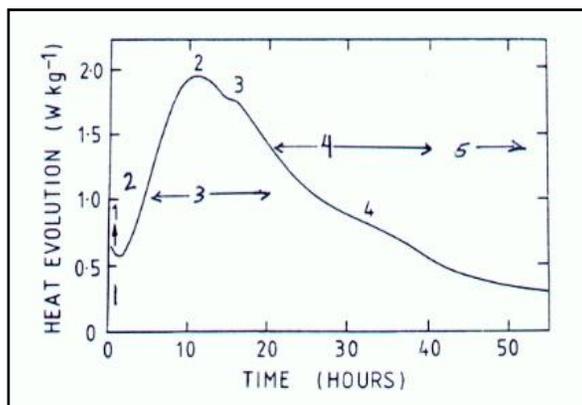


Figura 1: Tasa de evolución de liberación de calor versus tiempo para cemento Portland (Pratt y Ghose, 1983)

Etapa 1 - Reacción Inicial: Se caracteriza por tener una tasa alta de liberación de calor causada por la disolución inicial de productos. En esta etapa, la reacción de C_3A ¹, H y CSH puede generar etringita, compuesto cristalino que con el paso del tiempo se deshace en la mezcla.

¹ C_2S : Silicato Dicálcico, C_3S : Silicato Tricálcico, C_3A : Aluminato Tricálcico, C_4AF : Ferro Aluminato Tetracálcico, CSH: Silicato de Calcio Hidratado, CH: Hidróxido de Calcio.

Etapa 2 - Período de Inducción: Después de la disolución inicial, la tasa de cambios químicos en el sistema se desacelera. La formación rápida de etringita disminuye a medida que la velocidad de reacción entre C_3A y CSH disminuye debido a una capa de etringita en las partículas de C_3A .

Etapa 3 - Aceleración: La tasa de liberación de energía comienza a aumentar durante esta etapa. La reacción principal que ocurre es la hidratación de C_3S para formar CSH y CH.

Etapa 4 - Desaceleración: La hidratación del C_3S disminuye considerablemente, y domina la de C_3A .

Etapa 5 - Reacción Lenta: Comienza a disminuir la hidratación de C_3A , pero es un proceso que continúa lentamente, incluso por años.

Para poder medir el calor generado se han propuesto varios mecanismos (AFNOR, 1998; ACI 231, 2003; Bentz, 2010), entre ellos: calorímetros de conducción, calorímetros isotérmicos (ASTM C 1679, 2009; ASTM C 1702, 2009), calor de solución (ASTM C 186, 2005) y calorímetros adiabáticos (Carlson, 1937). Estos últimos pueden ser utilizados para estimar los aumentos de temperatura directamente en hormigón y no solamente en la pasta de cemento. Para ello se necesita conocer o medir el calor específico de los componentes de la mezcla. Este método es muy útil para estudiar mecanismos de hidratación a temprana edad y en el caso de tener pérdidas de calor (calorímetro semi-adiabático Langavant por ejemplo) se pueden utilizar los principios de transferencia de calor y reacciones químicas representados en la Ecuación (2.1) (AFNOR, 1998; ACI 231, 2003):

$$m_T \bar{C} \frac{dT}{dt} = \sum_i \Delta H_{r,i} \frac{dm_i}{dt} + \varepsilon \quad (2.1)$$

Donde m_T representa la masa total del sistema, \bar{C} el promedio del calor específico del sistema, $\Delta H_{r,i}$ la entalpía de reacción i , T la temperatura del sistema, t el tiempo, m_i masa

de reactivos i , y ε corresponde al calor transferido desde o hacia los alrededores del sistema ($\varepsilon = 0$, para calorímetros adiabáticos). Para calorímetros isotérmicos, $\frac{dT}{dt} = 0$.

2.2.2 Factores que Afectan el Calor de Hidratación

Los principales factores que afectan tanto la magnitud como la evolución del calor de hidratación son el tipo de cemento (composición química, finura, adiciones cementantes), las condiciones ambientales, ya sea temperatura o humedad, y los aditivos químicos.

a) Contenido de Yeso

El yeso juega un rol fundamental en la tasa de hidratación a temprana edad (Verbeck, 1965). Al aumentar el contenido de yeso en el cemento se inhibe la hidratación de C_3A (formando etringita) y estimula la hidratación de C_3S . Esto previene un fraguado rápido de la pasta y dilata el tiempo en que el calor y la hidratación se generan. En la Figura 2 se observa el efecto de distintas cantidades de yeso en el calor de hidratación de pasta de cemento.

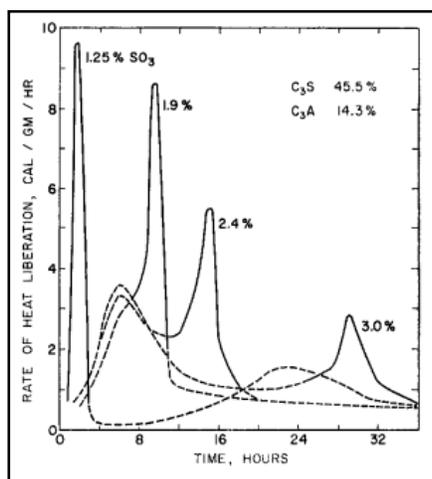


Figura 2: Tasa de liberación de calor versus tiempo para cemento Portland con distintos contenidos de yeso (Verbeck, 1965).

b) Agua de Hidratación

La cantidad de agua disponible para la hidratación, y en general las condiciones de curado, también afecta la hidratación (ACI 308, 2001). Si la humedad relativa es de al menos 80%, la hidratación seguirá su velocidad normal (Powers, 1947), ya que es fundamental mantener la cantidad necesaria de agua libre para la hidratación del cemento y la prevención también de la retracción autógena y térmica (Jensen y Freiesleben-Hansen, 2001; Bentz y Stutzman, 2006; Bentz y Peltz, 2008).

c) Temperatura de Curado

En general los curados a altas temperaturas son utilizados para aumentar la velocidad de reacción y contar con resistencia a compresión a temprana edad lo más rápido posible (Mehta y Monteiro, 2006). Estructuras como vigas prefabricadas son comúnmente curadas bajo este sistema llegando a temperaturas de hasta 100 °C. Si el hormigón posee grandes cantidades de agua evaporable, se pueden generar grietas a temprana edad debido a la expansión del vapor, ya que la permeabilidad de la pasta a temprana edad es baja.

La microestructura de la pasta de cemento en este caso es diferente a la de un curado a temperatura normal (20 °C). A mayor temperatura, no sólo se genera la hidratación más rápido (

Figura 3), sino que también la microestructura es de peor calidad, y quedan partículas de cemento no hidratadas (Verbeck y Foster, 1956; Verbeck y Helmuth, 1968). Otros estudios realizados a pasta de cemento muestran que a bajas temperaturas de curado, la distribución de los productos de hidratación es uniforme, mientras que a elevadas temperaturas se forma una estructura de poro menos homogénea y anidada (Kjellsen *et al.*, 1991).

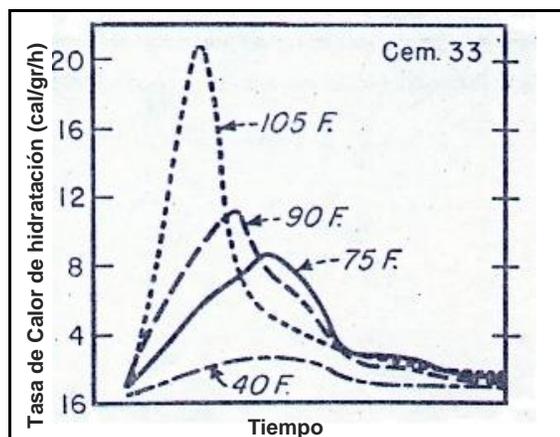


Figura 3: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland a varias temperaturas de curado (Verbeck y Foster, 1956).

d) Aditivos Químicos

En general los aditivos afectan las etapas 1, 2 y 3, de la evolución de calor de hidratación. Según ACI (ACI 116, 2000; ACI 212, 2010), los aditivos son variados según su función y uso. Existen aditivos incorporadores de aire, acelerantes, reductores de agua, retardadores de fraguado, para hormigón fluido, para hormigonado en tiempo frío, para reducir retracción, inhibidores de corrosión, entre otros (ASTM, 2005). Se definen como “un material, además del agua, áridos, cemento y refuerzo de fibra, usado para modificar su estado fresco, fraguado o propiedades en estado endurecido y son incorporados antes o durante el mezclado” (ACI 116, 2000).

El aditivo puede tener un efecto si participa en la reacciones químicas de la hidratación y por lo tanto cambia la termodinámica del proceso (ya sea acelerándola o inhibiéndola) o si cambia los efectos físicos que alteran la transferencia de calor de los materiales de la mezcla (es decir, promoviendo o inhibiendo la transferencia de calor) (ACI 231, 2003). Compuestos como ácidos lignosulfatos, hidróxido carboxílico, azúcares y sales inorgánicas, pueden actuar como retardadores y algunas sales orgánicas e inorgánicas solubles pueden actuar como aceleradores del proceso de hidratación (ACI 212, 2010).

Los retardantes extienden el período de inducción durante la hidratación, sin embargo pueden aumentar la tasa de hidratación después de este período, acortando el tiempo en que se alcanza la máxima evolución de calor. En la Figura 4 se presentan los resultados encontrados por Odler y Abdul-Maula (1987) para diferentes dosis de aditivos retardantes como sucralosa (Sucr) lignosulfatos (L S) y óxido de zinc (Zn O). En ella se observan los diferentes efectos en la hidratación, dependiendo del aditivo.

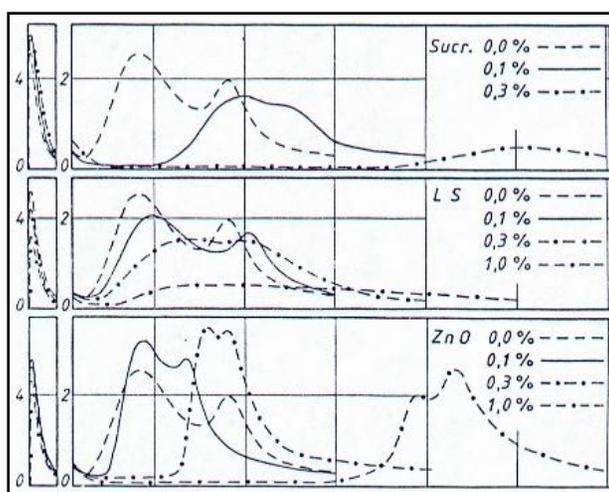


Figura 4: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland con distintos tipos de retardadores y dosis (Odler y Abdul-Maula, 1987).

Se observa que en general a bajas dosis de aditivo (hasta dosis de 0,1%) la cantidad de calor generado en el tiempo de hidratación es la misma. Sin embargo a muy grandes dosis, para el caso de LS y Sucr., pareciera que la hidratación prácticamente se detuvo en el tiempo.

Los aditivos acelerantes están compuestos principalmente de sales solubles inorgánicas o compuestos orgánicos solubles. El clorhidrato de calcio (CaCl_2) es uno de los acelerantes más usados.

En la Figura 5 se muestran algunos resultados reportados por Hewlett (1988).

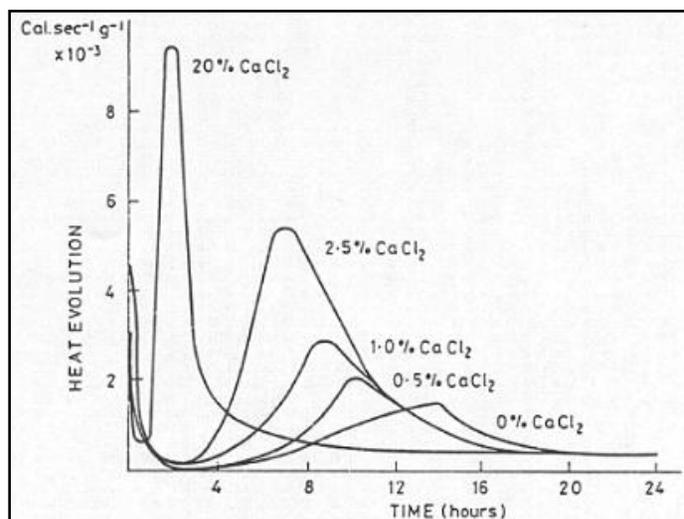


Figura 5: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland con distintas dosis de CaCl_2 (Hewlett, 1988).

Con respecto a aditivos reductores de agua, éstos se usan generalmente para mejorar la fluidez, trabajabilidad y la resistencia a temprana edad y a largo plazo, disminuyendo la porosidad y la permeabilidad del hormigón. En general son ácidos lignosulfatos, ácidos hidroxilatos carboxílicos. Algunos superplastificantes incluyen condensados formaldehidos de melanina sulfonatada y condensados. Estos aditivos actúan sobre la superficie de la partícula de cemento, cambiando su polaridad y separándolas entre ellas para mejorar así su hidratación. En algunos casos esta dispersión de partículas acelera el proceso de fraguado, sin embargo en otros casos lo desacelera ya que cubre las partículas temporalmente y retrasa la hidratación.

Algunos estudios indican que este tipo de aditivos, no sólo cambia la edad en que la evolución de temperatura comienza o llega a su máximo, sino que también disminuye el calor total generado por la pasta (datos de Jolicoeur y Simard, reportados por ACI 213). Este fenómeno no está del todo estudiado, pero es posible que el aditivo sea adsorbido durante el período de inducción y así disminuya el calor total generado.

e) Adiciones Cementantes

Otro de los factores que afecta fuertemente, no sólo la tasa de hidratación sino que también la cantidad de calor generado, son las adiciones cementantes con efecto puzolánico o cementicio. La adición de estas sustancias puede variar el tiempo en que la mezcla comienza a ganar resistencia. Materiales como ceniza, carbonato de calcio o magnesio, minerales de silicato o sílices se ha reportado que disminuyen el tiempo de fraguado (edad donde comienza a rigidizarse la pasta de cemento en el hormigón), mientras otros, como escoria de alto horno actúan como retardantes. Materiales puzolánicos como cenizas volantes, silica fume o puzolanas naturales son reactivas, por lo que se espera que tengan efecto en la hidratación.

En estudios realizados con escoria de alto horno se puede observar una disminución de la tasa de ganancia de resistencia de calor de hidratación y del máximo de calor generado (Figura 6). Sin embargo, cuando la temperatura de curado aumentó de 27 a 35 °C, a pesar de que la tasa de liberación de calor fue menor, el calor total generado es mayor. Esto sugiere que bajo esas condiciones, la temperatura adiabática que se podría alcanzar en grandes volúmenes de hormigón (como hormigón masivo) podría ser mayor para aquellos cementos con escoria (Figura 7).

Con respecto a diferentes temperaturas de curado, estudios realizados por Fulton en 1974 y reportados por ACI (ACI 233, 2003) indican que un hormigón con más de 30% de ceniza es más susceptible a pérdidas de resistencia debido a curados a altas temperaturas que el hormigón sin ceniza. El atribuyó esta reducción a la formación de productos de hidratación a temprana edad que condicen a una mayor pérdida de humedad, lo que impide a otras partículas de cemento continuar la hidratación.

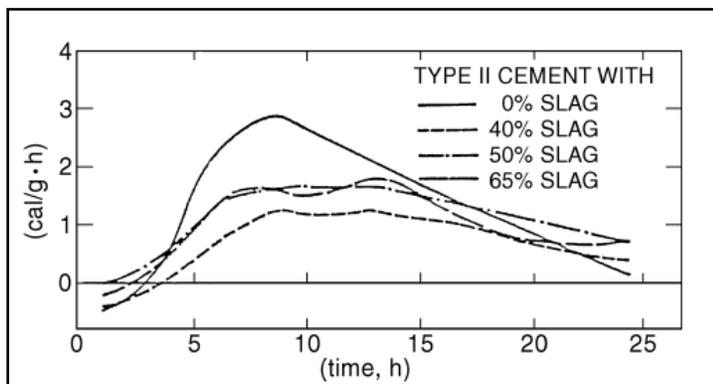


Figura 6: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland Tipo II con diferentes contenidos de reemplazo de escoria. Curado a 27 °C. Resultados de Roy y Idorn (1982) reportados por ACI (ACI 233, 2003).

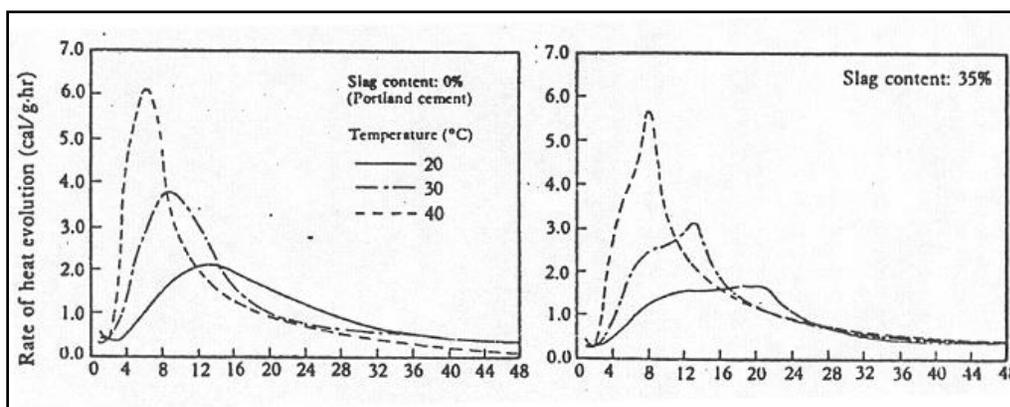


Figura 7: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland con diferentes dosis de escoria y a diferentes temperaturas de curado. Resultados de Kokubu Takahashi y Anzai (1989) (ACI 231, 2003).

Roy (1989) estudió el comportamiento de cenizas volantes y silica fume. La adición de 40% de ceniza volante a cemento Portland disminuye la tasa de evolución de calor de hidratación, aunque esto depende del tipo de cenizas (Figura 8).

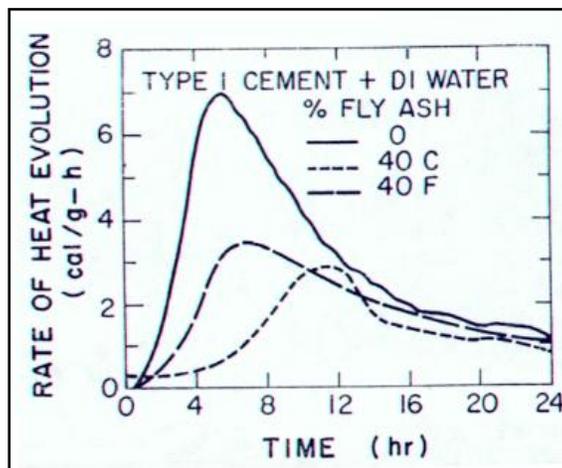


Figura 8: Tasa de liberación de calor vs tiempo para cemento Portland con 40% de cenizas clase C y F. Patrón de 0% (Roy, 1989).

2.2.3 Efecto sobre la Resistencia a Compresión

La hidratación del cemento afecta fuertemente la resistencia a largo plazo, sobre todo en cementos Portland. Se ha estudiado que curados a altas temperaturas, a veces producidos por el mismo gran volumen de hormigón, son capaces de generar un menor potencial de resistencia en el largo plazo (Verbeck y Helmuth, 1968).

Al tener curados a temperaturas altas, la estructura de los productos de hidratación es probablemente más porosa, por lo que tendería a presentar fisuras antes que aquellos hormigones curados a menores temperaturas (Neville, 1996). Verbeck y Helmuth (1968) sugirieron que a tasas rápidas de hidratación inicial, retrasan la hidratación que viene después y producen una distribución no uniforme de los productos de hidratación en la pasta de cemento. La razón de esto sería que a una alta tasa de hidratación no hay tiempo suficiente para la difusión de los productos de hidratación lejos de las partículas de cemento y para una precipitación uniforme en el espacio intersticial (como en el caso de temperaturas más bajas). Como resultado, altas concentraciones de los productos de hidratación se quedan alrededor de las partículas hidratadas. Esto retarda la hidratación tardía y afecta la resistencia a largo plazo (Neville, 1996).

Goto y Roy (1981) examinaron pastas de cemento curadas a temperaturas de 60 y 27 °C, encontrando que la primera presentaba un alto porcentaje de poros de 150nm de diámetro.

Con respecto a hormigones fabricados con aditivos superplastificantes, a pesar que la resistencia a temprana edad se retrasa, en el largo plazo dichos hormigones presentaron mayores resistencias que aquellos que no tenían aditivo (ACI 305, 1999).

Petscharning en 1987 (Neville, 1996) reportó estudios de hormigones curados durante diferentes estaciones del año, y evidenció una fuerte ganancia de resistencia a 24 horas, pero a 28 días dicha resistencia disminuyó casi un 12%. Él encontró que el efecto de pérdida era más pronunciado al usar grandes cantidades de cemento del tipo alta resistencia inicial.

Otros estudios de cilindros curados en terreno indican que la temperatura de colocación del hormigón también tiene un efecto de vital importancia y que para aumentos de un 5°C en dicha temperatura, habría una disminución, al parecer lineal, de resistencia de 1,9 MPa (Dodson y Rajagopalan, 1979).

Investigaciones realizadas por Klieger en 1958 y reportadas por Neville (1996) indican que hormigones curados a temprana edad a temperaturas bajo los 23 °C, llegan incluso a tener mejores resistencias que aquellos curados a temperatura normalizada constante hasta largo plazo (ver Figura 9).

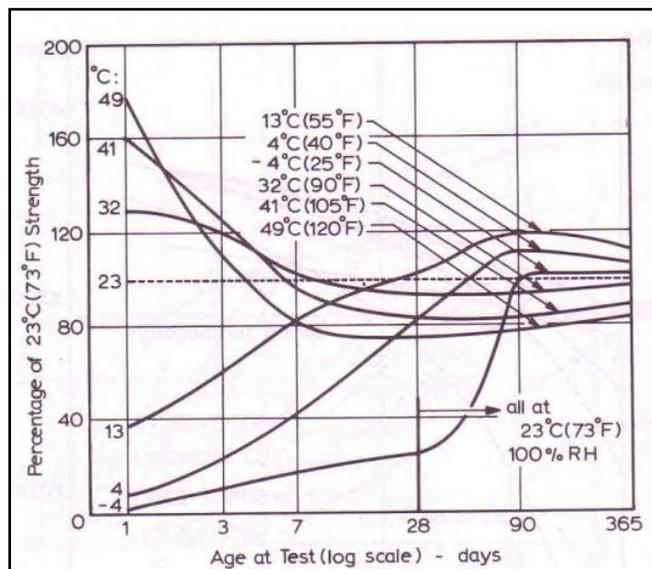


Figura 9: Efecto de la temperatura de curado en la resistencia comparada con un curado estándar (Neville, 1996).

Otros estudios realizados a hormigones que experimentaron altas temperaturas por su alto contenido de cemento, indicaron que a temprana edad (7 días), los resultados de resistencia a compresión fueron de 96 MPa para el hormigón curado a 20°C y 115 MPa para el hormigón en terreno que alcanzó 75 °C. Sin embargo, a 28 días el hormigón curado a 20 °C llegó hasta 122 MPa, mientras que el de terreno llegó a 112 MPa, demostrando así que la temperatura máxima también influye en una posible pérdida de resistencia a compresión de hormigones (Kanda *et al.*, 1992).

Varios estudios también se han realizado a hormigones curados al vapor. En este tipo de hormigones, además del efecto de la mala calidad de los productos de hidratación discutido anteriormente, existe una posible fisuración debido a la expansión de burbujas de aire en la pasta de cemento. La expansión térmica del vapor caliente es al menos 100 veces mayor que la del material sólido que rodea (Neville, 1996) por lo que se pueden presentar importantes reducciones de valores de resistencia a compresión a largo plazo

por las microfisuras que se generan a temprana edad. En la Figura 10 se muestran los resultados a compresión de hormigones curados al vapor (Neville, 1996).

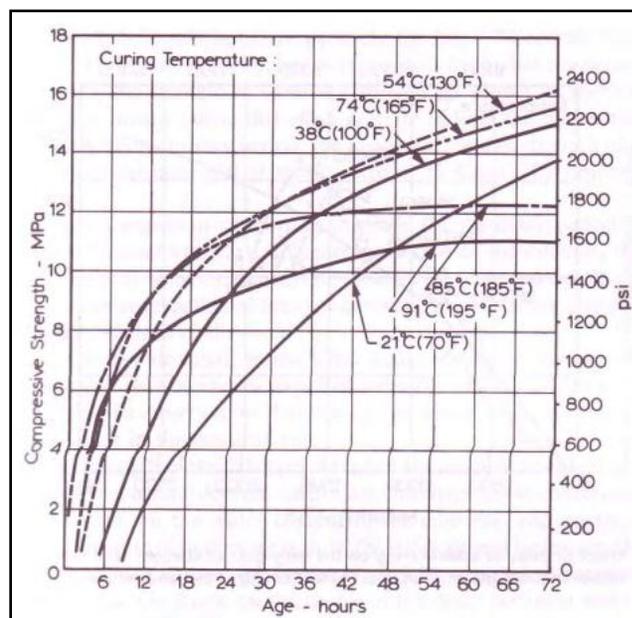


Figura 10: Resistencia a compresión en el tiempo de hormigón curado al vapor a diferentes temperaturas.

2.3 Estimación de Resistencia en Terreno

Para poder optimizar procesos constructivos en terreno y controlar la calidad del hormigón colocado en obra, la estimación de resistencia juega un rol vital. En general el control de calidad del hormigón puesto en obra se basa en la confección de cilindros o cubos cerca de la estructura. Esta puede no ser la mejor opción, ya que estas muestras no representan adecuadamente bien las condiciones de compactación o evolución de temperatura en la estructura (Kehl y Carrasquillo, 1998; Ferreira, 2004).

Para complementar estos controles se pueden realizar ensayos no destructivos. Estos miden alguna propiedad del hormigón, y en base a esa propiedad estiman su resistencia a compresión. Los ensayos no destructivos presentan la ventaja de que son relativamente

simples, rápidos de ejecutar y permiten realizar un gran número de mediciones sobre la estructura sin alterar su resistencia ni funcionalidad (Miretti *et al.*, 1998). Además, estos métodos incorporan factores como el curado aplicado a la estructura, posibles defectos de construcción y las condiciones medioambientales (ACI 228, 2003; Ferreira, 2004).

2.3.1 Método de Madurez

El concepto de madurez comienza a tener relevancia luego de una serie de investigaciones realizadas en Inglaterra, en el contexto de estudios de curado acelerado del hormigón (McIntosh, 1949; Saul, 1951). A partir de estas investigaciones nace el concepto de madurez, el cual refleja la evolución de la resistencia del hormigón en función de su temperatura y tiempo que permanece a dicha temperatura y permite estimar entonces, propiedades resistentes en función de la temperatura experimentada por el hormigón.

El método de madurez posee variadas ventajas, entre ellas se pueden mencionar (Carino, 1991; Constantino y Carrasquillo, 2000; Carino y Lew, 2001; ASTM, 2004):

- Es una metodología basada en ensayos tradicionales a compresión.
- La implementación en terreno del concepto y del procedimiento es relativamente simple.
- Provee una predicción instantánea para resistencia en terreno.
- Provee importantes beneficios relacionados con operaciones en terreno, como la remoción de puntales, moldajes y la protección al frío; la determinación del tiempo de ejecución de juntas; el cálculo del tiempo adecuado para comenzar a cargar una estructura o para abrir un camino.
- No depende directamente del operador ni del espécimen controlado.
- Es económicamente viable.

El método asume que hay sólo una función que relaciona la resistencia del hormigón con la razón espacio-gel (Powers, 1947), el cual es función de la razón agua/materiales cementantes y el grado de hidratación. Sin embargo, esta relación a veces no es única, ya que pequeñas microfisuras provocadas por gradientes térmicos, o cambios en la humedad de la pasta de cemento y entre ésta y los áridos, que afectarían los productos de hidratación y harían más compleja la predicción (ACI 231, 2003). Esto causaría un efecto de *cross-over*, donde hormigones que experimentaron mayores temperaturas iniciales, presentan menores resistencias a mediano y largo plazo que aquellas curadas a temperaturas más bajas (Carino, 1991). Otras desventajas del método tienen relación con la nula variabilidad que deben tener las mezclas en terreno para poder usar las mezclas estudiadas en laboratorio como patrón, además de ser sensible a condiciones de humedad, compactación y curado.

Tampoco considera algún tipo de limitación por temperaturas “extremadamente” altas a temprana edad, como en algunos casos se podría llegar al tener importantes volúmenes de hormigón (hormigones masivos).

De expresiones que reflejan el mismo principio de madurez, nace el concepto de tiempo equivalente (t_e), definido como el número de días u horas de curado a una temperatura de referencia (T_r) requerida para producir una madurez igual a la alcanzada en un período de curado (t_i) a otra temperatura (T_i):

$$t_e = \frac{k_{T_i}}{k_{T_r}} \cdot t_i = \gamma(T_i) \cdot t_i \quad (2.2)$$

Donde k_{T_i} es la constante de velocidad de reacción a la temperatura de curado T_i y $\gamma(T_i) \cdot t_i$ es el factor de conversión de edad, el cual puede tener una función lineal (Saul, 1951), exponencial según la ecuación de Arrhenius (Freiesleben-Hansen y Pedersen, 1977) o cuadrática (Weaver y Sadgrove, 1971). Todas ellas se presentan en las Ecuaciones (2.3) a (2.5).

$$t_e(T_r) = \sum_0^t \frac{(T_c - T_0)}{(T_r - T_0)} \cdot \Delta t \quad (2.3)$$

$$t_e(T_r) = \sum_0^t \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T_c} \right) \right] \cdot \Delta t \quad (2.4)$$

$$t_e(T_r) = \sum_0^t \left(\frac{T_c - T_0}{T_r - T_0} \right)^2 \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

Donde t_e corresponde al tiempo en horas equivalentes a una temperatura de referencia T_r (°C), Δt al intervalo de tiempo en hora, T_c a la temperatura promedio en °C del hormigón durante el intervalo de tiempo Δt , T_0 a la Temperatura Datum a la cual el hormigón no gana resistencia y está en °C, E_a representa la Energía de Activación aparente en J/mol y R es la constante universal de los gases equivalente a 8,3144 J/mol/K.

El primer valor sugerido para Temperatura Datum fue de McIntosh (1949) y correspondió a -1,1 °C. Saul (1951) recomendó usar -10,5 °C para cementos Tipo I, Sadgrove -16 °C (1971) y Carino (1991) -10 °C independiente del tipo de cemento. Por otro lado ASTM C 1074 (2004) recomienda un valor de 0 °C para cemento Portland Tipo I e investigaciones recientes recomiendan también un valor cercano a 0 °C para cementos con adiciones de reemplazo como ceniza volante y escoria de alto horno (Brooks *et al.*, 2007).

Para el caso de usar la función de Freiesleben-Hansen y Pedersen se ha demostrado que el valor de Energía de Activación depende fuertemente del tipo de cemento utilizado (finura, tipo y cantidad), el tipo y dosis de aditivo (Carino, 1991; Carino y Tank, 1992) y no así de la razón agua-cemento (Videla y Parada, 1988; Jonasson *et al.*, 1995).

Para mezclas con cemento Tipo I, investigaciones recientes recomiendan valores de E_a entre 38.000 J/mol y 45.000 J/mol (ASTM, 2004; Brooks *et al.*, 2007). En el caso de usar adiciones cementantes, valores entre 32.000 y 42.000 J/mol son recomendados usar.

Con respecto a posibles ecuaciones para determinar el valor de la Energía de Activación, Freiesleben-Hansen y Pedersen (1977) propusieron valores basados en mezclas curadas a temperatura constante. Ellos propusieron un valor fijo para temperaturas de curado sobre los 20 °C (33.500 J/mol) y valores mayores que éste para temperaturas de curado bajo los 20 °C (valores en función de la temperatura de curado). Otras investigaciones (Jonasson, *et al.*, 1995) proponen una fórmula para caracterizar este parámetro en cementos suizos, pero éstos difieren en un 32% para temperaturas de 20 °C con respecto a la formulación de Freiesleben-Hansen y Pedersen. Indican también que a mayor temperatura de curado, menor es el valor de la Energía de Activación. RILEM 119-TCE recomienda usar un único valor de Energía de Activación (valor de Energía de Activación Aparente) independiente del tipo de cemento, sin embargo otras investigaciones indican que cuando se usa escoria de alto horno como adición cementicia, es recomendable valores altos de más de 48.000 J/mol (Schindler, 2004). Otros modelos también se han desarrollado en función de la composición química de los cementos (Riding *et al.*, 2011).

En el caso de buscar valores más precisos de T_0 y E_a para cada mezcla, ASTM C 1074 describe un procedimiento estándar. Éste se basa en la confección de morteros de 50x50 mm y su posterior ensayo a compresión. Este procedimiento indica que la tasa de ganancia de resistencia de cilindros de hormigón se puede representar a través de cubos de mortero (Carino y Tank, 1992). Sin embargo estos valores están basados en la evolución de resistencia y no está comprobado que sean representativos de la etapa de endurecimiento del hormigón previa al fraguado de la pasta. En esos casos el valor de energía de activación sería menor (Schindler, 2004; Wade *et al.*, 2010).

Varias ecuaciones se pueden utilizar para caracterizar la relación Resistencia-Tiempo (o Resistencia-Madurez) $R(t)$. Entre ellas se destaca la Ecuación (2.6) Lineal-Logarítmica (Plowman, 1956), (2.7) Hiperbólica (Chin, 1971; Carino y Lew, 1983) y (2.8) Exponencial (Freiesleben-Hansen y Pedersen, 1985), las cuales se presentan a continuación:

$$R(t) = a + b \cdot \log(t) \quad (2.6)$$

Donde a y b son constantes que dependen del tipo de cemento y razón Agua/Cemento; y t es la edad (h).

$$R(t) = R_u \cdot \frac{K \cdot (t - t_0)}{1 + K \cdot (t - t_0)} \quad (2.7)$$

Donde R_u es la resistencia última (MPa); K es la constante de velocidad (h^{-1}); t es la edad (h) y t_0 es la edad a la que comienza el desarrollo de resistencia (h).

$$R(t) = R_u \cdot \exp\left(-\left[\frac{\tau}{t}\right]^\beta\right) \quad (2.8)$$

Donde R_u es la resistencia última (MPa); τ = Constante de tiempo; t es la edad (h) y β es la constante de forma.

Las ecuaciones (2.7) y (2.8) tienen la característica de presentar una resistencia “techo”. En cambio, la ecuación (2.6) no presenta un techo, y a medida que aumenta la edad, aumenta la resistencia, claro que en menor medida. Sin embargo, la ecuación planteada por Plowman (1956), representa en la mayoría de los casos una buena aproximación para cementos con puzolanas naturales utilizados en Chile (Videla y Parada, 1988; Masana, 2001; Bustos, 2011).

2.3.2 Match Curing

Uno de los principales problemas del control de calidad en terreno con probetas es la poca similitud que tienen estas con la estructura real, sobre todo en cuando a la evolución y *peak* de temperatura experimentada (Kehl y Carrasquillo, 1998).

El concepto de realizar *match curing* se basa en replicar el mismo ciclo térmico de ciertos elementos de hormigón a probetas con control de temperatura y capacidad para manejar la temperatura interna. Este mecanismo se basa en pruebas realizadas en los años 20, donde laboratorios de investigación en Inglaterra y Estados Unidos comenzaron a analizar los efectos del tipo de cemento, contenido de cemento y temperaturas de colocación del hormigón, relacionados con la ganancia de resistencia en el tiempo. Esto lo realizaron registrando la temperatura de elementos de hormigón masivo y replicando el curado en probetas con el mismo perfil de temperatura (Cannon, 1986). Un esquema se muestra en la Figura 11. También se realizaron estudios sobre los efectos del uso de adiciones cementantes como cenizas volantes sobre *creep*, módulo de elasticidad y permeabilidad del hormigón.

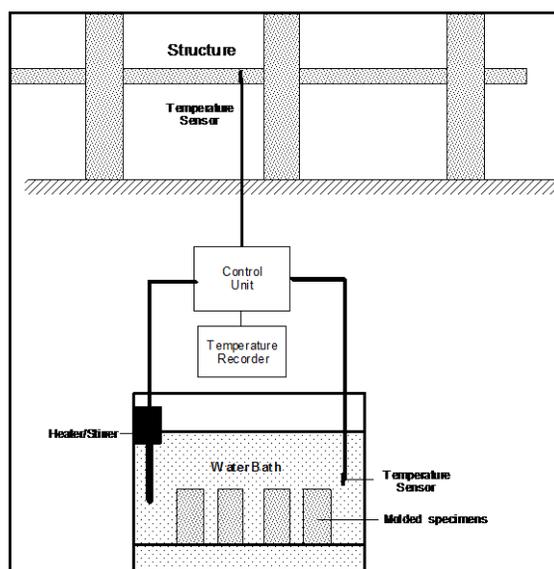


Figura 11: Esquema del procedimiento *match curing* (adaptado de ACI 231).

En los años 70 y 80, se crearon y masificaron sistemas de *match curing* para usarlos en de forma masiva en terreno. En la actualidad, mecanismos como SURE CURE® (Products-Engineering, 2008) se utilizan para replicar condiciones de terreno, lo más similar posible en laboratorio, eliminando así una de las variables principales que diferencian ambos comportamientos (Cannon, 1986). Estos sistemas de basan en la confección de cilindros de 100x200 mm, los cuales se fabrican directamente sobre un sistema aislante para controlar externamente las variaciones de temperatura.

En la Figura 12 se muestra parte del equipamiento disponible para dicho procedimiento. En ella se observan los cilindros térmicos que regulan la temperatura de la probeta de hormigón al interior.



Figura 12: Parte del equipamiento desarrollado para realizar *match curing* en probetas de hormigón (Fuente: www.concret curing.com).

Otra alternativa viable para modificar la temperatura en hormigones, es mantenerlos en cámaras de curado con temperatura controlable con alto porcentaje de humedad o sumergidos directamente en agua (Cannon, 1986; Schindler, 2009). Además del control de temperatura variable, es relevante poder mantener un buen sistema de curado e intercambio de agua necesaria para la hidratación. El sistema presentado en la Figura 12,

si bien no considera ingreso adicional de temperatura de curado, tampoco pierde agua durante el proceso de curado.

Una de las desventajas es la necesidad de realizar varias pruebas de laboratorio para conocer el comportamiento del hormigón a través de probetas. Además, la temperatura a la que se someten las probetas, sólo representan el lugar de la estructura donde se encuentra la termocupla. Para evaluar otras posiciones se deben replicar a otros ciclos térmicos otras probetas.

2.3.3 Otros Métodos para Estimar Resistencia en Terreno

Para estimar la resistencia en terreno, existen varios otros métodos de ensayos no destructivos, entre ellos:

a) Ensayos *cast in place*:

Corresponden a ensayos que permiten obtener especímenes cilíndricos de hormigón en losas nuevas sin la necesidad de extraer testigos. Se deja un molde cilíndrico sujeto a una cubierta que se encuentra fija al moldaje de la zona donde se colocará el hormigón y luego se hormigona la losa y al mismo tiempo se rellena este molde (ACI 228, 2003). De esta manera el hormigón tendrá la misma temperatura que experimenta la losa. Está normado según ASTM C 873.

b) Resistencia a la penetración:

Este ensayo consiste en introducir una sonda de largo conocido en el hormigón mediante una pistola a presión. Se mide luego el largo de dicha sonda que queda fuera del hormigón. Necesita estudiarse la curva Resistencia a la penetración – tiempo para estimar la Resistencia a compresión – tiempo. Es muy sensible al tipo y cantidad de árido presente en la mezcla, debido a su dureza y a la cuantía de armadura. Está normado según ASTM C 803/C 803M.

c) Ensayo *pullout*:

Consiste en extraer un inserto que ha sido previamente introducido en la estructura cuando el hormigón estaba en estado fresco. La fuerza necesaria para extraerlo es directamente proporcional a la resistencia a compresión del hormigón. Es relativamente simple pero genera cierto daño en la estructura y debe ser programado junto con el hormigonado.

Según Carino (1991) es uno de los ensayos que mejor estima la resistencia del hormigón en terreno.

d) Ensayo *break-off*:

El método consiste en medir la fuerza necesaria para quebrar un cilindro desde un gran volumen de hormigón. El ensayo determina la resistencia a flexión en un plano paralelo a la superficie del hormigón y a una distancia especificada bajo la superficie. Se debe preparar antes de hormigonar el elemento de hormigón y se utiliza un gato hidráulico portátil para generar la fuerza que provoca la ruptura y los resultados. Depende de la velocidad con que se aplicó la fuerza para generar la falla. Este método está normado según ASTM C 1150.

e) Ensayo de rebote:

Más conocido como el ensayo del martillo Schmidt, mide la dureza de la superficie pero aparentemente tiene poca relación teórica con la resistencia a compresión del hormigón. Los resultados del ensayo están influenciados por la suavidad de la superficie, la edad de la muestra, la humedad superficial e interna del hormigón, el tipo y cantidad de árido constituyente del hormigón, el tipo de cemento y la carbonatación de la superficie del hormigón (Carino, 1991; Ferreira, 2004).

f) Ensayo de ultrasonido:

Consiste en medir la velocidad de un pulso de una onda de compresión que viaja a través de una distancia conocida del hormigón. Teóricamente, la onda de compresión en los sólidos está directamente relacionada con el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y densidad del material. Como el módulo de elasticidad es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (ACI 318, 2008), conociendo la velocidad de la onda, se puede calcular la resistencia a compresión de manera indirecta.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Programa Experimental

Como se vio en los capítulos anteriores, existen variados métodos para poder estimar la resistencia a compresión del hormigón en terreno. Además, el calor de hidratación y los factores que lo afectan juegan un rol fundamental en la temperatura que puede alcanzar un elemento de hormigón, y por lo tanto afectar la resistencia a temprana edad y a largo plazo. Es por esto que la presente investigación busca determinar el efecto de la temperatura en el hormigón y evaluar la predicción de resistencia mediante el método de madurez. Además se evaluará la aplicabilidad del método de madurez a la estimación de tiempos de fraguado a diferentes temperaturas ambientales.

Para ello se procedió a fabricar cilindros de hormigón y someterlos a ciclos térmicos que simularan la evolución de temperatura de un hormigón masivo en terreno, bajo diferentes temperaturas ambientales y condiciones de dosificación. Es decir cada hormigón, de acuerdo a su dosificación (tipo y dosis de cemento principalmente) y condiciones ambientales (temperatura de colocación de la mezcla) quedó determinado por un ciclo térmico único a aplicar.

3.1.1 Factorial de la Investigación

Para desarrollar los objetivos propuestos, se determinaron las siguientes variables independientes de estudio:

a) Razón Agua/Cemento: Se mantuvo fija la razón Agua/Cemento e igual a 0,5.

b) Tipo de cemento: Se utilizaron 3 cementos fabricados en Chile: cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% de puzolana natural), cemento Puzolánico Corriente (35% de puzolana natural) y Portland (0% de puzolana natural). El objetivo de estos

niveles fue evaluar el efecto del contenido de puzolana en el comportamiento a temprana edad y largo plazo de los hormigones, además de evaluar la finura del cemento en la ganancia de resistencia a temprana edad y a curados acelerados. Además se evaluó el calor de hidratación característico de cada uno de ellos.

b) Dosis de cemento: Para poder cambiar la temperatura máxima experimentada y el volumen de pasta, se utilizaron dos dosis de cemento: 350 y 450 kg/m³. La dosificación se realizó por volumen, por lo que se ajustó la cantidad de áridos.

c) Temperatura de colocación: Para representar condiciones de hormigonado en tiempo frío (10 °C), tiempo caluroso (40 °C) y curado estándar (23 °C) se varió la temperatura inicial de colocación de los hormigones estudiados. Además estos niveles permitirían tener diferentes temperaturas *peak*.

d) Dosis de Aditivo: Para lograr diferentes tiempos de fraguado se utilizó un aditivo retardador en dosis 0,3% con respecto al peso del cemento.

Como variable dependiente quedó la temperatura máxima, que se estimó de acuerdo al tipo y dosis de cemento; de la temperatura de colocación de la mezcla y de las condiciones de disipación de calor del elemento hipotético de hormigón. La aproximación se realizó mediante el método Schmidt.

Para los tipos de áridos se utilizó arena gruesa chancada y gravilla chancada tamaño máximo 20 mm. En la Tabla 1 se presentan las variables dependientes e independientes. También se indican las mezclas que se confeccionaron a temperatura estándar.

Tabla 1: Variables independientes y dependientes de la investigación.

Razón W/C	0,5																																				
Árido	Gravilla chancada 20 mm, Arena Gruesa Chancada																																				
Tipo de Cemento	Portland Puzolánico Alta Resistencia												Puzolánico Corriente								Portland																
Dosis de Cemento (kg/m ³)	350						450						350								450				350		450										
Aditivo Retardante	S/A	S/A	S/A	c/Re	c/Re	S/A	S/A	S/A	c/Re	c/Re	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A									
Temperatura de Colocación (°C)	23	10	23	23	23	40	23	10	23	40	23	10	23	23	40	23	23	40	23	10	23	40	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	
Temperatura Máxima Calculada (°C)	23	50	60	23	60	80	23	60	70	90	23	40	50	23	50	70	23	50	60	80	23	60	23	75	95	23	60	23	75	95	23	60	23	75	95	23	60

3.1.2 Métodos de Ensayo

El programa de ensayos fue dividido en cuatro partes.

a) Ensayos a compresión de cubos de mortero sometidos a diferentes temperaturas de curado

Para evaluar el método ASTM de madurez, se procedió a fabricar cubos de morteros de 50x50 mm de las mezclas estudiadas y someterlas a curados isotérmicos en condiciones de clima frío (10 °C), caluroso (40 °C) y estándar (23 °C). De esta manera se pudo evaluar su aplicabilidad con respecto a resistencia de hormigones y calcular los parámetros T_0 y E_a . Se realizaron 45 cubos de mortero por cada mezcla y 15 de ellos se curaron a cada una de las temperaturas mencionadas. Se ensayaron a compresión 2 cubos por edad y a madurez similar (según Saul Nurse y $T_0 = -10^\circ\text{C}$). Las edades de ensayo fueron 2, 5, 9, 17, 27 y 42 días para cubos a 10 °C; 2, 3, 6, 10, 17 y 28 días para cubos a 23 °C; y 1, 2, 4, 7, 11 y 17 días para cubos a 40 °C.

b) Ensayos a compresión de cilindros de hormigón curados a temperatura estándar

Para obtener la curva Resistencia – Tiempo equivalente a 23 °C, se fabricaron cilindros de hormigón de 100x200 mm y se curaron sumergidos en agua permanente hasta las edades de ensayo. Se ensayaron a compresión 2 cilindros a 1, 3, 7, 14 y 28 días.

c) Ensayos a compresión de cilindros de hormigón simulados bajo ciclos térmicos

Para representar resistencia de un hormigón en terreno, se procedió a fabricar probetas cilíndricas y realizarles un curado sumergido con temperatura variable. Se ensayaron a compresión 2 cilindros a edades de 1, 3, 7, 14, 28, 60 y más de 210 días. Para mayor detalle de ciclos térmicos aplicados a las probetas de hormigón ver Sección 5.4.2.1 “Ciclos Simulados en Hornos” y ANEXO B: Sistema de Ensayo Probetas Sometidas a Ciclos Térmicos.

d) Ensayos de tiempos de fraguado a diferentes temperaturas ambientales

De manera de representar las propiedades del hormigón previas al comienzo de la ganancia de resistencia, se procedió a estudiar y caracterizar los tiempos de fraguado de hormigones a distintas temperaturas ambientales (tiempo frío, caluroso y estándar). Se evaluó además la aplicabilidad del método de madurez para la estimación de tiempos de fraguado según distintos autores. Se realizaron ensayos de resistencia a la penetración a 2 cubos de mortero de hormigón de 150x150 mm por cada condición ambiental.

4. EFECTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

4.1 Resumen

La especificación de altas dosis de cemento en hormigones estructurales masivos utilizados en fundaciones de edificios altos y de chancadores para la minería genera importantes temperaturas en el hormigón, alcanzando valores muy superiores a los especificados en la práctica. Es sabido que estas altas temperaturas pueden afectar la resistencia a temprana edad y largo plazo y la durabilidad del hormigón. Esta investigación analiza el primero de los problemas, es decir el efecto de la temperatura del hormigón sobre la resistencia a compresión a temprana edad y largo plazo. Además, tomando en consideración que es común el uso de materiales de reemplazo de cemento para controlar el agrietamiento térmico a temprana edad, esta investigación evalúa el comportamiento de hormigones fabricados con tres tipos de cementos que contienen 0, 15 y 35% (en peso) de puzolanas naturales y con distinta finura Blaine.

Considerando el caso de elementos masivos, de las dosis de cemento de 350 y 450 kg/m³, aproximadamente requeridos para satisfacer la resistencia especificada, y los calores de hidratación de los cementos utilizados, se simularon ciclos térmicos esperados de los hormigones masivos en terreno. Los hormigones fabricados en laboratorio se sometieron a temperaturas máximas entre 40 y 90 °C. Se realizaron ensayos a compresión a temprana edad (1, 7 y 14 días) y a largo plazo (28, 60 y 210 días).

Se comprobó que a mayor temperatura del hormigón, mayor fue la velocidad de ganancia de resistencia a temprana edad, pero menor la magnitud de la resistencia a mediano y largo plazo, respecto a iguales hormigones sometidos a curado estándar. El comportamiento observado depende de la dosis de puzolana y finura del cemento. A mayor contenido de puzolana, la disminución de la magnitud de resistencia a largo plazo

se ve retardada en el tiempo. Así mismo la velocidad de ganancia de resistencia a temprana edad fue mayor a mayor dosis y menor finura del cemento.

Se concluyó que el deterioro de la resistencia del hormigón a largo plazo, depende de la magnitud de la temperatura máxima y del tipo de cemento. Para cementos con 0, 15 y 35% de puzolana, la máxima temperatura del hormigón a la que comenzó a disminuir la resistencia en comparación a la obtenida con curado estándar, fue de 55, 70 y 75 °C, respectivamente.

Palabras clave: altas temperaturas, resistencia a compresión, puzolanas naturales.

4.2 Introducción

Diseñadores y constructores de grandes presas de hormigón fueron los primeros en detectar la importancia del aumento de temperatura en las propiedades resistentes y de durabilidad del hormigón y en el riesgo de agrietamiento que podían producir cuando la deformación térmica del hormigón está restringida externa o internamente (ACI 207, 2005; Mehta y Monteiro, 2006). Normalmente son los hormigones masivos y los curados a altas temperaturas en la industria del hormigón prefabricado los que presentan estos tipos de problemas y se han realizado muchos estudios con respecto a problemas térmicos del hormigón (Gajda y VanGeem, 2002; Gajda y Alsamsam, 2006; ACI 207, 2007). Este fenómeno también puede ocurrir en columnas, pilotes, vigas, muros, fundaciones y en general estructuras de menores dimensiones que una presa, pero que por la cantidad de material cementicio presente, y por técnicas constructivas que retardan la disipación de calor, la temperatura a la que pueden llegar es bastante alta, superando incluso los 90 °C. Esto no sólo puede generar agrietamiento por diferencial térmico (restricciones internas o externas) sino que también agrietamiento por la generación de productos expansivos en la pasta de cemento, fenómeno denominado formación diferida de etringita (Neville, 1996; Kehl y Carrasquillo 1998; Mehta y Monteiro, 2006).

A modo de ejemplo, en la Figura 13 se presentan las temperaturas registradas en la fundación de un edificio de más de 50 pisos en Santiago, Chile.

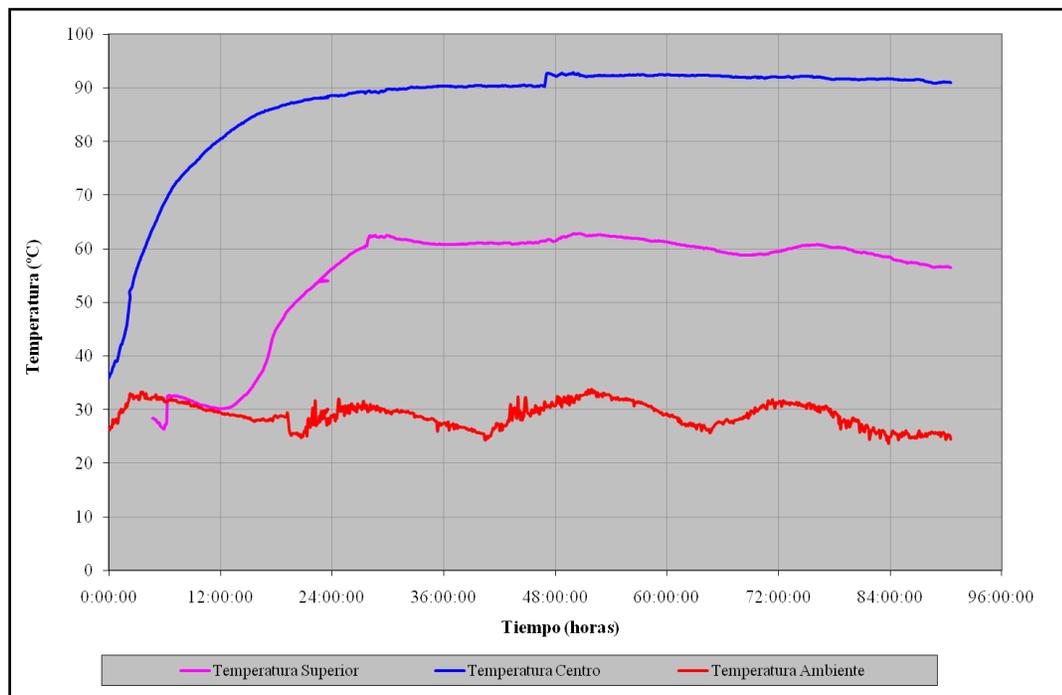


Figura 13: Registro de temperaturas en el centro y superficie de un elemento de hormigón masivo. Fuente: DICTUC.

Las altas temperaturas de curado en el hormigón también están presentes en la confección de hormigón prefabricado. Elementos como vigas estructurales generalmente se curan al vapor a temperaturas sobre los 60 °C e incluso 90 °C igual pueden presentar un deterioro de la resistencia (Neville, 1996; Kehl y Carrasquillo, 1998), encontrándose también problemas de etringita tardía (expansión del volumen de pasta) y deterioro a muy largo plazo (Carrasquillo, 2009).

Ha sido reportado que para hormigones fabricados con cementos Portland y curados a temprana edad a temperaturas de hasta 40 °C, si bien aumenta la resistencia los primeros días, en el largo plazo (28 o más días) disminuye la magnitud de la resistencia con respecto a probetas curadas a menor temperatura, observándose incluso el cruce de las curvas resistencia-tiempo (Verbeck y Helmuth, 1968; Carino, 1991; Kehl y Carrasquillo, 1998; Kim *et al.*, 1998; Brooks *et al.*, 2007). Este fenómeno podría deberse a la peor

calidad de los productos de hidratación producidos bajo condiciones de alta temperatura a temprana edad, lo que en un mediano a largo plazo reduciría la velocidad de aumento de resistencia al no permitir el proceso de difusión en la hidratación (Verbeck y Helmuth, 1968).

El hormigón endurecido (grado de hidratación alto) también puede presentar menores resistencias cuando se somete a altas temperaturas. En este caso el hormigón tiene menor permeabilidad por lo que al vaporizar el agua y expandir su volumen, puede también generar fisuras internas debido a la presión interna (Mehta y Monteiro, 2006).

En general cuando se anticipa que un hormigón tendrá altas temperaturas durante la construcción, las medidas que se adoptan se enfocan en prevenir problemas de durabilidad, agrietamiento de la estructura y posibles pérdidas de resistencia a largo plazo. Se han propuesto valores para la temperatura máxima (70 °C) y diferencia máxima admisible entre el centro y el borde de un elemento de hormigón masivo (20 °C) (ACI 308, 2001; ACI 207, 2007). Resultados de estudios sugieren que si la temperatura interna del hormigón supera 82 °C, la durabilidad a largo plazo puede verse afectada por la formación tardía de etringita (Carrasquillo, 2009), fenómeno que se observa normalmente en cementos o áridos con gran cantidad de sulfatos. Estos daños pueden no detectarse hasta varios años después de que la obra fue construida y se han observado en hormigones prefabricados curados con vapor de agua donde la temperatura ha llegado a los 90°C. No obstante según Mehta y Monteiro (2006) la etringita puede formarse a temperaturas más bajas como 65 °C.

La problemática de la magnitud de resistencia en el largo plazo ha sido estudiada también para hormigones con adiciones cementantes como escoria de alto horno, cenizas volantes o puzolanas naturales (Cannon, 1986; Videla *et al.*, 1995; Neville, 1996; Ramlochan *et al.*, 2003; Brooks *et al.*, 2007). El uso de adiciones cementantes en hormigones curados bajo agua a mayores temperaturas que la estándar, mejora la

magnitud de la resistencia a largo plazo (Cannon, 1986). Además el módulo de elasticidad sería mayor al conseguido bajo condiciones de curado estándar (20 °C) y mayores a hormigones fabricados con cemento Portland. Con respecto a *creep*, se reportan menores valores con el uso de adiciones cementantes (Masana, 2001; Aguilar, 2005; Bustos, 2011). Esto se explicaría debido al efecto Puzolánico tardío de las adiciones cementantes, las que mejoran las propiedades resistentes a largo plazo.

En el caso de usar adiciones cementantes como ceniza volante, escoria de alto horno o puzolanas naturales, no ha sido demostrado el efecto de cruce. Reportes de resistencia para curados isotérmicos de hasta 40 °C en morteros (Brooks *et al.*, 2007) y hormigones con puzolanas naturales (Videla *et al.*, 1995) indican que a mayor temperatura, mayor es la resistencia hasta al menos 28 días de edad.

4.3 Importancia de la Investigación

En la literatura especializada se encuentran muchos estudios del efecto de las altas temperaturas en hormigones fabricados con cementos Portland (Dodson y Rajagopalan, 1979; Cannon, 1986; Kanda *et al.*, 1992; Ramlochan *et al.*, 2003; Brooks *et al.*, 2007) pero existe limitada información respecto a hormigones fabricados con puzolanas naturales y sometidos a curados a altas temperaturas (sobre 40 °C). Esta investigación busca ayudar a llenar este vacío dado el aumento del uso de puzolanas en los hormigones masivos y a las altas dosis de cemento que se especifican en la actualidad para estas aplicaciones. Por lo tanto en esta investigación se analiza la evolución de la resistencia a compresión en hormigones sometidos a elevadas temperaturas, similares a las condiciones reales de hormigones masivos en terreno. Se analiza el efecto del contenido de puzolana y de la finura Blaine, además de las temperaturas iniciales y máximas experimentadas, para determinar si se producen pérdidas de resistencia a temprana edad y largo plazo. A partir de los resultados obtenidos se entregan

recomendaciones respecto a las temperaturas máximas del hormigón que sería adecuado incorporar a las especificaciones.

4.4 Programa de Investigación

4.4.1 Materiales Utilizados

4.4.1.1 Áridos

Se utilizaron 2 tipos de áridos: gravilla chancada de tamaño máximo nominal de 25 mm y arena gruesa chancada en proporción 50% cada árido. Las propiedades físicas y granulométricas de los áridos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades físicas y granulométricas de los áridos.

Tamiz		Gravilla	Arena Gruesa
ASTM	Tamiz (mm)	% Pasa	% Pasa
1 1/2"	40	100	100
1"	25	98	100
3/4"	20	89	100
1/2"	12,5	19	100
3/8"	10	2	100
# 4	5	0	89
# 8	2,5	0	67
# 16	1,25	0	53
# 30	0,63	0	37
# 50	0,315	0	12
# 100	0,16	0	0
Propiedad		Gravilla	Arena Gruesa
<i>Forma del árido</i>		Chancado	Chancado
<i>Densidad Real SSS (kg/m³)</i>		2.699	2.690
<i>Densidad Real Seca (kg/m³)</i>		2.669	2.657
<i>Densidad Neta (kg/m³)</i>		2.752	2.747
<i>Densidad Aparente Suelta Seca (kg/m³)</i>		1.653	1.722
<i>Absorción (%)</i>		1,13	1,25
<i>Huecos (%)</i>		39	36

4.4.1.2 Cementos

Se utilizaron 3 tipos de cemento: Portland Tipo I con 0% de puzolana natural (P) según ASTM C 150, Portland Puzolánico Alta Resistencia con 15% de puzolana natural (AR) y mayor finura para lograr un comportamiento a compresión similar a un cemento Portland; y Puzolánico Corriente con 35% de puzolana natural (CC), según NCh 148. Las propiedades de los cementos utilizados se presentan en las Tabla 3 y Tabla 4. El calor de hidratación de los cementos se determinó mediante el ensayo semi-adiabático Langavant, según normativa francesa (AFNOR, 1998).

Tabla 3: Propiedades físicas y mecánicas de los cementos utilizados.

Propiedad	Unidad	Cemento		
		Portland (0% PN)	Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% PN)	Puzolánico Corriente (35% PN)
<i>Tiempo de fraguado inicial</i>	<i>min</i>	150	160	190
<i>Tiempo de fraguado final</i>	<i>min</i>	220	240	260
<i>Peso específico</i>	-	3,163	2,931	2,823
<i>Finura Blaine</i>	<i>cm²/gr</i>	3.930	4.840	4.452
<i>Resistencia a Compresión</i>				
<i>1 día</i>	<i>MPa</i>	18,7	17,2	8,6
<i>3 días</i>	<i>MPa</i>	35,5	32,7	18,6
<i>7 días</i>	<i>MPa</i>	48,5	41,3	25,7
<i>28 días</i>	<i>MPa</i>	63,0	51,9	38,6
<i>Resistencia a Flexotracción</i>				
<i>1 días</i>	<i>MPa</i>	4,3	3,6	2,1
<i>3 días</i>	<i>MPa</i>	5,8	5,6	3,6
<i>7 días</i>	<i>MPa</i>	7,5	6,4	4,8
<i>28 días</i>	<i>MPa</i>	8,5	7,9	7,0
<i>Tiempo de Temperatura máxima</i>	<i>h</i>	16	18	22

Tabla 4: Propiedades químicas de los cementos utilizados.

Nota: PN = puzolanas naturales.

Compuesto	Portland (0% PN)	Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% PN)	Cemento Puzolánico Corriente (35% PN)
SiO_2 (%)	21,13	30,70	30,02
CaO (%)	63,43	52,24	45,60
Fe_2O_3 (%)	2,70	2,60	2,06
Al_2O_3 (%)	5,43	5,80	4,25
SO_3 (%)	2,62	2,07	2,64
MgO (%)	1,48	1,70	1,83

En la Figura 14 se muestran las curvas de calor de hidratación versus tiempo para cada uno de los cementos estudiados. Como era de esperarse, el cemento Portland tiene mayor calor de hidratación a 7 días (70 cal/gr) que el cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia (64 cal/gr) y que el cemento Puzolánico Corriente (50 cal/gr).

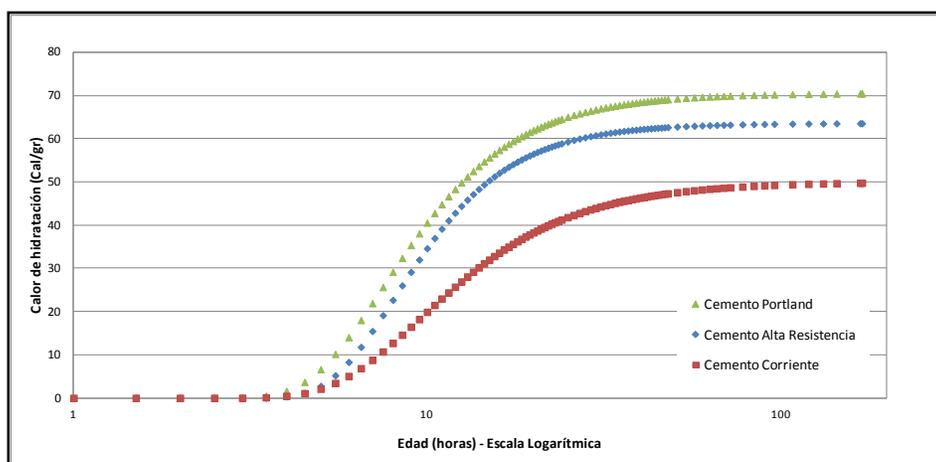


Figura 14: Calor de hidratación para Cemento Portland, Portland Puzolánico Alta Resistencia y Puzolánico Corriente.

4.4.2 Diseño de Experimentos

Se utilizaron 3 tipos de cemento y dos dosis de cemento: 350 kg/m^3 y 450 kg/m^3 . El objetivo de usar diferentes dosis de cemento fue lograr que los hormigones alcanzaran temperaturas máximas notoriamente distintas. Estos niveles se encuentran dentro de los comúnmente utilizados para proyectos con hormigones estructurales masivos.

Se utilizaron además 3 temperaturas iniciales, simulando condiciones de enfriamiento del hormigón u hormigonado en clima frío (10 °C), condiciones estándar ambientales (23 °C) y condiciones de clima caluroso (40 °C). Además para cada uno de los hormigones estudiados se prepararon probetas que se curaron a temperatura constante de 23 °C (condición estándar).

En todos los hormigones se utilizó una razón agua/cemento (W/C) de 0,5. Este valor se definió dado que en proyectos de hormigones estructurales masivos se especifican comúnmente razones entre 0,45 y 0,55 (Mehta y Monteiro, 2006). Además dicho valor permitió obtener una trabajabilidad adecuada para todos los hormigones estudiados. Todos los hormigones se fabricaron sin aditivo.

Los hormigones fueron sometidos a diferentes ciclos térmicos simulando condiciones de terreno. En total se reprodujeron 15 ciclos (ver Tabla 5). En la Tabla 5 se indica la temperatura máxima calculada a la que fue sometido cada hormigón. En la sección siguiente se explica con mayor detalle las características de los ciclos térmicos aplicados.

Tabla 5: Factorial del Experimento.

Tipo de Cemento	Portland Puzolánico Alta Resistencia						Puzolánico Corriente						Portland		
Dosis de Cemento (kg/m ³)	350			450			350			450			350	450	
Temperatura de Colocación (°C)	10	23	40	10	23	40	10	23	40	10	23	40	23	23	40
Temperatura Máxima Calculada (°C)	50	60	80	60	70	90	40	50	70	50	60	80	60	75	95

El diseño de las mezclas se realizó por volumen absoluto y dado que se fijaron la razón W/C y la dosis de cemento, la dosificación se ajustó con áridos.

4.4.3 Metodología y Descripción de Ensayos

4.4.3.1 Ciclos Térmicos Simulados en Hornos

La temperatura que puede alcanzar un hormigón se puede representar por la Ecuación (4.1).

$$T_{m\acute{a}x} = T_c + \Delta T_i \quad (4.1)$$

Donde $T_{m\acute{a}x}$ es la temperatura máxima que puede alcanzar el hormigón, T_c es la temperatura de colocación del hormigón y ΔT_i es la temperatura generada por la hidratación del cemento que depende entre otras cosas del tipo y cantidad de material cementicio.

Para determinar el valor de ΔT_i , existen varios métodos (Riding *et al.*, 2006; ACI207, 2007; Carrasquillo, 2009) y entre ellos destacan el Método Schmidt (Rawhouser, 1945), el método gráfico (*Portland Cement Association*), el presentado en ACI 207.2R y la modelación con elementos finitos. Según Riding *et al.* (2006) el método Schmidt, basado en resolver la ecuación de transferencia de calor unidireccional, es uno de los mejores métodos para estimar la temperatura en elementos de hormigón masivo, sobre todo si los datos para la modelación provienen de ensayos de calor de hidratación semi-adiabáticos (con pérdida de calor hacia el exterior). Es por esta razón que se utilizó este método para estimar la temperatura máxima de cada hormigón. Además con este método se obtuvo una referencia de las condiciones de disipación de calor y del tiempo que los hormigones estarían sometidos a altas temperaturas. Las temperaturas máximas calculadas con este método se muestran en la Tabla 5.

El método usado en laboratorio para reproducir el ciclo térmico en terreno se basó en el uso de piscinas de agua dentro de hornos térmicos. Esto debido a las ventajas de contar con un curado húmedo (evitar pérdidas de humedad y agrietamiento asociado) y poder controlar externamente la temperatura versus tiempo.

En la Figura 15 se muestra un esquema del ciclo de temperatura aplicado a los hormigones.

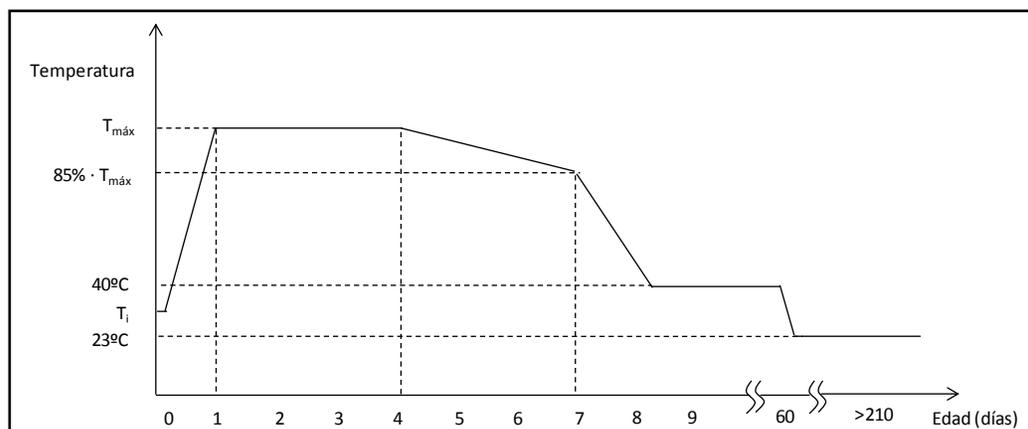


Figura 15: Diagrama de ciclo térmico aplicado a hormigones.

Luego de fabricado el hormigón, la temperatura se mantuvo constante durante 7 horas e igual a la temperatura de colocación. Pasadas las 7 horas se aumentó la temperatura del hormigón hasta alcanzar en aproximadamente un día, la temperatura máxima calculada a una razón entre 1,1 y 2,3 °C/h, dependiendo de la magnitud de la temperatura máxima. Una vez alcanzada la temperatura máxima (entre 20 y 27 horas), se desmoldaron las probetas y se mantuvo la temperatura máxima por las siguientes 72 horas. Se utilizó este procedimiento ya que datos analizados de proyectos indicaron que para evitar la disipación rápida de calor y prevenir agrietamiento por gradiente térmico en grandes volúmenes de hormigón, generalmente se mantiene constante la temperatura máxima del hormigón entre los 3 y 7 días con el uso de protección en la superficie (Fernández, 2009; Vega y Guarda, 2009). Finalizado este período, desde el día 4 al día 7 se aplicó un enfriamiento gradual (de entre 0,1 a 0,2 °C/h), de modo que a los 7 días se llegara a un 85% de la temperatura máxima. Desde el día 7 se procedió a bajar la temperatura gradualmente en *coolers* térmicos (entre 0,1 y 2 °C/h) hasta llegar a 40 °C, temperatura que se mantuvo hasta el día 60. Desde el día 61 las probetas fueron trasladadas a una cámara de curado a temperatura estándar (23 °C). Estas últimas temperaturas reflejan

mejor las condiciones de disipación lenta que poseen los hormigones masivos simulados en esta investigación.

En la Figura 16 se pueden apreciar ejemplos de ciclo térmicos aplicados a un mismo tipo de hormigón, pero con diferentes temperaturas iniciales.

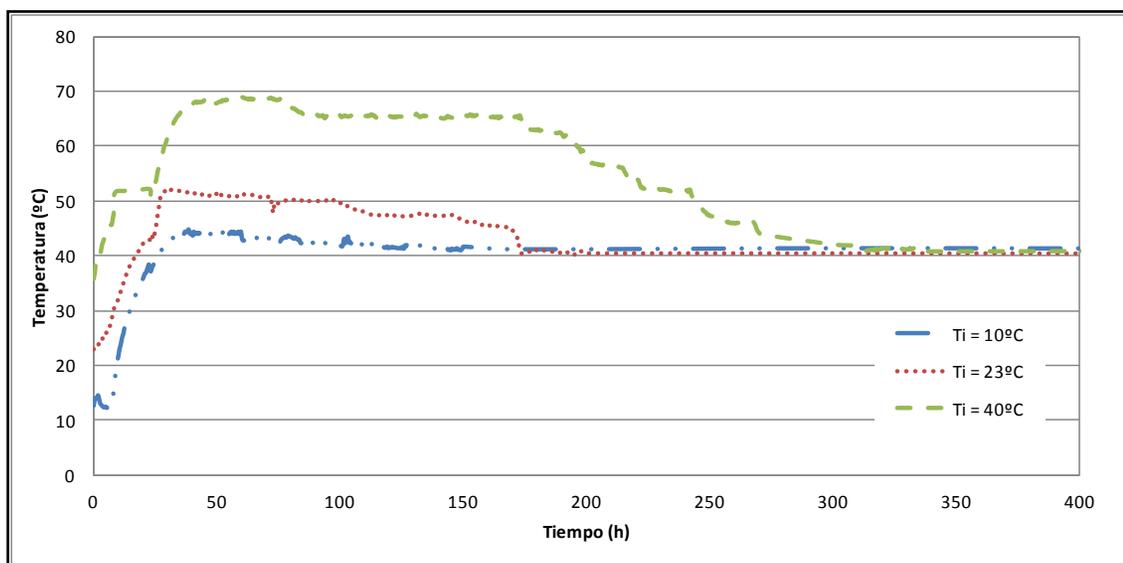


Figura 16: Evolución de la temperatura medida en probetas de un mismo tipo de hormigón con diferentes temperaturas iniciales de colocación (T_i).

Todos los hormigones estudiados se confeccionaron con materiales previamente acondicionados a las temperaturas iniciales según correspondiera por al menos 24 horas antes del mezclado.

Las temperaturas máximas medidas en las probetas de hormigón estuvieron dentro de un rango $\pm 10\%$ con respecto al máximo calculado.

4.4.3.2 Descripción de los Procedimientos de Ensayo

a) Ensayo a compresión de hormigón curado a 23 °C: Para determinar la curva resistencia-tiempo equivalente a temperatura estándar, se fabricaron probetas cilíndricas de 100x200 mm. Se ensayaron 2 probetas a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. Adicionalmente se dejó una probeta para el registro de temperatura.

b) Ensayo a compresión de hormigones sometidos a ciclos térmicos: Para evaluar la velocidad de ganancia de resistencia, se fabricaron probetas cilíndricas de hormigón de 100x200 mm, las que fueron sometidas a los diferentes ciclos considerados en la investigación. Se ensayaron 2 probetas a compresión a edades de 1, 3, 7, 14, 28, 60 y mayor o igual a 210 días.

En caso de existir una diferencia mayor a un 10% entre los resultados a compresión y el promedio por edad, se ensayó una tercera probeta.

4.5 Presentación y Análisis de Resultados

4.5.1 Evolución de la Resistencia a Compresión

En la Tabla 6 se muestra un resumen con todos los resultados de resistencia a compresión de los hormigones. En las Figura 17 y Figura 19 se muestra la comparación del efecto del ciclo térmico en la evolución de la resistencia a compresión del hormigón, resultados segregados por tipo y dosis de cemento para una misma dosificación de pero con diferentes ciclos térmicos (con temperaturas iniciales de 10, 23 y 40 °C; y curado estándar constante a 23 °C).

Los resultados se han presentado en un gráfico semilogarítmico ya que investigaciones previas (Masana, 2001; Aguilar, 2005; Bustos, 2011) realizadas en hormigones fabricados con cementos chilenos indican que el comportamiento se ajusta muy bien al

modelo de Venuat que predice una relación lineal entre la resistencia a compresión y el logaritmo en base 10 del tiempo. Esta consideración se tomó para el caso de las resistencias a muy largo plazo (más de 60 días) en base a la resistencia a mediano plazo.

En las Figura 17 a Figura 19 se evalúa el efecto del ciclo térmico en la evolución de resistencia segregando el análisis para hormigones con igual tipo de cemento.

Tabla 6: Resistencias a compresión promedio medidas y desviación estándar para los diferentes hormigones y ciclos térmicos estudiados en la investigación.

	Edad (días)	Ti = 10°C		Ti = 23°C		Ti = 40°C		T = 23°C - cte	
		R. Media (MPa)	Desv. Estándar (MPa)						
P-350	1			26,1	0,60			13,6	0,19
	3			42,8	2,41			30,7	1,12
	7			52,7	0,00			42,4	2,92
	14			56,5	5,21			52,9	1,28
	28			56,5	3,86			59,7	0,37
	60			61,2	3,39			68,7	-
	>210			72,9	4,62			87,7	-
P-450	1			18,0	2,26	28,4	0,39	7,6	0,44
	3			35,1	0,41	39,1	1,45	25,4	0,01
	7			42,6	2,63	41,4	0,01	37,7	0,26
	14			47,6	1,62	45,1	0,42	47,6	1,91
	28			51,5	0,00	47,0	0,00	56,2	0,99
	60			55,0	4,98	49,2	5,02	68,7	-
	>210			63,1	0,00	50,5	0,15	85,0	-
AR-350	1	12,5	0,84	22,6	0,19	19,8	0,55	12,3	0,98
	3	28,8	0,30	39,2	1,26	40,2	2,21	28,3	1,55
	7	41,6	1,28	48,9	0,99	45,4	1,22	36,7	1,99
	14	42,3	2,40	50,0	0,03	46,3	0,00	46,8	0,00
	28	45,7	1,95	51,7	0,46	48,2	0,10	51,1	0,95
	60	51,3	1,27	53,1	1,44	49,0	0,60	59,2	-
	>210	52,4	2,21	57,9	1,24	50,6	1,02	72,1	-
AR-450	1	17,3	0,57	22,8	2,49	19,2	0,79	12,2	0,84
	3	33,1	1,86	40,9	5,35	30,1	0,12	28,5	0,70
	7	39,0	0,68	45,8	1,41	33,7	2,90	35,0	3,53
	14	46,0	1,93	51,7	1,74	36,1	2,52	44,7	0,29
	28	46,2	1,70	54,0	0,00	38,2	3,32	50,6	2,86
	60	48,5	1,07	57,1	0,00	41,1	7,98	57,7	-
	>210	49,7	3,28	-	-	43,1	0,00	69,7	-
CC-350	1	3,7	0,22	5,4	0,05	10,6	0,05	1,5	0,03
	3	16,3	0,13	19,7	1,13	26,2	0,82	8,1	0,20
	7	28,6	0,28	30,9	0,08	30,9	0,35	17,7	0,47
	14	37,2	0,34	36,7	0,54	31,0	1,72	21,8	0,02
	28	42,0	2,52	41,4	0,76	31,7	0,00	30,8	0,00
	60	47,4	0,77	44,6	0,00	31,9	0,75	36,1	-
	>210	47,9	3,10	-	-	34,7	1,47	54,4	-
CC-450	1	5,8	0,12	7,6	0,02	8,1	0,10	3,3	0,30
	3	22,9	0,73	26,6	0,97	23,8	0,40	13,5	1,05
	7	35,2	2,07	34,2	0,87	26,8	0,42	18,5	0,00
	14	37,1	1,05	38,0	0,37	28,6	2,44	26,9	0,92
	28	35,6	0,31	38,5	0,00	28,9	2,43	31,5	2,50
	60	40,8	0,80	38,6	2,19	32,2	1,40	38,1	-
	>210	42,4	1,98	39,4	0,00	36,0	2,89	47,4	-

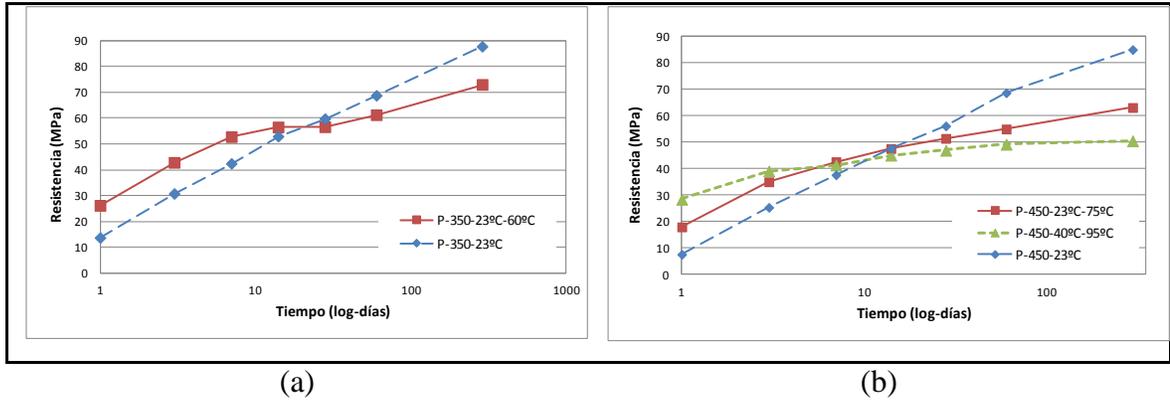


Figura 17: Evolución de la resistencia de hormigones con cementos Portland y dosis 350 kg/m³ (a) y 450 kg/m³ (b).

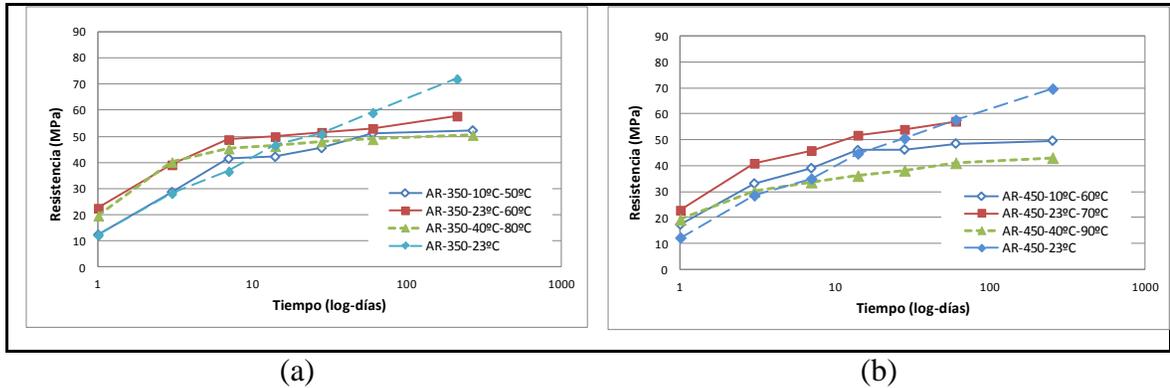


Figura 18: Evolución de la resistencia de hormigones con cemento Alta Resistencia y dosis 350 kg/m³ (a) y 450 kg/m³ (b).

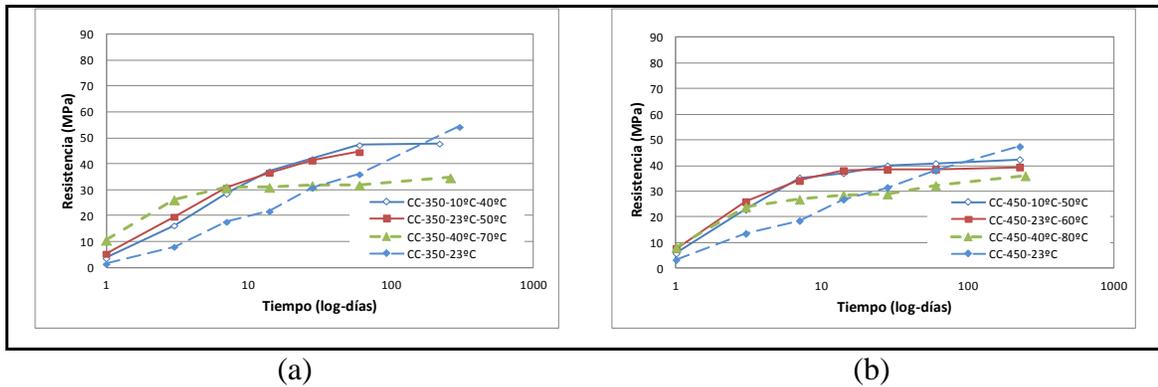


Figura 19: Evolución de la resistencia de hormigones con cemento Corriente y dosis 350 kg/m³ (a) y 450 kg/m³ (b).

En los hormigones con cemento Portland (Figura 17) se observa lo reportado en la literatura sobre los efectos de cruce (Carino, 1991; Brooks *et al.*, 2007), es decir aquellos hormigones que fueron curados a 23 °C antes de los 28 días superan en resistencia a aquellos sometidos a altas temperaturas. En el caso del hormigón con dosis 350 kg/m³, a partir de los 28 días aproximadamente el hormigón curado a 23 °C supera la resistencia del curado a altas temperaturas. Para los hormigones con dosis de 450 kg/m³ se observa el mismo fenómeno pero a más temprana edad (14 días). Esto se debe posiblemente a las altas temperaturas de estos hormigones, lo que provoca no sólo una mala calidad de productos de hidratación, sino que también posible fisuración por expansión del volumen de agua, lo que disminuye la resistencia en el mediano plazo.

En la Figura 18 se muestra que los hormigones con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% de puzolana natural) y 350 kg/m³ de dosis, con temperaturas iniciales de 23 °C y 40 °C, alcanzaron una “resistencia techo” de 50 MPa aprox. a los 10 días y a temprana edad tuvieron similar velocidad de ganancia de resistencia. Por el contrario el hormigón con temperatura de colocación de 10 °C siempre tuvo resistencias por debajo de la resistencia a 23 °C al menos hasta los 60 días. También se observa que el hormigón que comenzó el ciclo a 40 °C y llegó a una temperatura máxima de 80 °C presentó una leve disminución de resistencia a compresión a largo plazo con respecto a aquel que comenzó con 10 °C. Mientras tanto el hormigón curado a temperatura estándar, a pesar de tener inicialmente baja resistencia, aumentó su resistencia por sobre los otros hormigones sometidos a ciclos térmicos simulando hormigones masivos.

Los hormigones con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia y mayor contenido de cemento (Figura 18-b), muestran una mayor velocidad de aumento de resistencia en el tiempo con el mismo efecto de “resistencia techo” observado en los resultados a compresión de hormigones con 350 kg/m³ de cemento. El caso con mayor aumento de resistencia, tanto para 350 kg/m³ como para 450 kg/m³, fue aquel cuya temperatura inicial fue de 23 °C.

Para el caso de los hormigones con mayor contenido de puzolanas (Cemento Puzolánico Corriente) la Figura 19 muestra que mientras mayor es la temperatura de curado inicial y temperatura *peak* de los hormigones a temprana edad, mayor es la resistencia a compresión. Sin embargo, antes de los 28 días (para ambas dosis de cemento) ya se presenta un efecto de pérdida de ganancia de resistencia para aquellos hormigones que llegaron hasta 70 y 80 °C.

Por lo tanto se puede concluir que a altas temperaturas, la resistencia a compresión a largo plazo disminuye en comparación con la resistencia de hormigones bajo curado estándar. Este fenómeno se aprecia en todos los tipos de cemento, pero es más notorio y se produce a más temprana edad en los cementos Portland y Portland Puzolánico Alta Resistencia (con 15% de puzolana natural) que en los cementos Puzolánico Corriente. Se concluye también que por la cantidad de volumen de pasta, en aquellos hormigones con más contenido de cemento, se observa una resistencia techo (más marcada para cementos con puzolanas). Esto se explicaría por el secamiento del gran volumen de pasta, que impide la hidratación tardía del cemento (y que por lo tanto aumente la resistencia). Además en la etapa en que el hormigón ya está endurecido, las altas temperaturas pueden generar fisuración debido a la expansión del volumen de agua.

Además se concluye que la relación de Venuat cumple bastante bien a 23 °C, lo que confirma que la hidratación puede continuar en el mediano y largo plazo, tanto para cementos Portland como para cementos con puzolanas naturales.

Por consideraciones técnicas, económicas y de sustentabilidad, en la actualidad se ha estado promoviendo especificar la resistencia a compresión en elementos estructurales masivos a edades mayores de 28 días. Esto se debe a que es normal no comenzar a cargar este tipo de estructuras hasta mucho tiempo después de fabricadas. Con el objeto de cuantificar el efecto de este cambio en la resistencia del hormigón se analizan los

porcentajes de aumento de resistencia a compresión para los hormigones simulados como hormigones masivos en terreno, con respecto a su resistencia medida a 28 días.

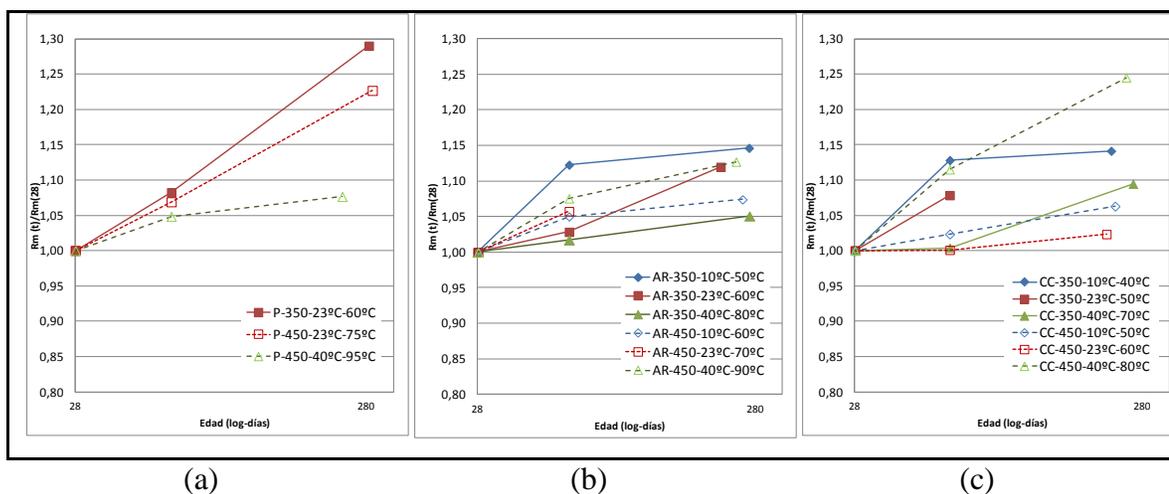


Figura 20: Evolución del cociente entre la resistencia a compresión del hormigón a una edad y su resistencia a 28 días, para hormigones con distinto ciclo térmico y cementos P (a), AR (b) y CC (c).

Para los hormigones con cemento Portland, el aumento fue mayor al reportado por la bibliografía (hasta un 10% según ACI 207), llegando a más de un 20% en los casos en que la temperatura inicial fue de 23 °C, independiente de la dosis de cemento. Sin embargo, para temperaturas iniciales de 40 °C el porcentaje se redujo a un 8%.

Para los hormigones fabricados con cementos Portland Puzolánico Alta Resistencia y Puzolánico Corriente, los aumentos de resistencia estuvieron entre un 5 y un 15%.

Se aprecia que en general los hormigones fabricados con cemento CC presentan un menor aumento de resistencia a los 28 días, por lo tanto es menos económico, ya que se necesita utilizar una mayor dosis de cemento para alcanzar la misma velocidad de ganancia de resistencia que los otros tipos de cemento.

4.5.2 Aumento Relativo de Resistencia a Compresión del Hormigón

Con el objetivo de observar el efecto de la temperatura de curado en la magnitud de la resistencia a cualquier edad, en las Figuras 21 a 23 se presenta la razón entre la resistencia medida en el tiempo en los hormigones sometidos a un determinado ciclo térmico y la resistencia medida en laboratorio a una temperatura constante de 23 °C. Este cocuiente se ha denominado “aumento relativo” de resistencia.

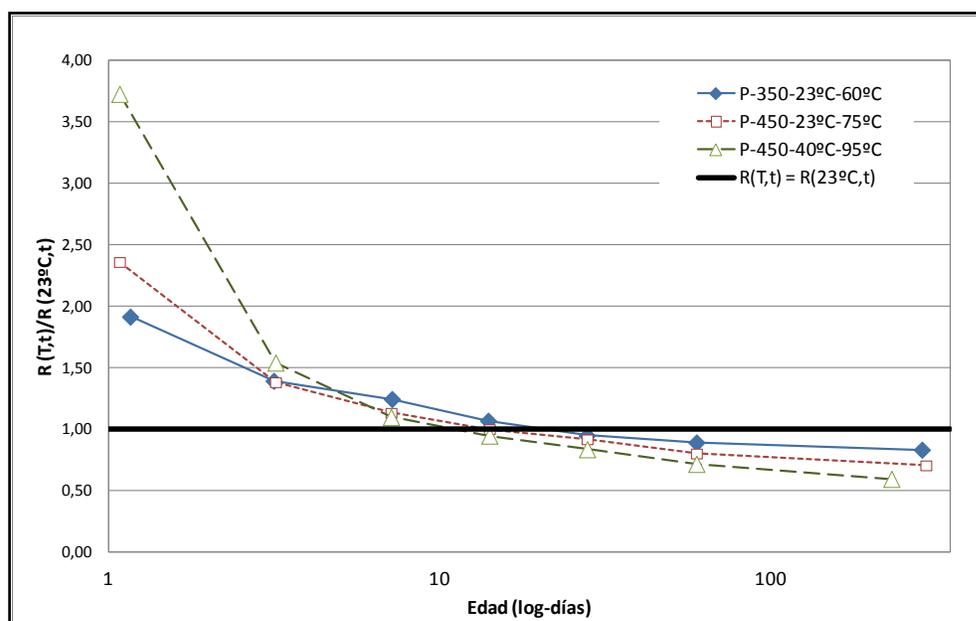


Figura 21: Evolución de la razón entre la resistencia a compresión del hormigón sometido a distintos ciclos térmicos y del hormigón curado a temperatura estándar (23°C) para cementos P.

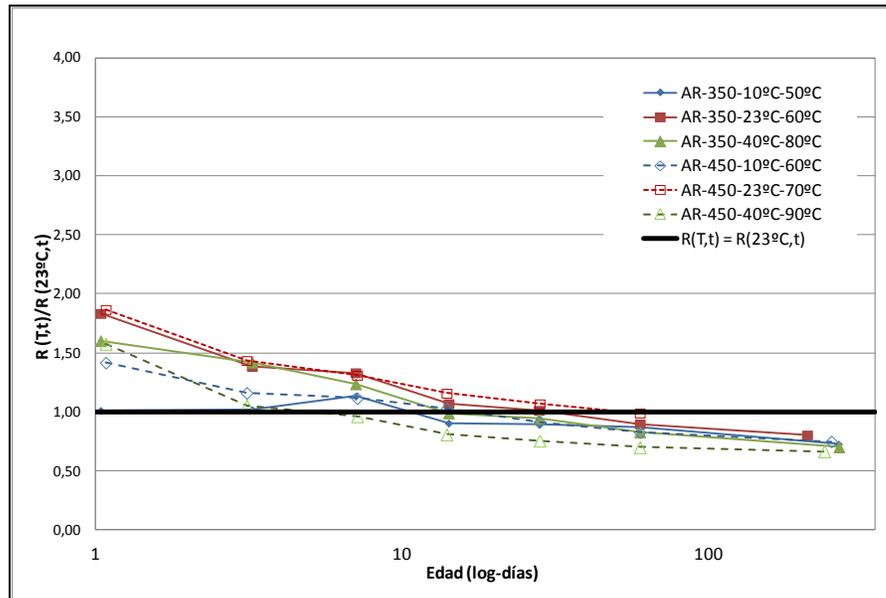


Figura 22: Evolución de la razón entre la resistencia a compresión del hormigón sometido a distintos ciclos térmicos y del hormigón curado a temperatura estándar (23°C) para cementos AR.

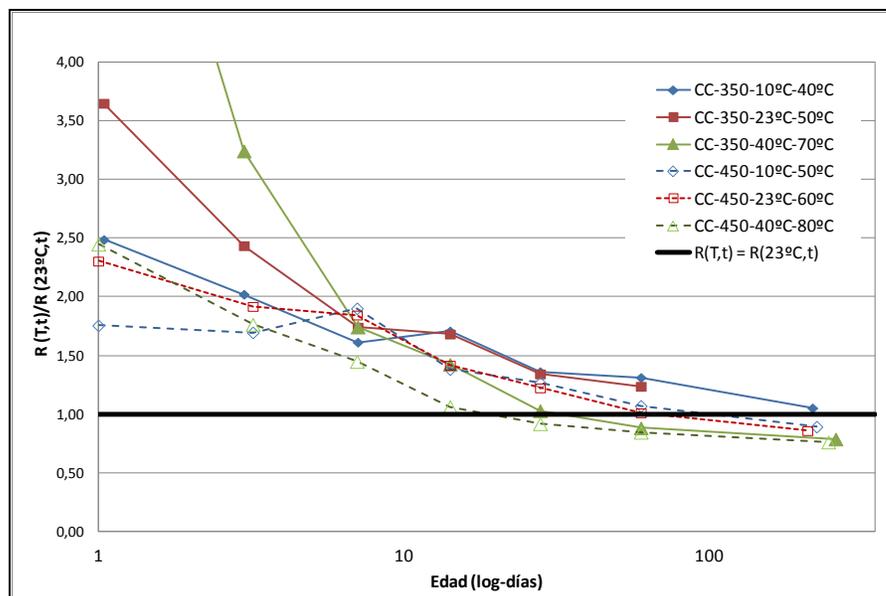


Figura 23: Evolución de la razón entre la resistencia a compresión del hormigón sometido a distintos ciclos térmicos y del hormigón curado a temperatura estándar (23°C) para cementos CC.

Para todos los hormigones se observó una disminución del cociente entre la resistencia medida en los hormigones sometidos a ciclo térmico, con respecto a la resistencia de los hormigones con curado estándar. Se observó también diferente sensibilidad a la temperatura a temprana edad para hormigones fabricados con distintos cementos. En el caso de los cementos AR presentaron menor sensibilidad a la temperatura y se puede explicar debido a la alta finura de este tipo de cemento. La mayor finura haría que aumente la resistencia a temprana edad pero los productos de hidratación se ven afectados por las altas temperaturas, generando una menor ganancia de resistencia a temprana edad en comparación con un curado estándar.

Se comprueba lo reportado en la literatura respecto a una disminución de la velocidad de ganancia de resistencia a compresión del hormigón en el largo plazo al tener un curado inicial a mayor temperatura respecto al caso de curado estándar (Carino, 1991). Para edades superiores a 10 días, se observa una disminución a tasa permanente del cociente de resistencia a compresión en hormigones curados a altas temperaturas y hormigones con curado estándar. Hormigones curados a muy alta temperatura (95 °C), llegaron a valores de resistencia a compresión de sólo un 75% de la resistencia de hormigones curados a 23 °C. A temprana edad, a mayor temperatura (mayor madurez) se obtienen mejores resistencias, ya que se aumenta la velocidad de hidratación del cemento. Sin embargo, desde una cierta edad (aprox. 14 días), este efecto de ganancia se pierde por la peor calidad de los productos de hidratación lo que hace que la resistencia disminuya con respecto a la medida en condiciones estándar.

Para los hormigones con cemento AR (15% de puzolana) si bien la razón a temprana edad es mayor que uno, su magnitud no es tan significativamente mayor como en los casos de cementos Portland. Esto se debería a que el aumento de la resistencia a temprana edad debido a la temperatura sobre la velocidad de hidratación del cemento. Este efecto sería menor a causa del aumento de la velocidad de hidratación por la mayor finura del cemento.

Para ambos casos de temperaturas extremas (80 °C y 90 °C) se produce una disminución de resistencia a largo plazo con respecto a 23°C. Las resistencias medidas llegan a ser entre 65 y 80% la resistencia de un hormigón curado a 23 °C a 210 días de edad.

En el caso de cementos CC (con 35% de puzolana natural), se observa que sólo para los casos de temperatura inicial 40 °C (y temperaturas máximas de 70 y 80 °C) existe una disminución de la resistencia con respecto a 23°C desde los 60 días y sería del orden de 10%. El dato fuera de rango corresponde a un valor cercano a 7 y se explica debido a la alta sensibilidad de este tipo de cemento al ser sometido a muy altas temperaturas a temprana edad. Comparado con los otros 2 cementos la resistencia del hormigón con CC, que contiene 35% de puzolanas naturales presenta una resistencia considerablemente mayor a edades tempranas. Esto se explicaría porque la alta temperatura inicial aumenta la reacción del clínquer, que a su vez es el activador de la puzolana.

4.5.3 Efecto de la Temperatura Inicial y Temperatura Máxima en la Resistencia a Compresión del Hormigón

Los resultados presentados en las secciones anteriores muestran el fuerte impacto que tiene, no sólo de la temperatura inicial, sino también de la temperatura máxima experimentada por los hormigones sometidos a ciclos térmicos. En la Figura 24 se muestra el efecto de la temperatura máxima del hormigón en el aumento relativo de resistencia a compresión del hormigón a 28 y 60 días separados por tipo de cemento.

Se muestra además una línea de tendencia de los datos en función de la temperatura. Se observa que para todos los tipos de cemento existe una menor velocidad de ganancia de resistencia a muy altas temperaturas (razón menor que 1 o disminución del cociente).

Si bien a 28 días no es tan marcado dicha disminución para cementos CC, a muy largo plazo (60 días), sí se presenta una disminución con respecto a un curado estándar.

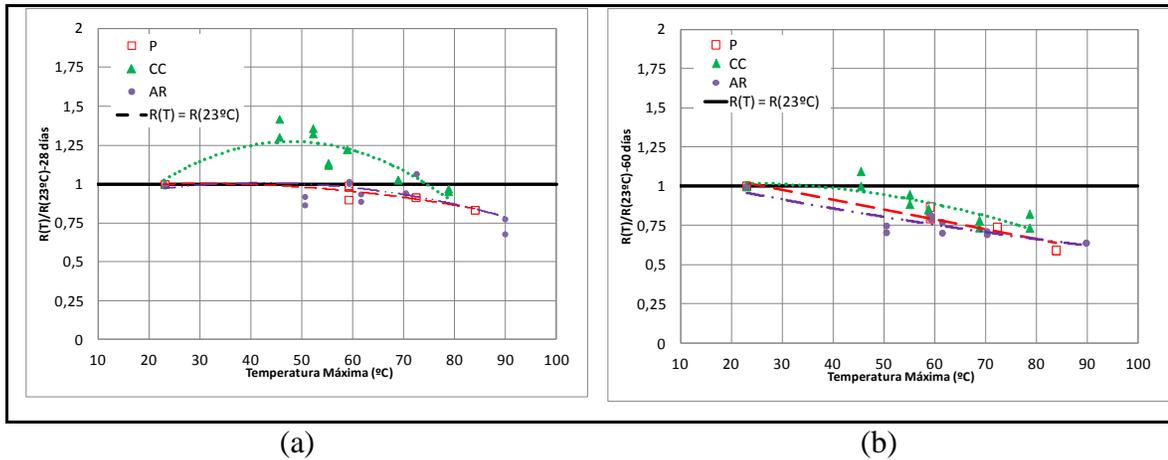


Figura 24: Efecto de la temperatura máxima del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a 28 y 60 días separados por tipo de cemento.

En las Figuras 25 a 27 se compara la misma razón descrita anteriormente a temprana edad (1 o 3 días), 28 días y 210 días según tipo de cemento y en función de la temperatura inicial y temperatura máxima.

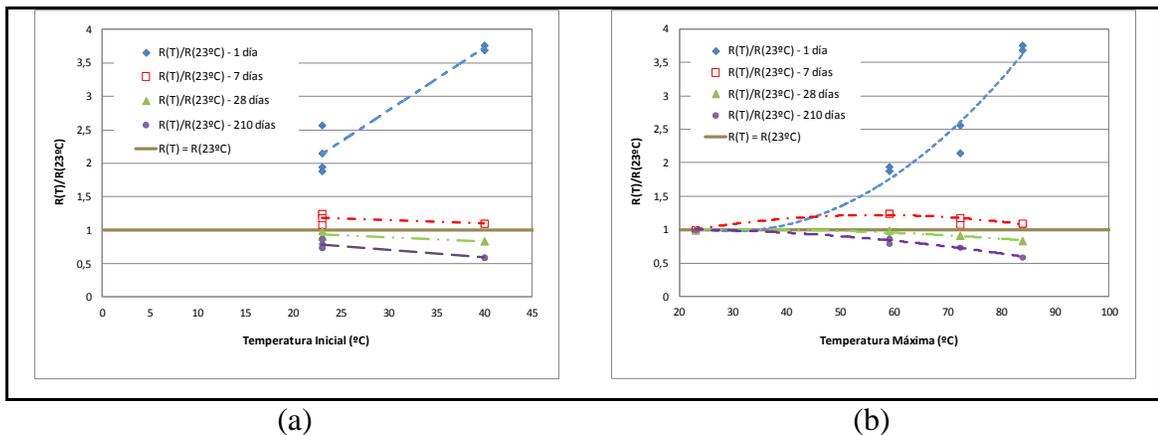
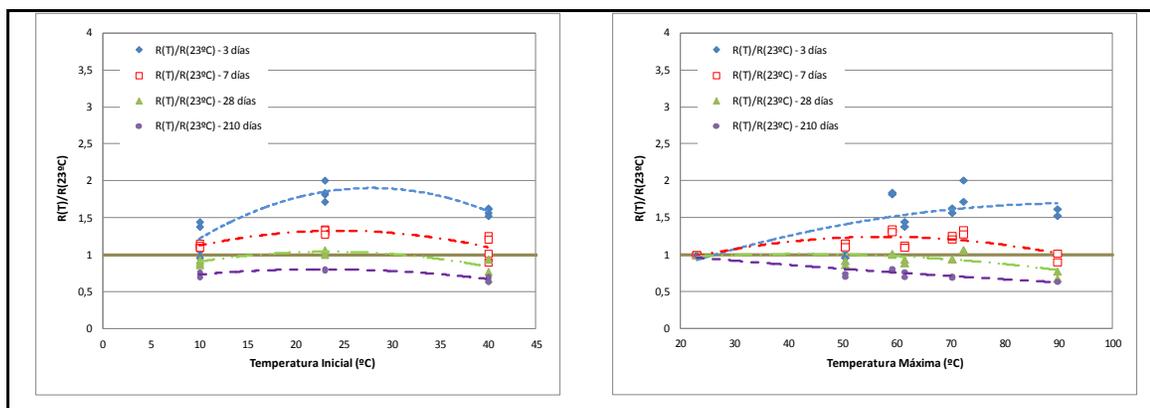


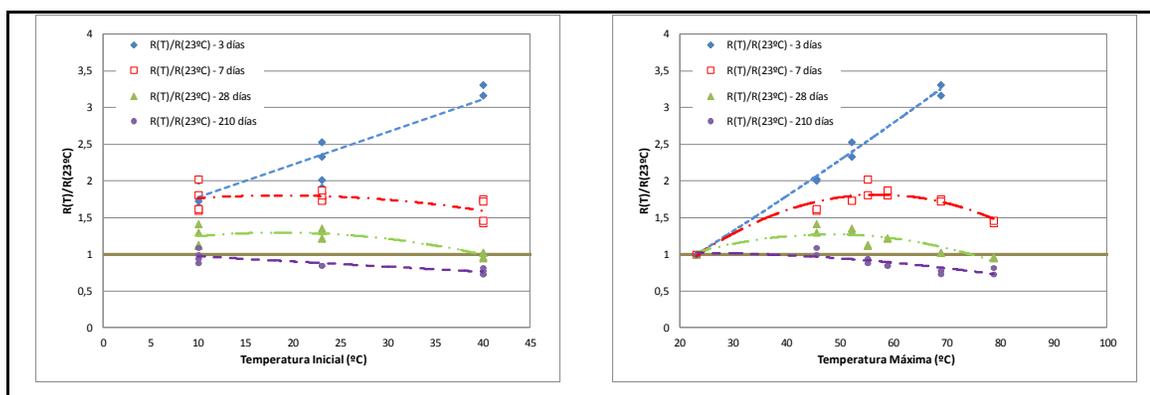
Figura 25: Efecto de la temperatura inicial (a) y temperatura máxima (b) del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a diferentes edades para hormigones con cemento Portland.



(a)

(b)

Figura 26: Efecto de la temperatura inicial (a) y temperatura máxima (b) del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a diferentes edades para hormigones con cemento Portland Pozolánico Alta Resistencia.



(a)

(b)

Figura 27: Efecto de la temperatura inicial (a) y temperatura máxima (b) del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a diferentes edades para hormigones con cemento Pozolánico Corriente.

Para los hormigones fabricados con cemento Portland (0% de puzolana natural) a temperaturas cercanas a los 60 °C ya se observa una disminución importante de resistencia con respecto a un curado estándar a 28 días.

Se observa que para hormigones fabricados con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% de puzolana natural) la temperatura óptima de colocación del hormigón es de 23 °C para todas las edades, ya que tanto a temperaturas iniciales de 10 °C como de 40 °C se presenta una disminución de resistencia en comparación a la alcanzada a curado estándar. El efecto de la temperatura máxima en resistencia a 28 días se ve fuertemente marcada, llegando a valores cercanos a sólo un 50% de la resistencia a un curado isotérmico estándar. A temperatura máxima de 70 °C ya se observa un deterioro en la resistencia a 28 días.

Para el caso de hormigones fabricados con cementos CC no se observa una disminución de ganancia de resistencia hasta 28 días. A temperaturas máximas desde 75 °C se aprecia una disminución de resistencia a partir de dicha edad.

Para las especificaciones técnicas es común considerar el hormigón en terreno no gana resistencia a partir del día 28, por lo que se especifica como resistencia máxima aquella obtenida a ese día bajo condiciones de curado estandarizadas. En las Figuras 28 a 30 se presenta el cociente entre la resistencia medida a cierta edad t (en función del tipo de cemento y temperatura máxima) y la resistencia medida a 28 días en condiciones de curado estándar.

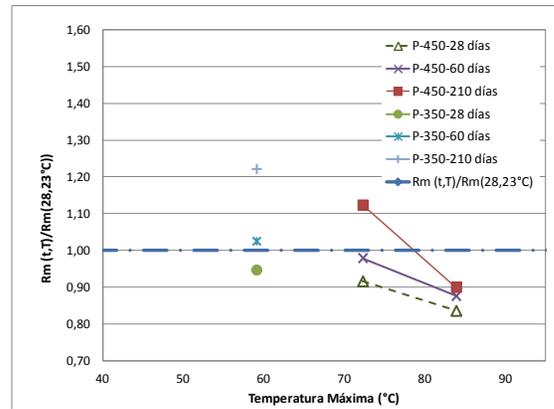


Figura 28: Efecto de la temperatura máxima en el cociente entre la resistencia medida a 28, 60 y 210 días; y la resistencia a 28 días del hormigón bajo curado estándar para cemento Portland y dosis de 350 y 450 kg/m³.

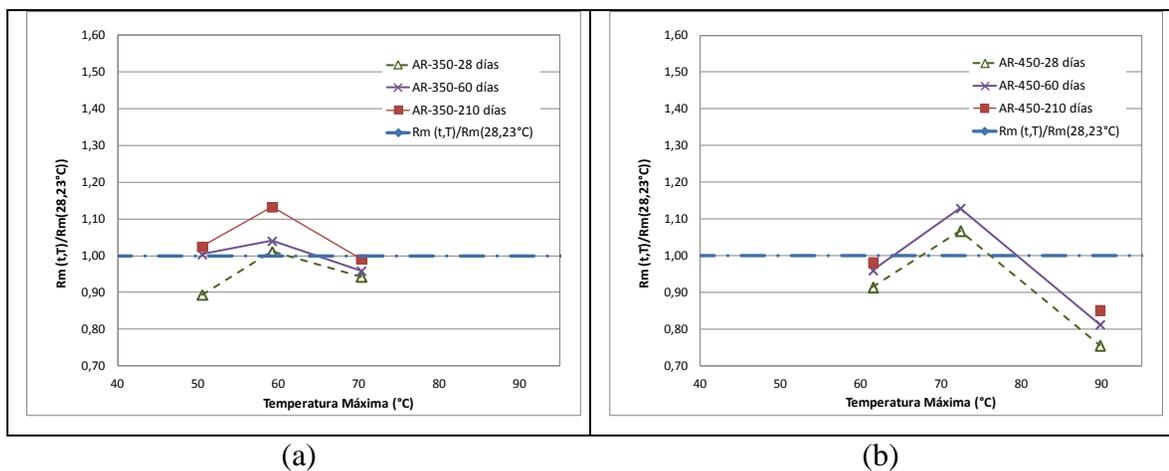


Figura 29: Efecto de la temperatura máxima en el cociente entre la resistencia medida a 28, 60 y 210 días; y la resistencia a 28 días del hormigón bajo curado estándar para cemento Alta Resistencia y dosis de 350 (a) y 450 kg/m³(b).

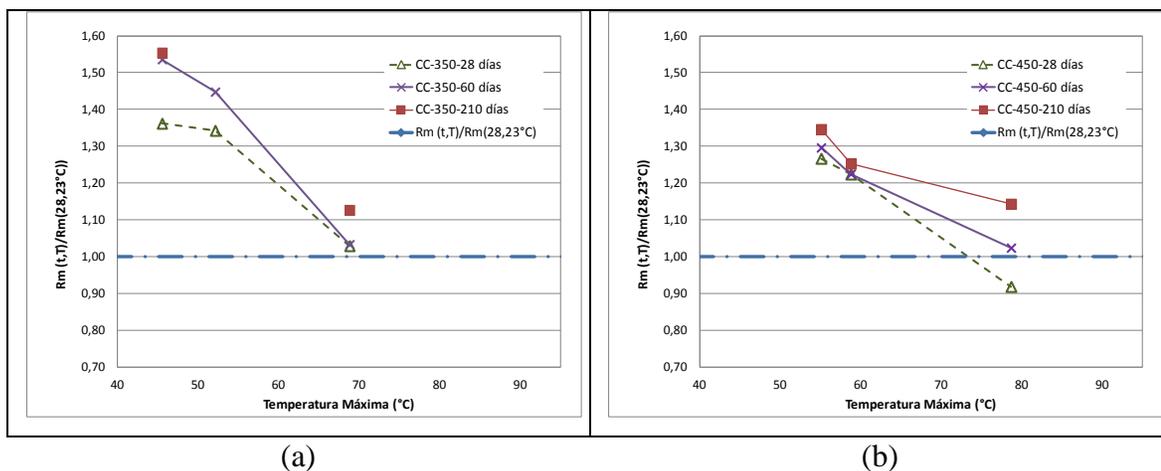


Figura 30: Efecto de la temperatura máxima en el cuociente entre la resistencia medida a 28, 60 y 210 días; y la resistencia a 28 días del hormigón bajo curado estándar para cemento Corriente y dosis de 350 (a) y 450 kg/m³(b).

En las Figuras 28 a 30 se observa que para los cementos Portland, en la mayoría de los casos, la resistencia medida en los hormigones sometidos a ciclos térmicos estuvo por debajo de la resistencia a 28 días con curado normalizado. Esto reafirma lo no conservador que significa usar este tipo de cemento para hormigones sometidos a altas temperaturas. En el caso del cemento Alta Resistencia se observa un *peak* de “temperatura óptima” que bordea los 60-70 $^\circ\text{C}$. A mayores temperaturas, la resistencia es inferior a la resistencia de especificación (cuociente menor a 1). Esto último no pasa al utilizar cemento Corriente ya que en sólo un caso, al llegar cerca de 80 $^\circ\text{C}$, no se alcanzó la resistencia de curado estándar a 28 días.

4.6 Conclusiones y Recomendaciones

Las altas temperaturas que alcanzan en la actualidad los hormigones estructurales masivos, han despertado la inquietud respecto a su efecto en la magnitud de la resistencia a compresión a largo plazo. En esta investigación se buscó aportar luz a este fenómeno evaluándose el comportamiento de hormigones fabricados con distintos tipos

y dosis de cemento y sometidos a ciclos térmicos que pretenden simular condiciones de terreno.

Las principales conclusiones que se desprenden del estudio son:

- En general a largo plazo (desde 60 días), para todos los hormigones fabricados con distintos tipos de cemento, se observó una disminución de resistencia en comparación con un curado estándar.
- Para hormigones fabricados con cemento Portland y Portland Puzolánico Alta Resistencia se observa que la resistencia obtenida con curado estándar es mayor a la resistencia de los hormigones bajo ciclo térmico hasta los 14 días. En el caso de hormigones fabricados con cemento Puzolánico Corriente la resistencia de los hormigones bajo ciclo térmico fue mayor a la de curado estándar hasta 60 días.
- Los hormigones fabricados con cementos Portland Puzolánico Alta resistencia presentaron menor sensibilidad a la temperatura a temprana edad. Este fenómeno se explicaría debido a la alta finura de estos cementos, la alta temperatura inicial experimentada y a la rápida hidratación y mala calidad de productos de hidratación formados.
- Para aquellos hormigones fabricados con cemento Portland y Portland Puzolánico Alta Resistencia y sometidos a ciclos térmicos, la resistencia es menor que la resistencia a un curado estándar a partir de los 14 días (en promedio).
- Para aquellos hormigones fabricados con 35% de puzolana natural el efecto de la disminución de ganancia de resistencia a compresión a 28 días se ve influenciado a partir de temperaturas cercanas a los 75 °C. En el caso de usar 15% de puzolanas naturales la disminución se refleja desde los 70 °C y para los hormigones con 0% de puzolanas naturales a partir de los 55 °C.
- Se presentan curvas de tendencia para diferentes edades y tipos de cemento de manera de aproximar la razón entre resistencia experimentada en terreno por un hormigón masivo y la resistencia a curado estándar que se usa en las

especificaciones de diseño estructural. Esta razón podría ser un buen indicador de disminución de ganancia si se conoce la temperatura máxima experimentada en terreno por la estructura de hormigón.

- Se recomienda no sólo controlar la temperatura máxima del hormigón para evitar agrietamiento por gradiente térmico, sino que también para evaluar una posible disminución de resistencia en comparación a un curado estándar, ya que es en base a estas últimas se realizan las especificaciones técnicas.

5. EFECTO DE LAS ALTAS TEMPERATURAS DEL HORMIGÓN EN LA CALIDAD DE LA PREDICCIÓN DE RESISTENCIA MEDIANTE MADUREZ

5.1 Resumen

El método de madurez ha sido ampliamente estudiado y aplicado en la predicción de la resistencia del hormigón en obras de construcción de diferente índole: desde pavimentos a elementos masivos. Este estudio se enfoca en estos últimos y en la problemática relacionada con las elevadas temperaturas que se pueden generar al contar con altas dosis de cementos y con baja capacidad de disipación de calor. El método ASTM C 1074-04, que da directrices para el uso del método de madurez, no toma en consideración algunas limitaciones de temperatura y resistencia que podrían tener estos elementos. Esta problemática se estudia en la presente investigación, utilizándose cementos con puzolanas naturales, en contraste con el uso de hormigón con cemento Portland. Como principal objetivo se evalúa la exactitud del método ASTM para predecir resistencia a compresión a temprana edad y largo plazo. Se reproducen en laboratorio diferentes ciclos térmicos, determinados en función del calor de hidratación semi-adiabático Langavant. Al aplicar la metodología ASTM para el cálculo de la Temperatura Datum (T_0) y Energía de Activación (E_a), se obtienen en la mayoría de los casos valores entre -6,2 y 5,9 °C para T_0 y 25.000 y 47.000 J/mol para E_a . Al evaluar la exactitud de la predicción se concluye que el método no es del todo adecuado para este tipo de hormigones, ya que tiene en promedio un 25% de error de sobreestimación y a temperaturas de 80 a 90 °C pueden sobreestimar hasta un 50% de resistencia a 28 días. Al utilizar la función de tiempo equivalente lineal de Saul-Nurse, el método entrega mejores resultados y si además se usa $T_0 = -10$ °C, el error promedio es de un 20% y sería conservador en estimar la resistencia a compresión hasta 7 días en la mayoría de los casos estudiados. Es por esto que se sugiere usar esa combinación ya que además es simple de aplicar. También se recomienda el uso de una ecuación tipo hiperbólica para evaluar el tiempo equivalente, en cualquier tipo de cemento, ya que representa de mejor

forma el efecto de “resistencia techo” presente en los hormigones sometidos a ciclos térmicos. En el caso de querer obtener incluso mejores estimaciones, se propone un método de ajuste por mínimos cuadrados para el cálculo de T_0 y E_a , basado en la resistencia a compresión de cubos de mortero, de manera de minimizar el error entre la estimación y la medición de resistencias. Con este método y utilizando una ecuación que represente una “resistencia techo” a largo plazo, se puede disminuir el error promedio hasta un 11% para hormigones sometidos a altas temperaturas.

Palabras clave: madurez, energía de activación, temperatura datum, hormigones masivos, puzolanas naturales, resistencia, temperatura máxima.

5.2 Introducción

El método de madurez se basa en el concepto de que la resistencia de una mezcla de hormigón que ha sido debidamente colocada, compactada y curada, es función de su edad y temperatura (Carino, 1991). Por ende, conociendo la edad y temperatura de un hormigón, su resistencia puede ser estimada en terreno.

Si bien este método ha sido ampliamente usado debido a que permite estimar de un modo simple la resistencia de hormigones en terreno (Constantino y Carrasquillo, 2000; ASTM, 2004), ésta presenta algunas limitaciones, siendo una de las principales que no considera efectos negativos de la aplicación o exposición del hormigón a altas temperaturas a edades tempranas.

Para cementos Portland, mayormente reportados en la literatura, se puede observar un “efecto de cruce” entre las resistencias obtenidas a diferentes temperaturas de curado (Verbeck y Helmuth, 1968; Carino, 1991; Brooks *et al.*, 2007). Las mezclas de hormigón curadas a temperaturas mayores, tienen una alta resistencia en el corto plazo, pero menor resistencia al largo plazo en comparación con mezclas curadas a menor temperatura. Incluso, antes de las 40 horas para un curado a 50 °C se puede observar un efecto de cruce con una mezcla curada a 35 °C, llegando inclusive a ser un 17% menor a las resistencias de probetas curadas a 20 °C (Kjellsen y Detwiler, 1993). Este efecto es visible sólo por su consecuencia en la resistencia, pues independiente de la temperatura de curado, siempre se logrará el mismo nivel de hidratación (Schindler, 2004).

Una explicación cualitativa de este “efecto de cruce” fue presentada por Verbeck y Helmuth (1968). Ellos sugirieron que altas temperaturas tienen como consecuencia un aumento proporcional de la tasa (o velocidad) de hidratación y de esta manera, a temprana edad, los productos de hidratación no resultan tan uniformemente distribuidos como sí ocurre a bajas temperaturas con una baja tasa de hidratación, por lo tanto no presentan una resistencia adecuada. Este efecto fue también descrito por Byfors (1980),

indicando que a temperaturas entre 30 y 40 °C podría presentarse una reducción importante de ganancia de resistencia y que el método de madurez no es capaz de considerar la temperatura a temprana edad. Por esto el método sería capaz sólo de estimar hasta una cierta “madurez máxima”. Otros estudios han determinado que el método de madurez trabaja satisfactoriamente hasta alrededor del 40 o 50% de la resistencia a 28 días del hormigón curado a 20 °C (Emborg, 1989; Kjellsen y Detwiler, 1993; Jonasson *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 1998).

Es conocido que la reducción de resistencia a largo plazo debido a curados a altas temperaturas está fuertemente influenciada por el tipo y cantidad de materiales cementicios suplementarios (Schindler, 2004; Brooks *et al.*, 2007). Este efecto es más marcado en las mezclas que contienen sólo cemento Portland (ver Figura 31).

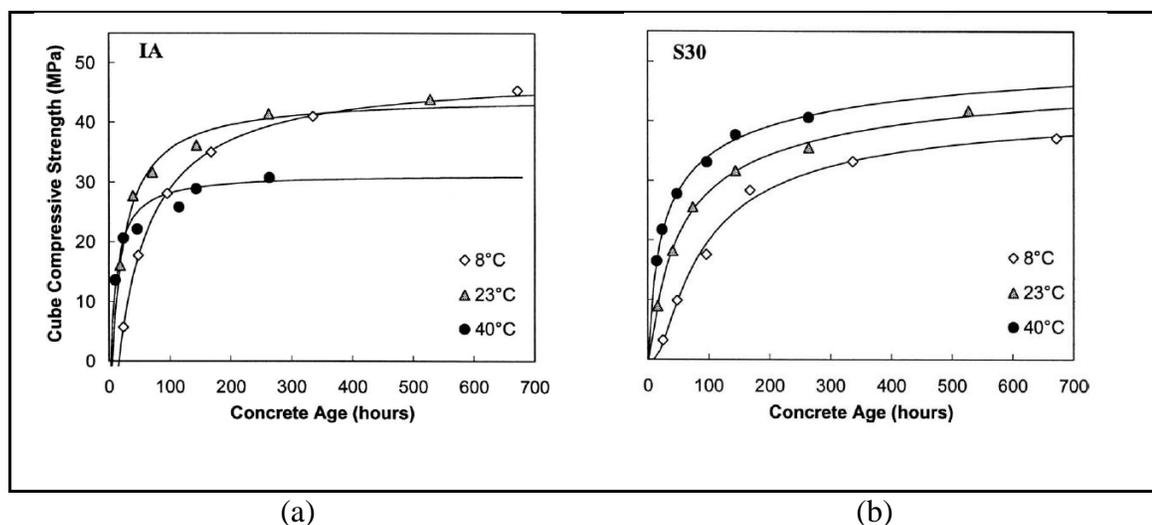


Figura 31: Resultados de ensayos de compresión para cubos de mortero curados a diferentes temperaturas. En la figura (a) se observa una mezcla con cemento Portland Tipo I, y en la figura (b) una mezcla con 70% Cemento Tipo I y 30% de reemplazo de escoria de alto horno (*GGBF slag*) (Brooks *et al.*, 2007).

Videla y Parada (1988) en su investigación sobre hormigones fabricados con cementos con puzolanas naturales, concluyen que los factores de conversión de edad del método de madurez, no varían de acuerdo al perfil de temperaturas de curado utilizado ni a la temperatura máxima alcanzada para estos cementos. Incluso, la máxima resistencia de una misma mezcla, se obtendría a mayores temperaturas de curado, tanto a corto como a largo plazo (Videla *et al.*, 1995).

En esta investigación se calculan, mediante el método ASTM, las constantes necesarias para la estimación de resistencia mediante madurez. Además se evalúa dicho método en hormigones masivos reproducidos en laboratorio con diferentes tipos y dosis de cemento, con y sin puzolanas naturales, así como también para diferentes temperaturas de colocación. Además se hace uso de aditivos, para evaluar su efecto, tanto sobre la ganancia de resistencia, como sobre la estimación de resistencia usando el método de madurez.

5.2.1 Método de Madurez

Saul introdujo el concepto de “madurez” basado en la relación observada entre temperaturas de curado al vapor, tiempo de curado y resistencia alcanzada por el hormigón. Sugirió así que esa madurez podría ser calculada con respecto a una temperatura (T_0), la que correspondería a la temperatura a la cual el hormigón no gana resistencia (Saul, 1951).

De expresiones que reflejan el mismo principio, nace el concepto de tiempo equivalente (t_e), definido como el número de días u horas de curado a una temperatura de referencia (T_r) requerida para producir una madurez igual a la alcanzada en un período de curado (t_i) a otra temperatura (T_i):

$$t_e = \frac{k_{T_i}}{k_{T_r}} \cdot t_i = \gamma(T_i) \cdot t_i \quad (5.1)$$

Donde k_{T_i} es la constante de velocidad de reacción a la temperatura de curado T_i y γ (T_i)- t_i es el factor de conversión de edad.

En 1987, ASTM desarrolló un procedimiento normalizado (ASTM C 1074), para aplicar el método de madurez al estimar resistencia del hormigón en terreno. En él se sugiere utilizar los conceptos de tiempo equivalente según Saul (1951) donde k_{T_i} es una función lineal de la temperatura (Ecuación 5.2) o Freiesleben Hansen y Pedersen (1977), donde dicha función sigue la ley de reacciones químicas de Arrhenius (Ecuación 5.3) que relaciona exponencialmente la temperatura con la hidratación y la resistencia.

$$t_e(T_r) = \sum_0^t \frac{(T_i - T_0)}{(T_r - T_0)} \cdot \Delta t \quad (5.2)$$

$$t_e(T_r) = \sum_0^t \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T_i} \right) \right] \cdot \Delta t \quad (5.3)$$

Donde t_e es el tiempo equivalente a una temperatura de referencia T_r (h); T_r es la temperatura de referencia (°C); Δt es el intervalo de tiempo (h); T_i es la temperatura promedio del hormigón durante el intervalo de tiempo Δt (°C); T_0 es la Temperatura Datum (°C); E_a es la energía de activación (J/mol) y R es la constante universal de los gases (8,314 J/mol/K).

5.2.2 Relación Resistencia-Madurez

Varias ecuaciones se pueden utilizar para caracterizar la relación Resistencia-Tiempo (o Resistencia-Madurez) $R(t)$ conociendo el tiempo equivalente según lo detallado en 5.2.1. Entre ellas se destaca la Ecuación (5.4) Lineal-Logarítmica (Plowman, 1956), (5.5)

Hiperbólica (Chin, 1971; Carino y Lew, 1983) y (5.6) Exponencial (Freiesleben-Hansen y Pedersen, 1985), las cuales se describen a continuación:

$$R(t) = a + b \cdot \log(t) \quad (5.4)$$

Donde a y b son constantes que dependen del tipo de cemento y razón Agua/Cemento y t es la edad (h).

$$R(t) = R_u \cdot \frac{K \cdot (t - t_0)}{1 + K \cdot (t - t_0)} \quad (5.5)$$

Donde R_u es la resistencia última (MPa); K es la constante de velocidad (h^{-1}); t es la edad (h) y t_0 es la edad a la que comienza el desarrollo de resistencia (h).

$$R(t) = R_u \cdot \exp\left(-\left[\frac{\tau}{t}\right]^\beta\right) \quad (5.6)$$

Donde R_u es la resistencia última (MPa); τ = Constante de tiempo; t es la edad (h) y β es la constante de forma.

Las ecuaciones (5.5) y (5.6) tienen la característica de poseer una resistencia “techo” o última (máxima resistencia posible en el tiempo). En cambio, la ecuación (5.4) no presenta un techo, y a medida que aumenta la edad, aumenta la resistencia, claro que en menor grado en comparación con la ganancia a temprana edad.

5.3 Importancia de la Investigación

Predecir la resistencia del hormigón en terreno ha sido de gran interés para procesos de control de calidad y para optimizar los procesos constructivos. Operaciones como el

retiro de moldajes, retiro de protección al frío o inicio de carga de estructuras pueden ser estimadas de buena manera mediante el método de madurez.

Este método, si bien está estandarizado en ASTM C 1074 para el cálculo de los parámetros E_a y T_0 , diferentes valores se recomiendan para estos últimos en la literatura (McIntosh, 1949; Saul, 1951; Freiesleben-Hansen y Pedersen, 1977; Carino y Tank, 1992; Kjellsen y Detwiler, 1993; Jonasson *et al.*, 1995; Schindler, 2004) los cuales van desde -10,5 hasta 0 °C para T_0 y desde 30.000 a 55.000 J/mol para E_a e incluso se han propuesto modelos para determinar los valores de E_a según la composición química del cemento y la evolución de hidratación (Riding *et al.*, 2011; Schindler y Folliard, 2005). Para hormigones fabricados con cementos con puzolanas naturales, es común usar la expresión de Saul-Nurse con valores de $T_0 = -10$ °C (Videla *et al.*, 1995; Videla y Aguilar, 1998), sin embargo, no se ha reportado su exactitud para predecir resistencia a compresión de hormigones que experimentan muy altas temperaturas, como en el caso de hormigones masivos.

En esta investigación se aplica el método ASTM de madurez para el cálculo de T_0 y E_a para hormigones fabricados con cementos con puzolanas naturales y se mide su exactitud para predecir resistencia a compresión en hormigones masivos reproducidos bajo condiciones de laboratorio. Se evaluaron diferentes dosis de cemento, contenidos de puzolana, temperaturas de colocación y dosis de aditivo retardador de fraguado.

5.4 Programa de Investigación

Se fabricaron ocho mezclas para evaluar el método ASTM y se utilizaron cementos chilenos con diferentes contenidos de puzolanas naturales (PN): Puzolánico Corriente (35% de PN), Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% de PN), y Portland (0% de PN). A la vez se evaluaron diferentes contenidos de cemento y temperaturas de colocación. Las últimas variables se definieron para poder modificar el *peak* de

temperatura del hormigón sometido a ciclos térmicos simulados. Para determinar la magnitud y evolución de la resistencia de estos hormigones y la estimación por madurez, se procedió a realizar 3 tipos de ensayos: (a) confección de cubos de mortero curados a 3 temperaturas diferentes y posterior ensayos a compresión según ASTM C 1074, (b) confección de cilindros de hormigón, curado estándar (23 °C) y ensayos a compresión y (c) confección de cilindros de hormigón y reproducción en laboratorio de ciclos térmicos que estos experimentaría en un elemento de hormigón masivo en terreno.

5.4.1 Materiales Utilizados

5.4.1.1 Áridos

Se utilizaron 2 tipos de áridos: gravilla chancada de tamaño máximo 20 mm y arena gruesa chancada en proporción 50% cada uno. Las propiedades físicas y granulométricas de los áridos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Propiedades físicas y granulométricas de los áridos.

Propiedad		Gravilla	Arena Gruesa
<i>Forma del árido</i>		Chancada	Chancada
<i>Densidad Real SSS (kg/m³)</i>		2.699	2690
<i>Densidad Real Seca (kg/m³)</i>		2.669	2657
<i>Densidad Neta (kg/m³)</i>		2.752	2747
<i>Densidad Aparente Suelta Seca (kg/m³)</i>		1.653	1.722
<i>Absorción (%)</i>		1,13	1,25
<i>Huecos (%)</i>		39	36
ASTM	Tamiz (mm)	% Pasa	% Pasa
3"	80	100	100
2 1/2"	*63	100	100
2"	*50	100	100
1 1/2"	40	100	100
1"	*25	98	100
3/4"	20	89	100
1/2"	*12,5	19	100
3/8"	10	2	100
# 4	5	0	89

# 8	2,5	0	67
# 16	1,25	0	53
# 30	0,63	0	37
# 50	0,315	0	12
# 100	0,16	0	0

5.4.1.2 Cementos

A los diferentes cementos utilizados se les realizaron ensayos para determinar sus propiedades físicas, mecánicas, térmicas y químicas (según ASTM C 109, ASTM C 191, ASTM C 188). El calor de hidratación de los cementos se determinó mediante el ensayo semi-adiabático Langavant (norma francesa NFP 15-436). Las propiedades se muestran en la Tabla 8 y en la Tabla 9.

Tabla 8: Propiedades físicas y mecánicas de los cementos utilizados en la investigación.

Propiedad	Unidad	Cemento		
		Portland (0% PN)	Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% PN)	Puzolánico Corriente (35% PN)
<i>Tiempo de fraguado inicial</i>	<i>min</i>	150	160	190
<i>Tiempo de fraguado final</i>	<i>min</i>	220	240	260
<i>Peso específico</i>	-	3,163	2,931	2,823
<i>Finura Blaine</i>	<i>cm²/gr</i>	3.930	4.840	4.452
<i>Resistencia a Compresión</i>				
<i>1 día</i>	<i>MPa</i>	18,7	17,2	8,6
<i>3 días</i>	<i>MPa</i>	35,5	32,7	18,6
<i>7 días</i>	<i>MPa</i>	48,5	41,3	25,7
<i>28 días</i>	<i>MPa</i>	63,0	51,9	38,6
<i>Resistencia a Tracción</i>				
<i>1 días</i>	<i>MPa</i>	4,3	3,6	2,1
<i>3 días</i>	<i>MPa</i>	5,8	5,6	3,6
<i>7 días</i>	<i>MPa</i>	7,5	6,4	4,8
<i>28 días</i>	<i>MPa</i>	8,5	7,9	7,0
<i>Tiempo de Temperatura máxima</i>	<i>hrs</i>	16	18	22

Tabla 9: Propiedades químicas de los cementos utilizados (Bustos, 2011; Paul, 2010)

	Portland (0% PN)	Cemento Puzolánico Corriente (35% PN)
<i>SiO₂ (%)</i>	19,4	33,6
<i>CaO (%)</i>	63,3	39,1
<i>Fe₂O₃ (%)</i>	2,9	1,6
<i>Al₂O₃ (%)</i>	6,4	4,0
<i>SO₃ (%)</i>	2,66	2,62
<i>MgO (%)</i>	0,8	1,1
<i>K₂O (%)</i>	-	-
<i>Na₂O (%)</i>	-	-
<i>TiO₂ (%)</i>	-	-
<i>P₂O₅ (%)</i>	-	-
<i>Pérdida por Ignición (%)</i>	1,4	3,4
<i>Residuo Insoluble (%)</i>	0,8	33,5
<i>Peso Específico</i>	3,15	2,82
<i>Superficie Específica (cm²/gr)</i>	4.697	4.876

Para el caso de cementos Alta Resistencia (cementos Tipo III según ASTM C 150) se observa una mayor finura Blaine, lo que genera una mayor resistencia a temprana edad.

En la Figura 32 se muestran las curvas ajustadas a los datos medidos de calor de hidratación. Como era de esperarse, el cemento Portland (70 cal/gr) tiene mayor calor de hidratación a 7 días que el cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia (64 cal/gr) y Puzolánico Corriente (50 cal/gr).

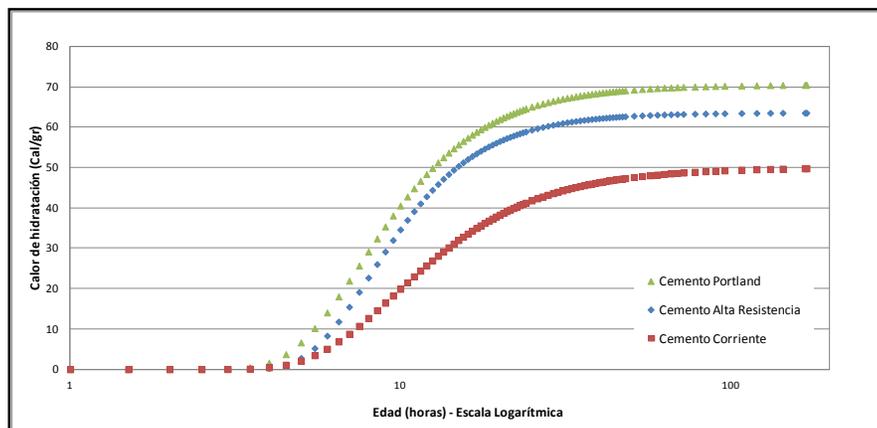


Figura 32: Calor de hidratación (cal/gr) para Cemento Portland (0% PN), Cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% PN) y Cemento Puzolánico Corriente (35% PN).

3.2 Diseño de Experimentos

Se utilizó cemento Portland Tipo I (ASTM C 150), Portland Tipo III (con 15% de puzolana natural clase N según ASTM C 618 (2005)) y Portland Tipo I con 35% de puzolana natural. Estos se clasifican según la norma NCh 148 en: Portland (P), Portland Puzolánico Alta Resistencia (AR) y Puzolánico Corriente (CC) respectivamente.

Para las dosis de cemento, se utilizaron dos: 350 kg/m^3 y 450 kg/m^3 . El objetivo de usar diferentes dosis de cemento fue lograr que los hormigones reproducidos en ciclos térmicos alcanzaran temperaturas máximas distintas. Estos niveles se encuentran dentro de los comúnmente utilizados para proyectos con hormigones masivos (Carrasquillo, 2009). Para modificar las condiciones de fraguado, se fabricaron hormigones sin aditivo (S/A) y con 0,3% de aditivo retardante (c/Re) con respecto al peso del cemento.

Para la temperatura inicial, se utilizaron tres niveles, simulando condiciones de enfriamiento de la mezcla u hormigonado en clima frío ($10 \text{ }^\circ\text{C}$), condiciones estándar ambientales ($23 \text{ }^\circ\text{C}$) y condiciones de clima caluroso ($40 \text{ }^\circ\text{C}$).

En las 8 mezclas se utilizó una razón agua/cemento (W/C) de 0,5. Este valor se definió dado que se ha demostrado que la razón W/C no influye en el factor de conversión de edad por madurez (Videla y Parada, 1988; Jonasson *et al.*, 1995). Además, en proyectos de hormigones masivos se utilizan comúnmente razones entre 0,45 y 0,55 (Mehta y Monteiro, 2006). Las 8 mezclas diferentes (y sus diferentes temperaturas de colocación se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Diseño de experimentos.

Tipo de Cemento	Portland Puzolánico Alta Resistencia				Puzolánico Corriente				Portland									
Dosis de Cemento (kg/m ³)	350				450				350				450					
Temperatura de Colocación (°C)	10	23	23	40	10	23	40		10	23	23	40	10	23	40	23	23	40
Aditivo Retardante	S/A	S/A	c/Re	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	c/Re	S/A						

El diseño de las mezclas se realizó por volumen absoluto y dado que se fijaron la razón W/C y la dosis de cemento, la dosificación se ajustó con áridos.

5.4.2 Metodología y Descripción de Ensayos

5.4.2.1 Ciclos Simulados en Hornos

La temperatura que puede alcanzar un hormigón se puede representar de manera aproximada por la Ecuación (5.7).

$$T_{m\acute{a}x} = T_c + \Delta T_i \quad (5.7)$$

Donde $T_{m\acute{a}x}$ es la temperatura máxima que puede alcanzar el hormigón, T_c es la temperatura de colocación del hormigón y ΔT_i es la temperatura generada por la hidratación que depende, entre otras cosas, del tipo y cantidad de material cementicio y de las condiciones de disipación de calor de la estructura de hormigón.

Para poder predecir la temperatura en hormigones masivos y en especial el valor de ΔT_i , existen varios métodos, entre ellos el Método Schmidt, el método gráfico de PCA (*Portland Cement Association*), el presentado en ACI 207.2R según contenido de cenizas volantes y la modelación con elementos finitos (Riding *et al.*, 2006; ACI207, 2007; Carrasquillo, 2009). Según Riding *et al.* (2006) el método Schmidt, es uno de los mejores métodos para poder estimar la temperatura en elementos de hormigón masivo, sobre todo si los datos para la modelación provienen de ensayos de calor de hidratación semi-adiabáticos. Es por esta razón que se utilizó éste método para predecir la temperatura máxima de cada mezcla y evolución de temperatura a temprana edad. Se consideró un muro de 2 mts de espesor. Además con el método se obtuvo una referencia de las condiciones de disipación de calor. En la Tabla 11 se muestran las temperaturas máximas calculadas y que se aplicarán a los hormigones.

Tabla 11: Temperaturas máximas calculadas para la simulación de ciclos térmicos en hormigón.

Tipo de Cemento	Portland Puzolánico Alta Resistencia								Puzolánico Corriente								Portland	
Dosis de Cemento (kg/m ³)	350				450				350				450				350	450
Temperatura de Colocación (°C)	10	23	23	40	10	23	40	10	23	23	40	10	23	40	23	23	40	
Aditivo Retardante	S/A	S/A	c/Re	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	c/Re	S/A							
Temperatura Máxima Calculada (°C)	50	60	60	80	60	70	90	40	50	50	70	50	60	80	60	75	95	

El comienzo del aumento fuerte de temperatura se aplicó aproximadamente 7 horas después de mezclado (cuando la mezcla comenzaba a fraguar) y el *peak* de temperatura fue impuesto entre las 20 y 27 horas después de fabricado el hormigón. Varios estudios y datos analizados de proyectos chilenos y reportados en la bibliografía (ACI 207, 2007; Fernández, 2009; Vega y Guarda, 2009), indican que el grado de protección que se le da a una estructura sometida a fuertes temperaturas, a modo de evitar agrietamiento por gradiente térmico, se realiza aislando la superficie del hormigón entre 3 y 7 días. En esta investigación se decidió mantener la temperatura máxima del hormigón por 3 días luego de alcanzado el *peak* de temperatura. Desde el día 4 al día 7 se aplicó un enfriamiento

gradual y uniforme (de entre 0,1 a 0,2 °C/h), de modo que a los 7 días se alcanzara un 85% de la temperatura máxima. Desde el día 7 se procedió a bajar la temperatura gradualmente en *coolers* térmicos (entre 0,1 y 2 °C/h) hasta llegar a 40 °C, temperatura que se mantuvo hasta el día 60. Esta última temperatura refleja de mejor manera las condiciones de disipación lenta que poseen los hormigones masivos estudiados en esta investigación y que resultaron de la estimación por el método Schmidt.

En la Figura 33 se muestra un esquema del ciclo de temperatura aplicado a los hormigones.

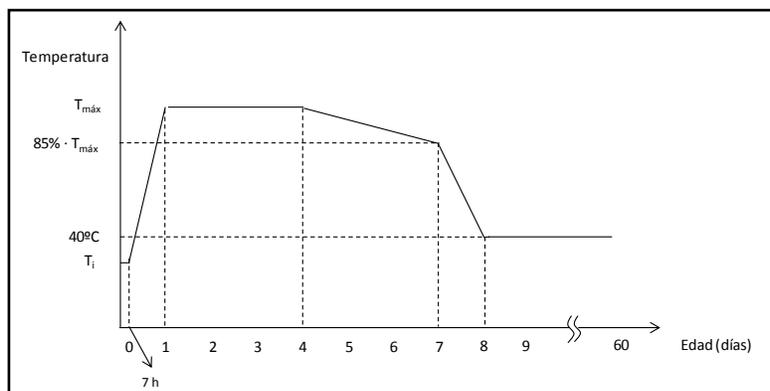


Figura 33: Diagrama de ciclo térmico aplicado a hormigones.

En la Figura 34 se pueden apreciar ejemplos de ciclo térmicos aplicados a una misma mezcla de hormigón pero con diferentes condiciones de temperatura inicial.

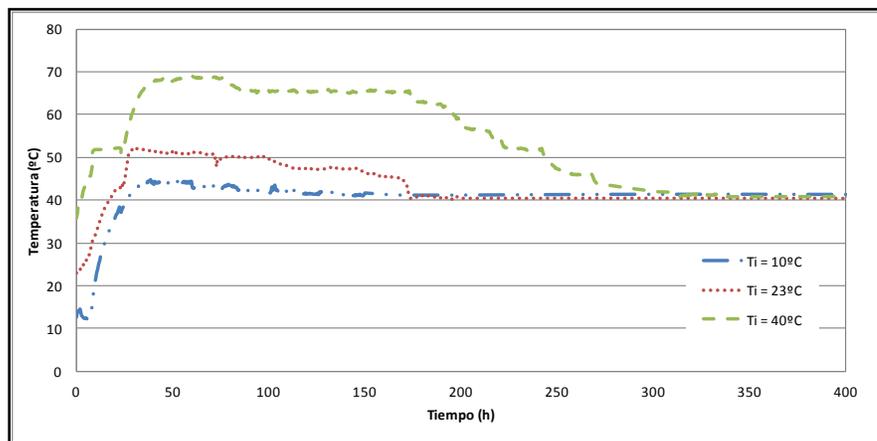


Figura 34: Evolución de temperatura medidas en probetas de la misma mezcla, pero sometidas a diferentes ciclos térmicos.

En el caso de temperaturas muy altas (sobre 60 °C) se impuso un enfriamiento más paulatino que en los otros casos, para así evitar un gradiente mayor a 20 °C en menos de 24 horas.

Las temperaturas máximas medidas en las probetas de hormigón estuvieron dentro de un rango $\pm 10\%$ con respecto al máximo calculado.

5.4.2.2 Descripción de Procedimiento de Ensayos

a) Confección y ensayo a compresión de cubos de mortero: Para determinar los valores de T_0 y E_a se confeccionaron 45 cubos de mortero de 50x50 mm y se curaron en agua saturada con cal (15 a 10 °C, 15 a 23 °C y 15 a 40 °C). La razón árido fino/cemento (en masa) fue la misma que la razón árido grueso/cemento en el hormigón. Además se utilizó la misma razón W/C y la misma cantidad de aditivos que los utilizados en las mezclas de hormigón. Las edades de ensayo a compresión se homogeneizaron para las diferentes temperaturas de curado de manera de realizar el ensayo a tiempos equivalentes similares (Brooks *et al.*, 2007). Se consideró a priori un valor de $T_0 = 10$ °C. Es así como para las condiciones de tiempo frío (10 °C) las edades de ensayo fueron 2, 5, 9, 16, 27 y 42 días; para condiciones de curado normalizado (23 °C) las edades

fueron 2, 3, 6, 10, 17 y 28 días; y para clima caluroso (40 °C) se ensayaron cubos de mortero a 1, 2, 4, 7, 11 y 17 días.

b) Confección y ensayo a compresión de hormigón curado a 23 °C: Para determinar la curva Resistencia-Tiempo Equivalente a temperatura estándar, se confeccionaron probetas cilíndricas de 100x200 mm. Se ensayaron 2 probetas a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. Adicionalmente se dejó una probeta para el registro de temperatura.

c) Confección y ensayo de hormigones sometidos a ciclos térmicos: De manera de evaluar el método de madurez, se confeccionaron probetas de acuerdo a las diferentes condiciones de temperatura inicial y se determinaron los ciclos térmicos a aplicar en cada mezcla de hormigón. Se procedió a curar probetas de 100x200 mm en piscinas con agua dentro de hornos para la regulación de temperatura. Se ensayaron 2 probetas a compresión a edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 60 días.

Todas las mezclas realizadas se confeccionaron con materiales acondicionados a las temperaturas iniciales correspondientes por al menos 24 h antes del mezclado. En el caso de que la resistencia a compresión a cierta edad se desviara en más de un 10% con respecto al promedio, se ensayó una tercera probeta.

5.5 Análisis de Resultados

5.5.1 Parámetros Método ASTM para Ecuaciones de Madurez

En las

Figura 35-a a

Figura 35-h se presentan los resultados a compresión de cubos de mortero para las diferentes mezclas estudiadas con cementos Portland (P), Alta Resistencia (AR) y Corriente (CC); con aditivo retardante (c/Re) y sin aditivo (S/A); y para diferentes dosis de cemento (350 y 450 kg/m³).

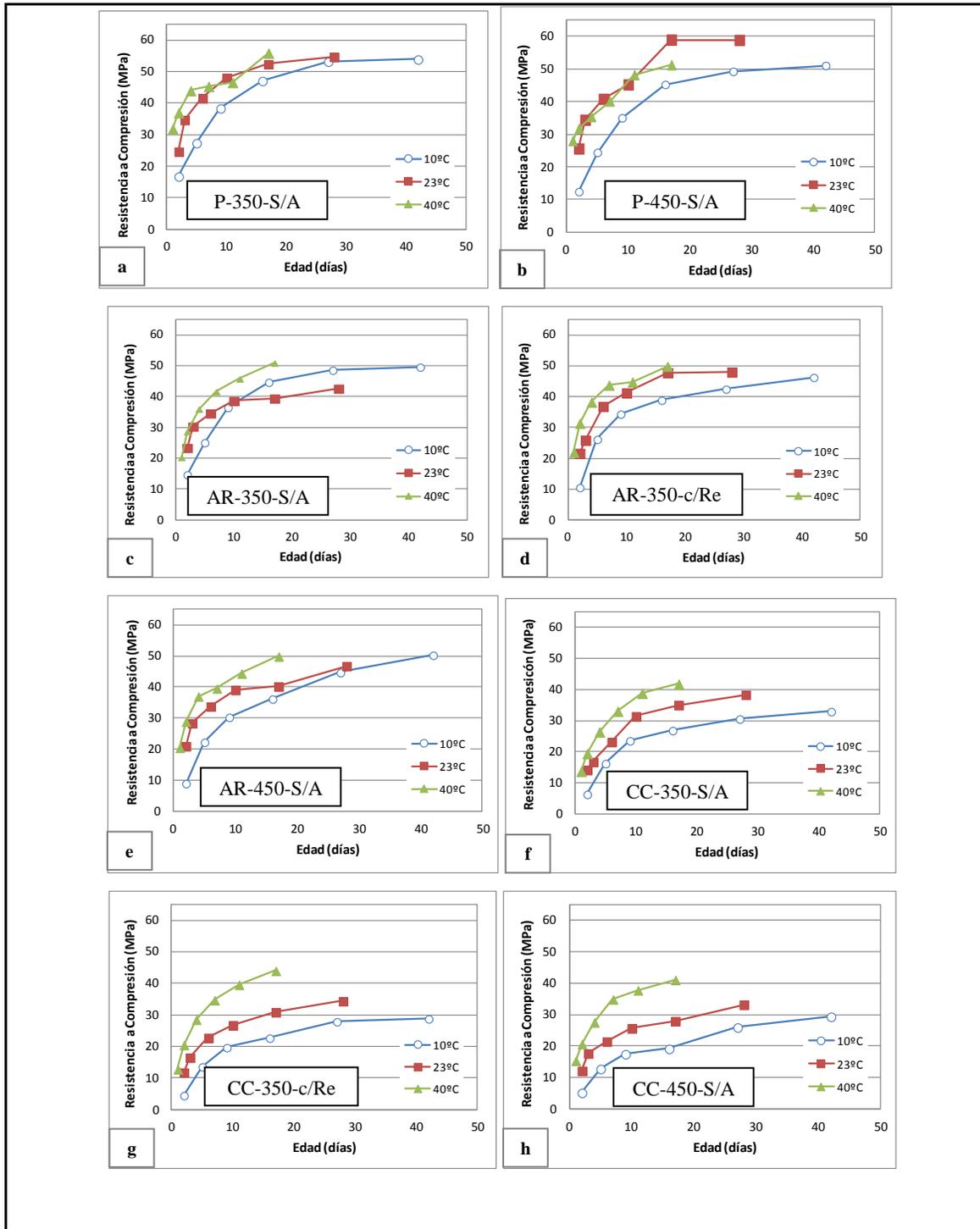


Figura 35: Evolución de resistencia para 8 diferentes mezclas de mortero curados a distintas temperaturas.

Los valores de resistencia de morteros muestran un efecto de cruce marcado para los cementos Portland. Para ambas dosis estudiadas, se observó una disminución en la resistencia para aquellos morteros curados a 40 °C. Este efecto también se observa, pero en menor medida, para ambas dosis de cementos AR. En dichos cementos los morteros curados a 10 °C presentaron mayores resistencias en el largo plazo.

Se calculó el valor T_0 y E_a según ASTM C 1074-04 a partir de los valores de la constante de velocidad de reacción (k en la curva hiperbólica de la Ecuación (5.5)) versus la temperatura de curado isotérmico (ver Figura 36). Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 12. También se indican los coeficientes de determinación R^2 de la recta de regresión de la Figura 36.

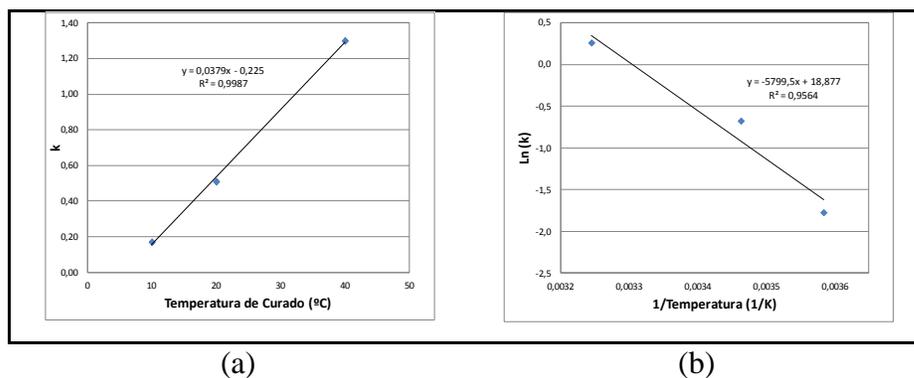


Figura 36: Ejemplo de velocidad de reacción k versus temperatura de curado isotérmico para mezcla P-350-S/A. En (a) se presenta la recta para el cálculo de T_0 y en (b) la recta para el cálculo de E_a .

Tabla 12: Valores de k de morteros para el cálculo de T_0 y E_a .

Mezcla	k			Temperatura Datum T_0 (°C)	R^2	Energía de Activación E_a (J/mol)	R^2
	10°C	23°C	40°C				
AR-350-S/A	0,191	0,308(*)	0,545	-6,2	1,000	25.697	1,000
AR-350-C/Re	0,279	0,350	0,721	-6,1	0,967	23.882	0,984
AR-450-S/A	0,114	0,403	0,871	4,8	0,997	47.453	0,982
CC-350-S/A	0,207	0,203	0,331	-31,9	0,873	12.404	0,849
CC-350-C/Re	0,178	0,225	0,321	-27,1	1,000	14.415	0,998
CC-450-S/A	0,096	0,272	0,424	-1,9	0,947	34.155	0,853
P-350-S/A	0,170	0,510	1,300	5,9	0,999	48.194	0,956
P-450-S/A	0,171	0,343	0,892	4,2	0,995	40.932	0,985

Para este método de cálculo se utilizó el procedimiento que no considera el tiempo de fraguado de cada mezcla. En el caso de obtener valores fuera de un rango aceptable, el valor de k fue reemplazado (indicado con *) por el ajuste del método utilizando una aproximación gráfica (ASTM, 2004).

En la Tabla 12 se observan valores bastante bajos de T_0 para las mezclas CC-350-23°C-S/A y CC-350-23°C-C/Re, llegando a valores menores que -30 °C en un caso, los cuales podrían no ser representativos de la temperatura a la cual el hormigón comienza a ganar resistencia. A la vez no concuerdan con valores reportados por Brooks *et al.* (2007) o Carino (1991) para cementos con adiciones cementicias. Con respecto a los valores de Energía de Activación, se puede observar que por el método ASTM, sólo en algunos casos se logran valores del orden de los recomendados por la literatura para los tipos de cementos utilizados en esta investigación (30.000 – 60.000 J/mol).

Con respecto a la utilización de aditivos retardadores, en el caso de los cementos Alta Resistencia, se observa que el valor de T_0 y E_a prácticamente no varía entre mezclas con y sin aditivo (aumento de 0,1 °C y 1.815 J/mol al usar aditivo). Para el caso de cementos

con mayor cantidad de puzolana (35%), el retardante aumenta también levemente el valor de T_0 y E_a (en 4,8 °C y 2.011 J/mol).

Si se observan los resultados por tipo de cemento, a mayor dosis aumenta el valor de T_0 , tanto para los cementos AR (con 15% de puzolana natural) como para los cementos CC (35% de puzolana natural). No así para los cementos Portland, a pesar de que dicha diferencia es del orden de 2 °C.

Se puede observar que los datos de la constante de velocidad k se ajustan levemente mejor a la forma lineal planteada por Saul-Nurse (mayor R^2), por lo que se podría esperar una mejor estimación utilizando esa relación.

Los valores de T_0 y E_a calculados por este método ASTM se utilizarán para evaluar la predicción de resistencia a compresión de hormigones en ciclos reproducidos en laboratorio y se comparará la estimación con aquella en la que se utiliza un valor $T_0 = -10$ °C y la función lineal de Saul-Nurse.

5.5.2 Evaluación del Método ASTM de Madurez

Al tener la curva Resistencia – Tiempo Equivalente a 23 °C de los cilindros de hormigón y el registro de temperatura de los hormigones sometidos a ciclos térmicos, se procedió a calcular los t_e según expresiones de Saul-Nurse (SN) y Freiesleben Hansen y Pedersen (FHP). Se compararon valores de resistencia a compresión medida (R_m) y estimada (R_e) con ASTM. Para la evaluación del tiempo equivalente según SN se utiliza la Ecuación (5.4) (Plowman) y para la estimación según FHP se utiliza la Ecuación (5.6) (Freiesleben Hansen) para la curva Resistencia – Tiempo Equivalente a 23 °C.

En la Figura 37 se muestra la resistencia medida versus la estimada para cada caso evaluado y considerando todas las mezclas estudiadas. Las resistencias estimadas tanto para temprana edad (hasta 7 días) como para largo plazo (14 a 60 días), están fuera del

rango $\pm 20\%$ considerado como aceptable (Kehl y Carrasquillo, 1998; Brooks *et al.*, 2007). En la Tabla 13 se presentan los indicadores de error.

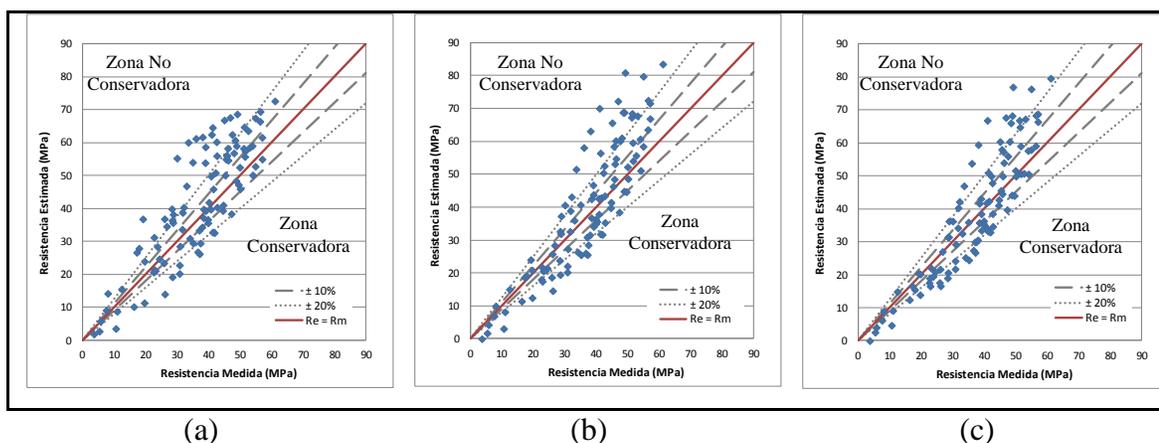


Figura 37: Comparación entre resistencia a compresión medida y resistencia estimada para tiempo equivalente según (a) Saul-Nurse con T_0 ASTM, (b) Freiesleben Hansen con E_a ASTM y (c) Saul-Nurse con $T_0 = -10^\circ\text{C}$.

Tabla 13: Indicadores de error para resistencia estimada según madurez.

Indicador	Fórmula	Edad	SN / T_0 ASTM	FHP / E_a ASTM	SN / $T_0 = -10^\circ\text{C}$
Suma Residuos	$\sum RV_i^*$	Temprana	60 MPa	-213 MPa	136 MPa
		Largo Plazo	-380 MPa	-264 MPa	-313 MPa
Promedio Residuos	$\frac{\sum_1^n RV_i}{n}$	Todas	-3 MPa	-5 MPa	-2 MPa
Desviación Estándar Residuos	$\sqrt{\frac{n \cdot \sum_1^n RV_i^2 - (\sum_1^n RV_i)^2}{n(n-1)}}$	Todas	11 MPa	10 MPa	10 MPa
Promedio de Errores	$(\sum \frac{ RV_i }{R_m})/n$	Todas	23%	26%	20%
Desviación Estándar de Error	$\sqrt{\frac{n \cdot \sum_1^n RV_i ^2 - (\sum_1^n RV_i)^2}{n(n-1)}}$	Todas	18%	20%	16%
Grado de Error	Pendiente Recta de Regresión (b)	Todas	1,112	1,129	1,073
Coficiente de Determinación Ajuste Lineal	R^2	Todas	0,76	0,73	0,79
Factor de minoración de R_e	$\frac{1}{b}$	Todas	0,90	0,89	0,93

* $RV = R_m - R_e$, n es la cantidad de datos de resistencia medidos.

En la Tabla 13 se aprecia que para temprana edad, sólo el método de SN es conservador (R_m mayor que R_e) independiente del grado de resistencia dado por el tipo, dosis de cemento y edad. Sin embargo para largo plazo el error aumenta al utilizar esta ecuación para la estimación de resistencia. En el caso de utilizar la expresión de FHP, las estimaciones no son conservadoras, ni a temprana edad ni a largo plazo. El grado de error presentado corresponde a un indicador relacionado con la regresión lineal de los datos de estimación. Para los 3 métodos evaluados la pendiente de la recta de regresión ajustada a los datos es mayor que uno (estimación no conservadora). Si se corrige por un factor para minorar la resistencia estimada para todas las mezclas estudiadas, estos bordearían el valor 0,9.

Por su influencia en los errores, se presentan en la Figura 38 las resistencias estimadas para diferentes rangos de aumento de temperatura (diferencia entre la temperatura máxima medida y la temperatura inicial medida) y tipo de cemento.

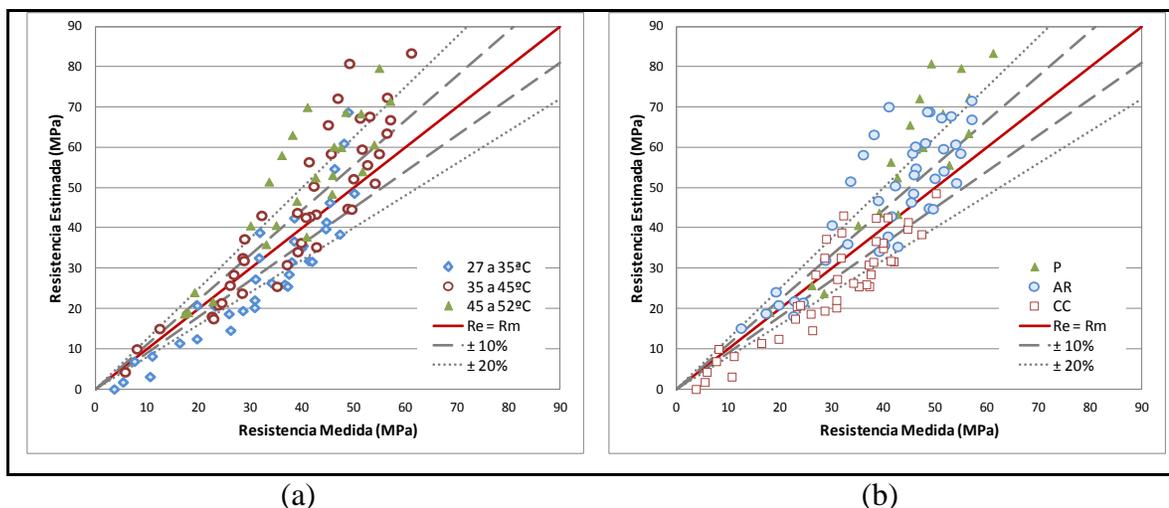


Figura 38: Comparación entre resistencia a compresión medida y resistencia estimada (a) según rango de aumento de temperatura y (b) tipo de cemento para tiempo equivalente según Saul-Nurse con T_0 calculado ASTM.

Se muestra que para aumentos de temperatura sobre 35 °C la estimación es aún menos conservadora que para rangos inferiores de aumento de temperatura. En el caso de los tipos de cemento, para el rango de resistencia medida, están casi la totalidad de los datos de resistencia estimada en una zona conservadora.

Los errores con respecto a la estimación, según tipo de cemento, temperaturas de colocación (T_c) y rangos de temperatura máxima se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Porcentaje de error en la estimación de resistencia según métodos de SN y FHP para T_0 y E_a calculados por ASM y $T_0 = -10$ °C.

Cemento	Edad	$T_c = 10^\circ\text{C}$			$T_c = 23^\circ\text{C}$			$T_c = 40^\circ\text{C}$		
		$T_{\text{máx}} = 50 \text{ a } 60^\circ\text{C}$			$T_{\text{máx}} = 60 \text{ a } 70^\circ\text{C}$			$T_{\text{máx}} = 80 \text{ a } 90^\circ\text{C}$		
		SN ASTM	FHP ASTM	SN -10°C	SN ASTM	FHP ASTM	SN -10°C	SN ASTM	FHP ASTM	SN -10°C
Portland (P)	Temprana	-	-	-	-9%	-40%	5%	-11%	-49%	4%
	Tardía	-	-	-	-30%	-23%	-23%	-55%	-44%	-45%
Portland Puzolánico (AR)	Temprana	-12%	-32%	-6%	10%	-7%	14%	-18%	-48%	-9%
	Tardía	-28%	-21%	-24%	-12%	-4%	-9%	-47%	-40%	-41%
Puzolánico (CC)	Temprana	29%	25%	40%	29%	20%	26%	21%	3%	21%
	Tardía	16%	15%	16%	11%	11%	10%	-15%	-17%	-16%

Si bien a temprana edad aumenta fuertemente la resistencia del hormigón en terreno (y por lo tanto el método de madurez subestima), esto se observa sólo para los cementos Puzolánicos (CC), y en menor grado para los Portland Puzolánicos (AR). Esto no ocurre para los Portland que incluso antes de 7 días presentan un rango promedio de 40% de error para el método FHP con el valor de E_a calculado por ASTM. Esta tendencia se presenta en mayor medida para edades tardías y mayores temperaturas. En este último caso, se confirma la poca exactitud y sobreestimación de resistencia al experimentar altas temperaturas sobre todo para la función de FHP (Carino, 1991). Dicha función por su naturaleza exponencial tiende a sobreestimar aún más la resistencia a muy altas temperaturas.

A largo plazo prácticamente se detiene la ganancia de resistencia, por lo que el método de madurez sobreestima la resistencia del hormigón en terreno, llegando incluso a valores sobre 30% para el método SN a altas temperaturas, en el caso de utilizar cemento Portland.

Para el caso de los hormigones con Cemento Puzolánico Corriente, prácticamente en todos los ciclos experimentados las resistencias medidas en terreno fueron superiores a las resistencias estimadas usando la relación Resistencia – Tiempo Equivalente de ASTM C 1074. El único caso en que dichas estimaciones fueron no conservadoras, fue cuando se experimentaron muy altas temperaturas (80-90 °C). Esto se podría deber a que en el corto plazo, el aumento de temperatura genera un aumento de la tasa de hidratación y por lo tanto aumenta la reacción puzolánica, pero dicho efecto, a muy altas temperaturas afectó la calidad de la hidratación, lo que hizo disminuir la resistencia (efecto de la mala calidad de los productos de hidratación igual que en los cementos Portland).

En general la función de estimación de Saul-Nurse es la que presenta menor error, además de una predicción conservadora en el rango de temperaturas y edades estudiadas. Si además de esta función, se usa un valor de $T_0 = -10$ °C se obtienen los menores errores de estimación, sobre todo a temprana edad.

5.6 Mejoras Propuestas al Método ASTM

5.6.1.1 Proposición Procedimiento de Cálculo de T_0 y E_a

Se analizó el efecto de calcular los parámetros T_0 y E_a usando un procedimiento diferente al propuesto por ASTM. Éste consiste en usar como base la resistencia a compresión de cubos de mortero de 50x50 mm. Se modificará el tiempo equivalente de modo que la curva de resistencia real se desplaza hasta la curva patrón de hormigón (ver Figura 39). Comparando estadísticamente el comportamiento de ganancia de resistencia

de los cubos de morteros con los cilindros de hormigón a 23 °C (comportamiento lineal-logarítmico), se concluye que son similares ($\alpha = 5\%$) salvo para los casos de la mezcla AR-350-S/A y CC-350-C/Re. En esos casos se cree que existió error experimental, dada la alta sensibilidad que presentan los cubos de mortero de las dimensiones mencionadas. Además al comparar los diferentes valores de la tasa de ganancia de resistencia k , éstas difieren en aproximadamente un 15%, siendo mayores las de los cubos de mortero. Esto se explica debido a que las probetas de mortero (cubos) presentan más confinamiento que la de las probetas de hormigón (cilíndricas).

Para el cálculo de los parámetros T_0 y E_a se minimizó el error cuadrático entre la resistencia estimada (R_e) y la medida (R_m) definido por la Ecuación (5.8).

$$Error\ Total = \sum (R_m - R_e)^2 \quad (5.8)$$

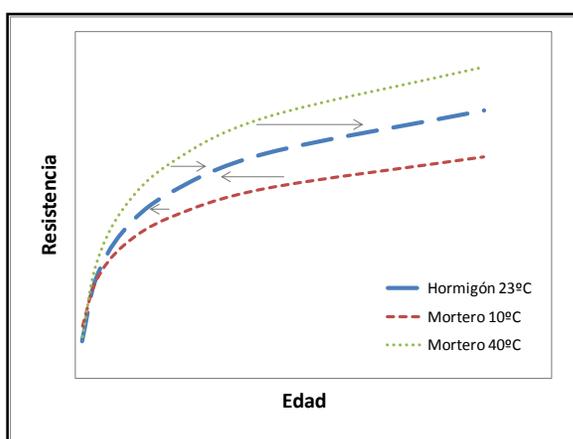


Figura 39: Ajuste de curvas resistencia versus tiempo para hormigón y mortero.

Comparativamente, este método propuesto está basado en el mismo principio teórico de madurez (una sola curva resistencia versus tiempo equivalente) y debería disminuir el error del método ASTM. Esto debido a que aproxima todas las resistencias de una misma mezcla con un sólo parámetro constante y del cual depende el error de la

estimación (T_0 o E_a). El método ASTM, por otro lado, al calcular los valores de la constante de velocidad k en la ecuación hiperbólica y luego realizar regresión lineal de los valores de k versus la temperatura de curado, debería realizar más aproximaciones e incurrir en más error que el procedimiento sugerido. Además, si se presentara disminución de resistencia o de efecto “techo” en los cubos de morteros a más temperatura de curado, esto se vería reflejado inmediatamente en el cálculo de la resistencia estimada mediante un cambio en el parámetro.

En la Tabla 15 se muestran los valores de T_0 y E_a calculados con método de mínimos cuadrados propuesto. También se indican los coeficientes de determinación de ajuste de la curva Resistencia – Tiempo a 23 °C del hormigón. Para las ecuaciones de estimación, como sugiere ASTM, se ha utilizado una función lineal para el método SN (Ecuación (5.2) con (5.4)) y una función exponencial para FHP (Ecuación (5.3) con (5.6)).

Tabla 15: Valores de T_0 y E_a obtenidos según método propuesto.

Mezcla	Temperatura Datum T_0 (°C)	R^2	Energía de Activación E_a (J/mol)	R^2
AR-350-S/A	-19,1	0,983	23.050	0,943
AR-350-C/Re	-1,2	0,966	34.966	0,990
AR-450-S/A	-2,7	0,983	31.691	0,980
CC-350-S/A	-0,3	0,985	35.124	0,984
CC-350-C/Re	2,9	0,993	51.875	0,990
CC-450-S/A	4,1	0,985	56.992	0,985
P-350-S/A	-4,2	0,970	30.208	0,951
P-450-S/A	-0,8	0,965	22.673	0,964

De la Tabla 15 se puede observar que los valores obtenidos están en un rango de -4,2 a 4,1 °C para la Temperatura Datum (excepto para el hormigón AR-350-S/A) y 22.000 a 55.000 J/mol para Energía de Activación, valores bastante similares a lo reportado por la bibliografía (Brooks *et al.*, 2007; Carino, 1991). Para los casos de cementos con más puzolanas (CC) el valor de Energía de Activación bordea los 50.000 J/mol, lo que es

consecuente también con la literatura sobre adiciones cementantes de efecto puzolánico (Brooks *et al.*, 2007; Riding *et al.*, 2011).

Con estas modificaciones, el procedimiento ASTM logra una mejora importante en la estimación de resistencia usando cualquier función de madurez, independiente del cemento usado, del nivel de resistencia y de la temperatura de curado. En la Figura 40 se presentan los resultados de morteros a diferentes temperaturas de curado para las funciones de SN y FHP. Se muestra además la recta de regresión a la estimación según SN. Con un coeficiente de determinación sobre el 90% la resistencia estimada es prácticamente igual a la resistencia medida (pendiente de la recta de regresión es muy cercana a 1).

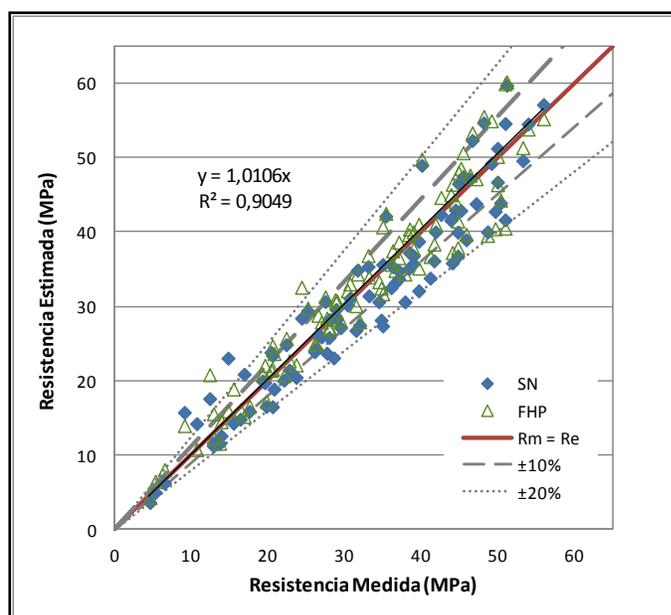


Figura 40: Comparación entre resistencia a compresión medida y resistencia estimada de morteros con tiempo equivalente según Saul-Nurse y T_0 modificado y Freiesleben Hansen y Pedersen con E_a modificado.

5.6.1.2 Mejoras a Ecuaciones de Estimación

Los resultados del programa experimental con hormigones reproducidos en ciclos, muestran que a mayores edades el método de madurez sobreestima. Este efecto se puede explicar debido a que existe una pérdida no despreciable de resistencia a largo plazo que producen las altas temperaturas en el hormigón a temprana edad. Este fenómeno no ha sido reportado en hormigones fabricados con puzolanas naturales, pero sí en cementos Portland o con adiciones como ceniza volante Clase F (Carino, 1991; Brooks *et al.*, 2007). Al usar, por ejemplo la función de tiempo equivalente según Saul-Nurse y una función lineal-logarítmica (Ecuación (5.4)) para la relación Resistencia-Tiempo, no refleja el fenómeno de pérdida de resistencia aparente por altas temperaturas. A pesar de que ésta última puede ser una función de muy buen ajuste para hormigones, se obtienen muy altas resistencias a largo plazo, y no se ve reflejado el efecto de resistencia techo que se logra al tener un curado con muy alta temperatura.

Por lo anterior, se analizó el efecto que tendría utilizar la Ecuación (5.5), que posee una resistencia techo, en la calidad de la predicción de resistencia a compresión. Además se utilizó los valores de T_0 y E_a propuestos 5.6.1.1. Aplicando esta función para estimar la resistencia de los hormigones sometidos a ciclos térmicos se obtienen los valores mostrados en la Figura 41, observándose que la gran mayoría de los datos estaría en una zona conservadora (con un rango aceptable de $\pm 20\%$ de error) al utilizar la función de SN. Los indicadores de error se presentan en la Tabla 16.

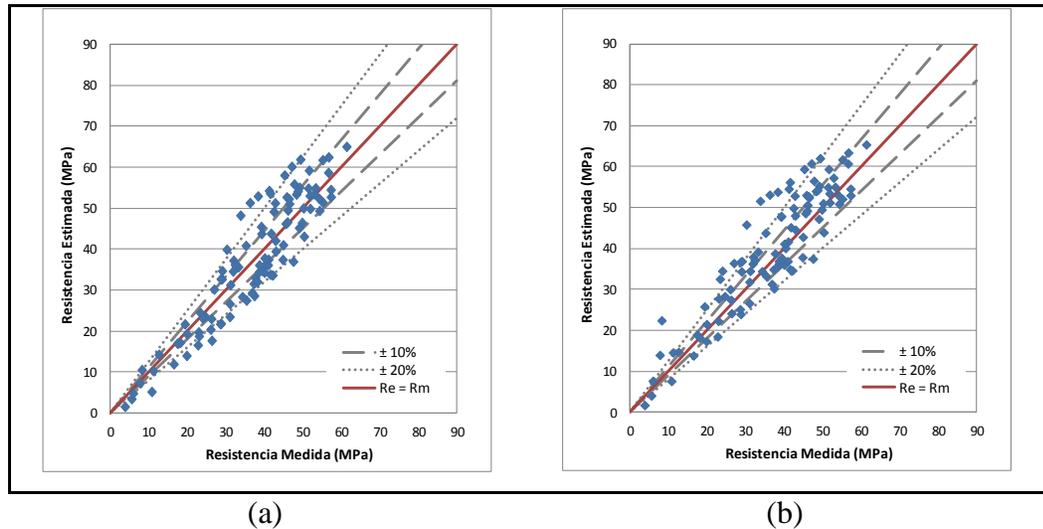


Figura 41: Comparación de resistencia estimada con método ASTM y ecuación hiperbólica para T_0 ASTM (a) y E_a ASTM (b).

Tabla 16: Indicadores de error para resistencia estimada según madurez con constantes propuestas y ecuación hiperbólica.

Indicador	Fórmula	Edad	SN / Propuesto	FHP / Propuesto
Suma Residuos	$\sum RV_i^*$	Temprana Edad	39 MPa	-192 MPa
		Largo Plazo	-80 MPa	-123 MPa
Promedio Residuos	$\frac{\sum_1^n RV_i}{n}$	Todas	0	-3
Desviación Estándar Residuos	$\sqrt{\frac{n \cdot \sum_1^n RV_i^2 - (\sum_1^n RV_i)^2}{n(n-1)}}$	Todas	7	9
Promedio de Errores	$(\sum \frac{ RV_i }{R_m})/n$	Todas	15%	23%
Desviación Estándar de Error	$\sqrt{\frac{n \cdot \sum_1^n RV_i ^2 - (\sum_1^n RV_i)^2}{n(n-1)}}$	Todas	11%	19%
Grado de Error	Pendiente Recta de Regresión (b)	Todas	1,02	1,07
Coefficiente de Determinación Ajuste Lineal	R^2	Todas	0,85	0,82
Factor de minoración de R_e	$\frac{1}{b}$	Todas	0,98	0,93

* $RV = R_m - R_e$, n es la cantidad de datos de resistencia medidos.

5.7 Conclusiones y Recomendaciones

Poder estimar la resistencia en terreno del hormigón cobra gran importancia para el desarrollo oportuno de operaciones en terreno, como el retiro de moldajes o el fin de la protección al frío. Es por esto que el método de madurez ha sido estudiado en esta investigación y se sugieren cambios para su aplicación en ciertos tipos de hormigones.

En morteros curados a diferentes temperaturas se puede observar un efecto de cruce para cementos Portland, y en menor medida para cementos con 15% de puzolanas naturales. En el caso de cementos Corriente (35% de puzolanas) no se observa un efecto de cruce de resistencias en el largo plazo.

Con respecto a los valores calculados de Temperatura Datum (T_0) según el método ASTM, éstos fueron cercanos a 5 °C para cementos Portland; a 0 °C para hormigones con cemento Alta Resistencia y a -20 °C para hormigones con cemento Corriente. Con respecto a valores de Energía de Activación (E_a), éstos son del orden de 45.000 J/mol para cementos Portland, 30.000 J/mol para cementos Alta Resistencia y 20.000 J/mol para cementos Corriente. Si bien en el caso de los cementos Corrientes, éstos presentaron valores que escapan a lo reportado en la bibliografía (Carino, 1991; Brooks *et al.*, 2007), para el caso de las mezclas con 450 kg/m³ sí se obtiene un valor de -1,9°C, que estaría del orden de lo reportado en estudios mencionados. Para estos últimos cementos también, en el caso de usar 350 kg/m³ de dosis de cemento, los valores bordean los -30 °C. Estos valores no serían coherentes con la definición de T_0 y se deberían realizar más estudios para determinar dicho valor.

El uso de aditivos retardadores de fraguado aumenta levemente el valor de T_0 y E_a , tanto para cementos Corriente como para cementos Alta Resistencia. Esto se debe principalmente al mecanismo que utilizan los aditivos: separar las partículas de cemento, permitiendo algunas veces una mayor tasa de hidratación del cemento (a pesar de que el

inicio esté alterado como en el caso del uso de retardantes). Es por esto que el umbral de energía necesario para activar la reacción (T_0 y E_a), también aumenta.

Si bien en la mayoría de los casos los valores de T_0 y E_a obtenidos por ASTM son similares a los informados en la literatura, al momento de evaluar su exactitud para estimar resistencia de hormigones sometidos a ciclos térmicos, se incurre en importantes errores a temprana edad y largo plazo. Para hormigones fabricados con cementos Portland el error de sobrestimación a temprana edad es del orden de 10% al utilizar la función de Saul-Nurse (SN) y de 45% al utilizar la función de Freiesleben Hansen y Pedersen (FHP). Para edades tardías, el error aumenta a un promedio de 40% para ambos métodos. A mayor temperatura máxima experimentada por estos hormigones, mayor es el porcentaje de sobreestimación, llegando a 55% para el caso de usar SN y temperaturas máximas entre 80 y 90 °C.

Para cementos Portland Puzolánico Alta Resistencia a temprana edad el error es del orden de 15% de sobreestimación para temperaturas de colocación de 10 °C y 40 °C, sin embargo para temperaturas iniciales de 23 °C, se subestima la resistencia en un 10%. A temprana edad la función de SN tiene menos error que la de FHP sin embargo a largo plazo esta tendencia se revierte, siendo menos conservadora la función de SN. A temperaturas muy altas (entre 80 y 90 °C) el error bordea el 30% para largo plazo y es mayor que en otros rangos de temperatura.

Para cementos Puzolánico Corriente en la mayoría de los casos la estimación de resistencia arrojó valores conservadores (subestimación). Sólo para el caso de experimentar muy altas temperaturas se tuvieron errores del orden de 10% de sobreestimación a largo plazo. A temprana edad la función SN sobreestima más que la de FHP.

Al utilizar un valor de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para T_0 y la función de SN se obtienen menores errores de estimación que por el método ASTM. A temprana edad para casi la totalidad de los datos analizados se incurrió en subestimación o sobreestimación menor a 10%. En el caso de no utilizar el método ASTM se sugiere usar el valor de $T_0 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la función de SN.

Con respecto a las mejoras propuestas, al utilizar la minimización del error entre las resistencias estimadas y medidas, se obtienen valores de T_0 en un rango de $-4,2$ a $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la mayoría de las mezclas estudiadas, lo que es similar a lo informado por la literatura. Si se utilizan estos valores junto a una ecuación Resistencia – Tiempo Equivalente que refleje la resistencia techo a largo plazo de los hormigones bajo ciclo térmico, se obtiene una mejora que tiene un error promedio de 15% para todos los cementos utilizando la función de SN.

Dado el mayor error obtenido a altas temperaturas, si el hormigón en terreno experimenta muy altas temperaturas (sobre $70\text{ }^{\circ}\text{C}$), se recomienda simular en laboratorio dichos hormigones con las características lo más similares posibles a aquellas de terreno. De esta manera se podría cuantificar el efecto resistencia techo o la disminución de resistencia por efecto de las temperaturas máximas y cuantificar así la sobreestimación por madurez.

6. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL TIEMPO DE FRAGUADO EN PARÁMETROS DE MADUREZ

En el presente capítulo se analizarán los tiempos de fraguado según diferentes condiciones de curado y distintos parámetros de dosificación (como tipo y dosis de cemento, además del contenido de aditivo retardador de fraguado). Según esto, se calcularán y analizarán los diferentes parámetros del método de madurez propuestos por diferentes autores (Pinto y Hover, 1999; ASTM, 2004; Schindler, 2009).

6.1 Determinación de Tiempos de Fraguado en el Hormigón

El término fraguado tiene relación con el tiempo de inicio de ganancia de propiedades resistentes y además con el tiempo en que la mezcla deja de ser trabajable (Mehta y Monteiro, 2006). Por esto último, es de vital importancia determinar su rango de valores para las operaciones en terreno.

El fraguado al ser un proceso gradual, no tiene una definición exacta. Por esto la normativa ASTM (2005) asocia esta propiedad a la resistencia a penetración del mortero extraído del hormigón fresco y se determina así el inicio y el fin del fraguado cuando esta resistencia es de 3,5 y 27,6 MPa respectivamente.

Se consideran entonces tres conceptos relevantes:

- **Tiempo de inicio de fraguado (t_{fi}):** edad en que el hormigón deja de ser fácilmente trabajable, comienza levemente la rigidización del mortero y la ganancia de resistencia. Además, al comenzar a ganar resistencia, también se ve un aumento de la temperatura. Según ASTM C 403-C 403M la resistencia a penetración del mortero es de 3,5 MPa.

- **Tiempo de final de fraguado (t_{ff}):** edad en que el hormigón ya no es trabajable. El hormigón ha aumentado considerablemente su temperatura. Al doble de esta edad ya

podría realizarse un primer ensayo a compresión. Según ASTM C 403-C 403M, la resistencia a penetración del mortero es de 27,6 MPa.

- **Tiempo de fraguado ($t_{ff} - t_{if}$):** considera el tiempo entre el inicio de fraguado y el fin de fraguado.

Según ASTM C 403-C 403M (2005) para determinar los tiempos de fraguado de un hormigón se debe tamizar una muestra de éste en estado fresco y obtener el mortero que pase a través de la malla de 5 mm. Los morteros son entonces colocados en contenedores a la temperatura ambiente especificada a la cual se desea medir la propiedad. Luego, a intervalos regulares de tiempo se mide la resistencia a penetración en la mezcla según agujas estandarizadas (645, 323, 161, 65, 32 y 16 mm² de superficie). En la Figura 42 se muestra el equipamiento necesario.



Figura 42: (a) Equipamiento para medición de tiempos de fraguado (a) y (b) método de ensayo (Fuente: Pinto y Hover (1999)).

Según el procedimiento definido por ASTM los datos de resistencia a la penetración se aproximan a una curva de potencia en función del tiempo (ver Figura 43).

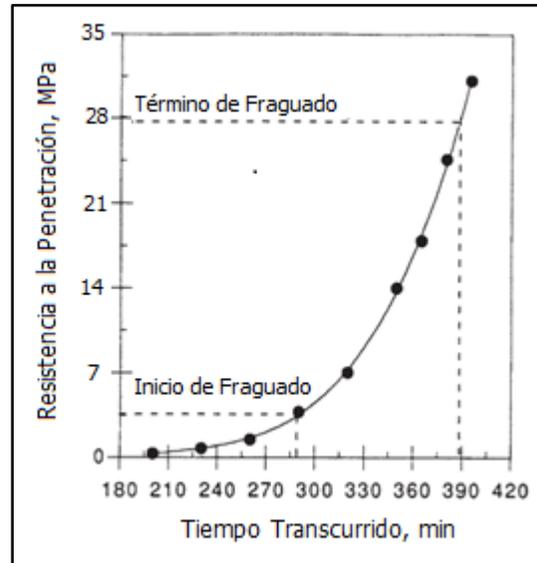


Figura 43: Ejemplo de curva resistencia a la penetración versus tiempo según ASTM (2005).

Los factores que afectan fuertemente los tiempos de fraguado son el tipo y cantidad de aditivo, el tipo y cantidad de cemento, la razón agua cemento y las adiciones cementantes (ASTM, 2005; Schindler, 2009; Bentz, 2010).

6.2 Mezclas y Dosificación

Como se vio en la sección 3.1.1: “Factorial de la Investigación”, se pretende analizar el efecto de cuatro variables principales, tanto de dosificación como de ambiente. Para esto se estudiaron ocho dosificaciones (ver Tabla 17):

- Tipo de Cemento: Portland, Portland Puzolánico Alta Resistencia y Puzolánico Corriente.
- Cantidad de Cemento: 350 y 450 kg/m³
- Temperatura Ambiental: 10, 23 y 40 °C.
- Aditivo Retardador de Fraguado: 0 y 0,3% con respecto al peso del cemento.

Tabla 17: Dosificación de hormigones para ensayos de tiempos de fraguado.

Razón W/C	0,5																													
Árido	50% Gravilla Chancada 20 mm, 50% Arena Gruesa Chancada																													
Tipo de Cemento	Portland						Portland Puzolánico Alta Resistencia						Puzolánico Corriente																	
Dosis de Cemento (kg/m ³)	350			450			350						450						350						450					
Aditivo Retardante	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	c/Re	c/Re	c/Re	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	c/Re	c/Re	c/Re	S/A								
Temperatura Ambiente (°C)	10	23	40	10	23	40	10	23	40	10	23	40	10	23	40	10	23	40	10	23	40	10	23	40	10	23	40	10	23	40

Adicionalmente se estudiaron otras variables de dosificación, como la razón W/C, el volumen de pasta y porcentaje de áridos, diferentes dosis y tipos de aditivos modificadores de fraguado (ver Sección 6.3.1).

Para los ensayos de tiempo de fraguado, se utilizaron 2 o 3 cubos de 150x150 mm de superficie (ver Figura 44) y se utilizaron todos los datos medidos con los tiempos correspondientes.



Figura 44: Cubos de mortero de hormigón utilizados para medir el tiempo de fraguado.

Se observó que en aquellos hormigones con 350 kg/m³ de dosis de cemento la trabajabilidad en estado fresco del hormigón hizo imposible tamizarlo y ensayar el mortero que pasa la malla de 5 mm, como indica el procedimiento descrito en ASTM C 403-C 403M (2005). Por esta razón se procedió entonces a evaluar una mezcla de hormigón tamizada según ASTM y compararla con otra dosificada de manera tal que se

lograra un mortero equivalente con la misma cantidad de árido y pasta que en el hormigón original tamizado.

Se utilizó una razón W/C de 0,5 y 450 kg/m^3 de dosis de cemento Alta Resistencia. Se concluyó que el tiempo de fraguado se puede estudiar confeccionando la mezcla con una dosificación equivalente. Los resultados de los tiempos de fraguado se muestran en la Figura 45, y se concluye que tanto el inicio como el término de fraguado ocurrieron al mismo tiempo.

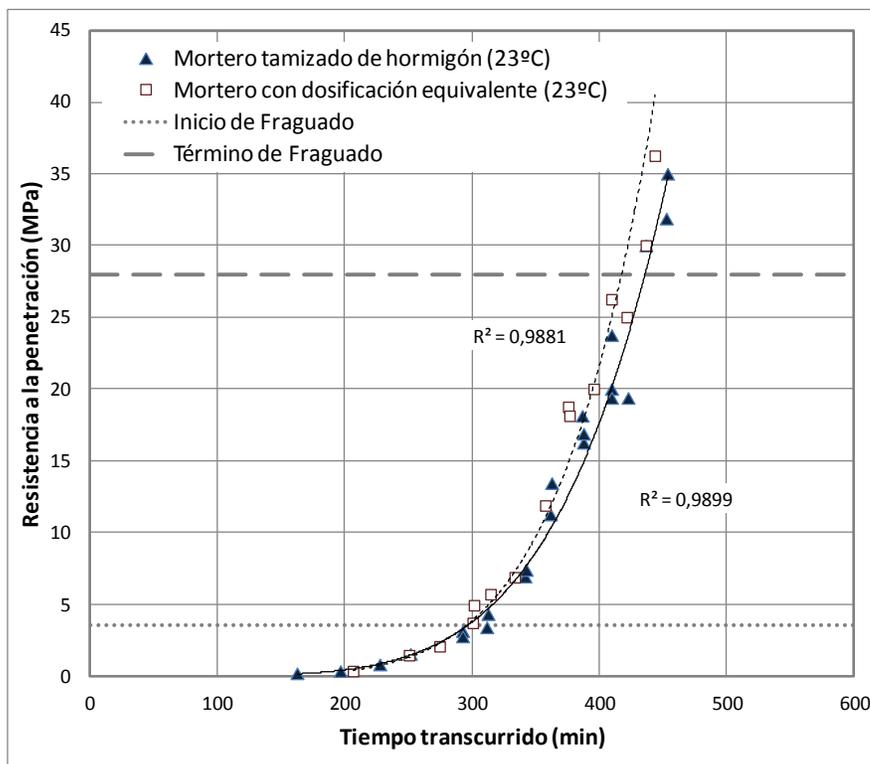


Figura 45: Comparación entre tiempos de fraguado de mortero obtenido por tamizado del hormigón (método ASTM) y mortero fabricado con dosificación equivalente.

A continuación se presenta la dosificación tipo para las mezclas estudiadas. En la Tabla 18 se muestra una dosificación tipo según cantidad de cemento y aditivos (si es que

aplica). Para los áridos al tener un porcentaje no menor de árido sobre 5mm (ver Tabla 7), se procedió a separar la arena gruesa en arena fina y gravilla sobre 5 mm.

Tabla 18: Dosificación en peso de hormigones para estudiar tiempos de fraguados.

Material	Peso específico (promedio)	Hormigón 1 (kg/m³)	Hormigón 2 (kg/m³)
Cemento	2,931	350	450
Agua	1,000	175	225
Arena Fina	2,690	834	726
Aditivo Retardante	1,100	1,75	-

6.3 Resultados y Análisis

En la Tabla 19 se muestran los tiempos de fraguado medidos a todas las mezclas descritas en la Sección 6.2 y en la Tabla 17. Los valores están ajustados a una curva de potencia en función del tiempo (según metodología ASTM). Adicionalmente a la medición de tiempos de fraguado se registró la evolución de temperatura para las mezclas hasta antes del tiempo de fraguado; entre los tiempos de inicio y fin de fraguado; y hasta el final de fraguado. En la Tabla 19 se indica un promedio de la temperatura del hormigón, desde el inicio del mezclado hasta el término de fraguado. Esto se presenta de esta manera debido a que no se contó con los datos de evolución de temperatura para morteros con cemento Puzolánico Corriente y Portland.

Tabla 19: Tiempos de fraguado y temperaturas promedio de las mezclas estudiadas.

Tipo Cemento	Dosis de Cemento (kg/m ³)	Aditivo	Temperatura de Curado	Temperatura Promedio Hormigón	Tiempo de fraguado inicial (h)	Tiempo de fraguado final (h)	Tiempo de fraguado (h)
Portland (P)	350	S/A	10°C	15°C	5,9	9,7	3,8
		S/A	23°C	25°C	3,6	5,6	2,0
		S/A	40°C	40°C	2,4	3,9	1,5
	450	S/A	10°C	15°C	7,8	10,5	2,7
		S/A	23°C	25°C	5,3	7,3	2,0
		S/A	40°C	40°C	3,8	6,0	2,2
Puzolánico Alta Resistencia (AR)	350	S/A	10°C	15°C	5,5	9,3	3,8
		S/A	23°C	25°C	3,2	5,1	1,9
		S/A	40°C	40°C	1,8	3,2	1,4
		c/Re	10°C	15°C	8,5	12,2	3,7
		c/Re	23°C	25°C	5,3	8,4	3,1
		c/Re	40°C	40°C	4,1	5,7	1,6
	450	S/A	10°C	15°C	7,3	10,4	3,1
		S/A	23°C	25°C	4,8	6,6	1,8
		S/A	40°C	40°C	2,3	3,2	0,9
Puzolánico Corriente (CC)	350	S/A	10°C	15°C	6,3	12,6	6,3
		S/A	23°C	25°C	3,3	6,5	3,2
		S/A	40°C	40°C	1,8	3,8	2,0
		c/Re	10°C	15°C	9,7	15,9	6,2
		c/Re	23°C	25°C	5,5	9,0	3,5
		c/Re	40°C	40°C	3,1	4,8	1,7
	450	S/A	10°C	15°C	9,8	14,7	4,9
		S/A	23°C	25°C	5,4	7,6	2,2
		S/A	40°C	40°C	2,9	4,1	1,2

6.3.1 Factores que Afectan el Tiempo de Fraguado

Adicionalmente al estudio de las variables del factorial detalladas en la Sección 6.2 se analizaron diferentes factores que afectan los tiempos de fraguado y de esta manera comprender mejor la fenomenología detrás de esta propiedad.

a) Razón W/C

La literatura indica que los tiempos de fraguado están fuertemente influenciados por la razón agua/cemento. Por esto se confeccionaron probetas con razones W/C de 0,45; 0,50 y 0,55 y 350 kg/m³ de cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia. Se comprobó que

a medida que se aumenta la razón agua cemento, aumentaron, tanto los tiempos de inicio como de término de fraguado (ver Figura 46).

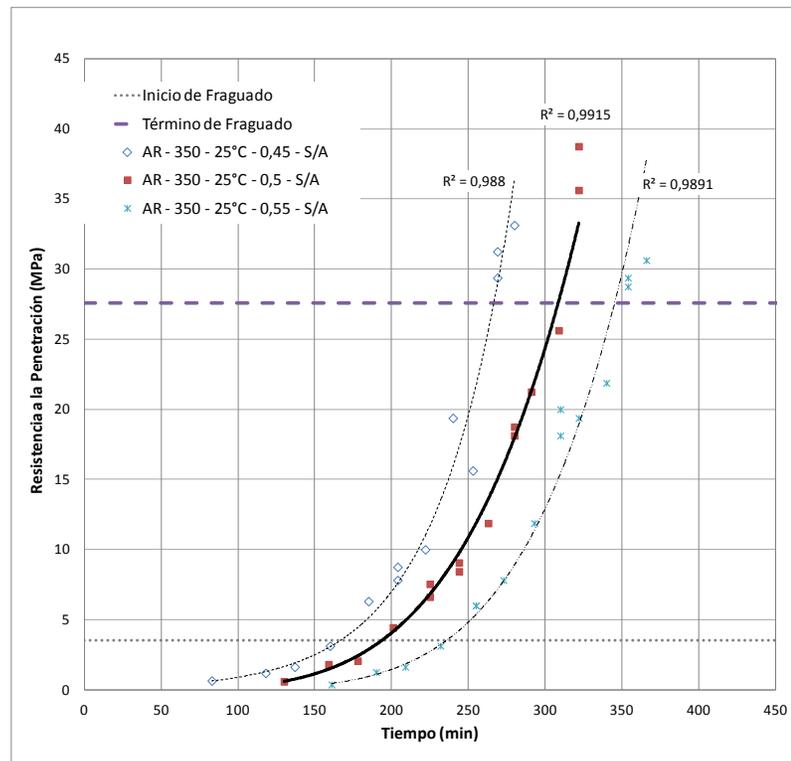


Figura 46: Efecto de la razón W/C en resultados de ensayo de tiempo de fraguado para hormigones con igual dosis y tipo de cemento (350 kg/m^3 de cemento y $23 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura del hormigón).

b) Volumen de Pasta y Porcentaje de Áridos

Al ensayar los morteros se notó que los tiempos de inicio y fin de fraguado eran fuertemente influenciados por la cantidad de pasta presente en el hormigón, por lo que se evaluaron distintas cantidades de cemento por m^3 de pasta.

En la Figura 47 se presentan los tiempos de fraguado según diferentes volúmenes de pasta, para una razón W/C de 0,5. Si bien los tiempos de inicio y fin de fraguado

aumentan a mayor dosis, el tiempo de fraguado (tiempo entre el inicio y el fin del fraguado) se ve levemente afectado.

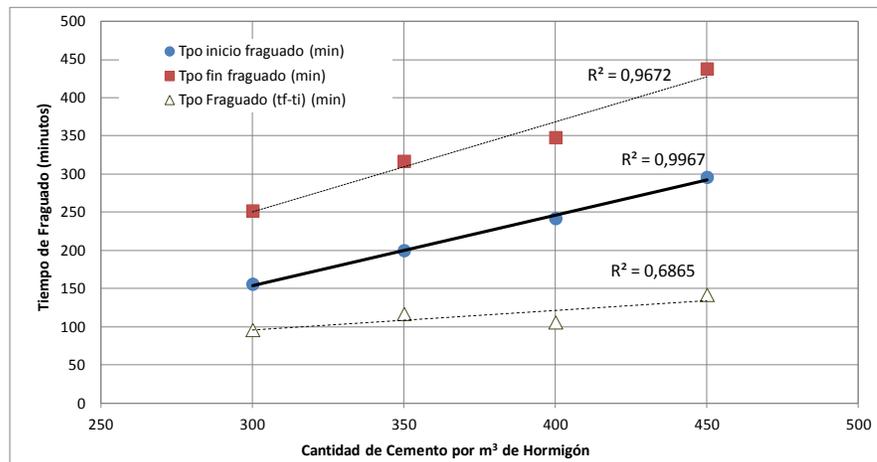


Figura 47: Tiempos de inicio y término de fraguado del hormigón con igual calidad de pasta ($W/C=0,5$) y diferente contenido de cemento.

Adicionalmente, se estudiaron mezclas con el mismo tipo de cemento, pero con diferentes dosis de cemento y razón W/C , para determinar la influencia del porcentaje de áridos (en recuadro) de la mezcla en los tiempos de fraguado (ver Figura 48).

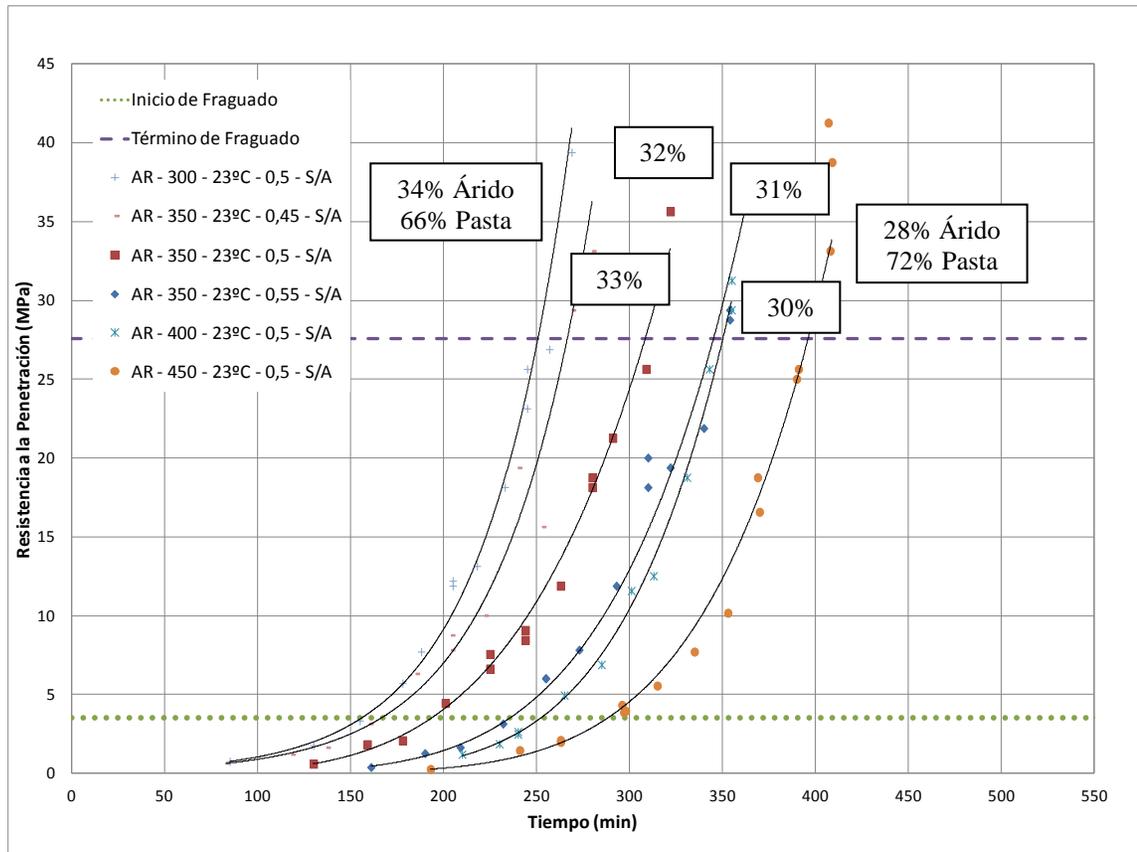


Figura 48: Relación resistencia a la penetración vs tiempo a 23 °C para morteros con diferentes dosis de cemento y W/C.

Se muestra que los tiempos de inicio y fin de fraguado dependen fuertemente del porcentaje de pasta en el hormigón, por lo que aparentemente éste factor afecta a la resistencia a penetración del equipo (mayor roce del árido con el equipo). Sin embargo se puede notar que el tiempo de fraguado (tiempo entre fin e inicio de fraguado), permanece casi constante (ver Tabla 20 y Figura 49). Esto último indicaría que a pesar del aumento de tiempo de inicio de fraguado al aumentar la dosis de cemento, el proceso de hidratación tarda lo mismo una vez “activado”. Esto ocurre independiente de la calidad de la pasta (W/C).

Tabla 20: Volumen de árido, pasta y tiempos de fraguado medidos para diferentes hormigones.

Volumen de Árido (%)	Volumen de Pasta (%)	Dosis de Cemento (kg/m ₃)	Razón Agua/Cemento	Tiempo de inicio de fraguado (min)	Tiempo de fin de fraguado (min)	Tiempo de fraguado (min)
28	72	450	0,50	295	411	116
30	70	400	0,50	250	349	99
31	69	350	0,55	232	338	106
32	68	350	0,50	198	310	112
33	67	350	0,45	157	269	112
34	66	300	0,50	150	250	100

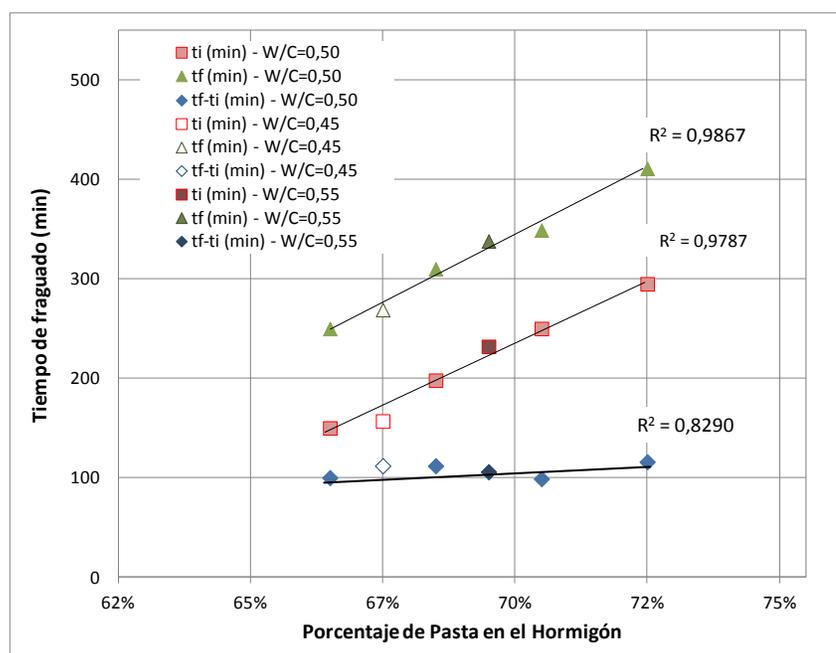


Figura 49: Tiempos de fraguado del hormigón fabricado con cemento AR y distintas W/C, en función del porcentaje de pasta en el hormigón.

Este comportamiento confirma la diferencia existente entre tiempos de fraguado de la pasta de cemento y los tiempos de fraguado del hormigón, al este último contener árido en la mezcla.

c) Aditivos Modificadores de Fraguado

Otro de los factores relevantes estudiado fue el tipo y dosis de aditivo modificadores de tiempos de fraguado.

Para el factorial definitivo se estudió sólo el comportamiento de aditivos retardadores de fraguado, ya que los acelerantes no lograron generar un cambio importante en los tiempos de inicio de fraguado, sin embargo redujeron el tiempo entre el final e inicio de fraguado (ver Figura 50 y Tabla 21). Esto se debió posiblemente a incompatibilidad de los aditivos con algunos tipos de cementos utilizados en la presente investigación.

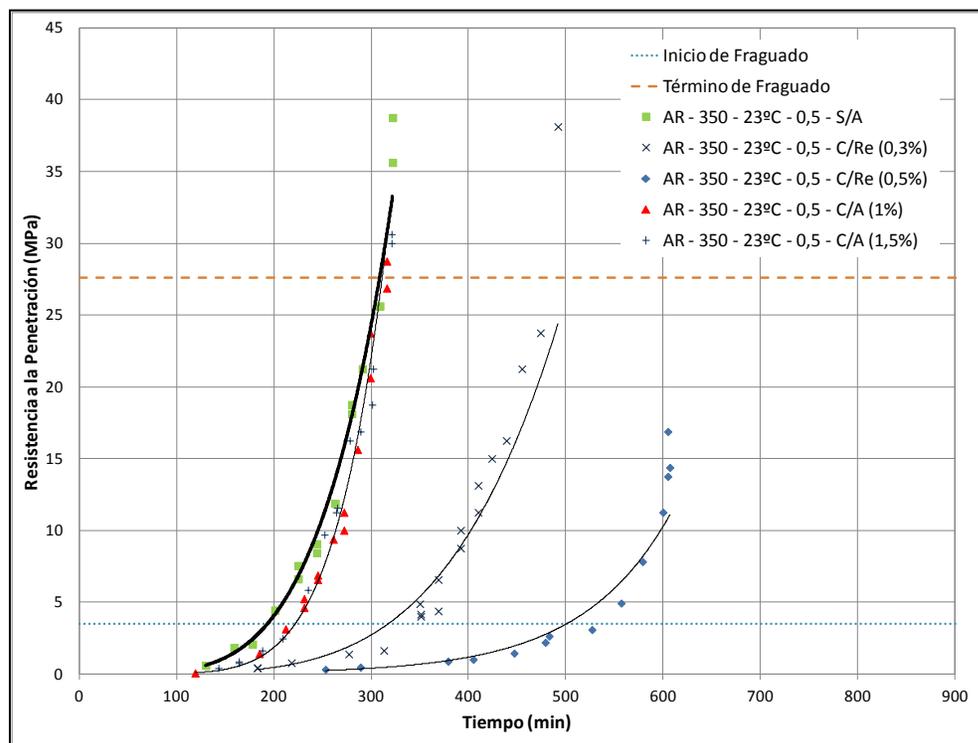


Figura 50: Efecto del tipo y dosis de aditivo modificador de fraguado en la resistencia a la penetración vs tiempo para morteros de igual calidad (misma W/C) y cantidad de pasta.

Tabla 21: Tiempos de inicio y término de fraguado medidos para hormigón patrón sin aditivo y hormigón con aditivos modificadores de fraguado.

Tipo y Dosis de Cemento	Tipo de Aditivo	Dosis de Aditivo	Tiempo de inicio de fraguado (min)	Tiempo de fin de fraguado (min)	Tiempo de fraguado (min)
AR-350	-	0%	192	311	119
AR-350	Retardante	0,3%	331	507	176
AR-350	Retardante	0,5%	500	691	191
AR-350	Acelerante	1,0%	217	313	96
AR-350	Acelerante	1,5%	220	311	91

d) Tipo de Cemento

Para aquellos cementos que ganaron más resistencia a temprana edad, como los cementos Portland Puzolánico Alta Resistencia o cementos Portland, los tiempos de fraguado son menores que en aquellos cementos con adiciones cementantes como puzolanas naturales. Los resultados se muestran en la Figura 51. La mezcla con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia fue el que presentó menores tiempos de fraguado; incluso menos que los cementos Portland. Esto se debió principalmente a la mayor finura de los cementos Portland Puzolánico Alta Resistencia en comparación con los otros dos cementos estudiados.

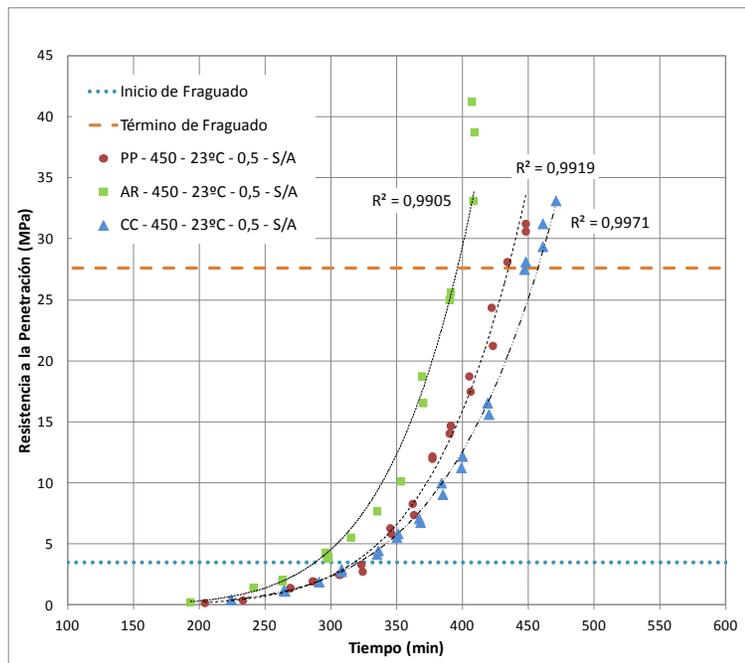


Figura 51: Efecto del tipo de cemento en la relación resistencia a la penetración vs tiempo de hormigones con igual calidad y volumen de pasta de cemento.

e) Temperatura del Hormigón

La temperatura del hormigón es uno de los factores principales que afectan la magnitud del tiempo de fraguado. Como se estudió en el Capítulo II, la temperatura de curado (que afecta directamente la temperatura del hormigón) puede acelerar o retardar los procesos de hidratación del cemento.

En la Figura 52 y Figura 53 se presentan los resultados obtenidos en las mezclas de estudio sometida a diferentes temperaturas de curado.

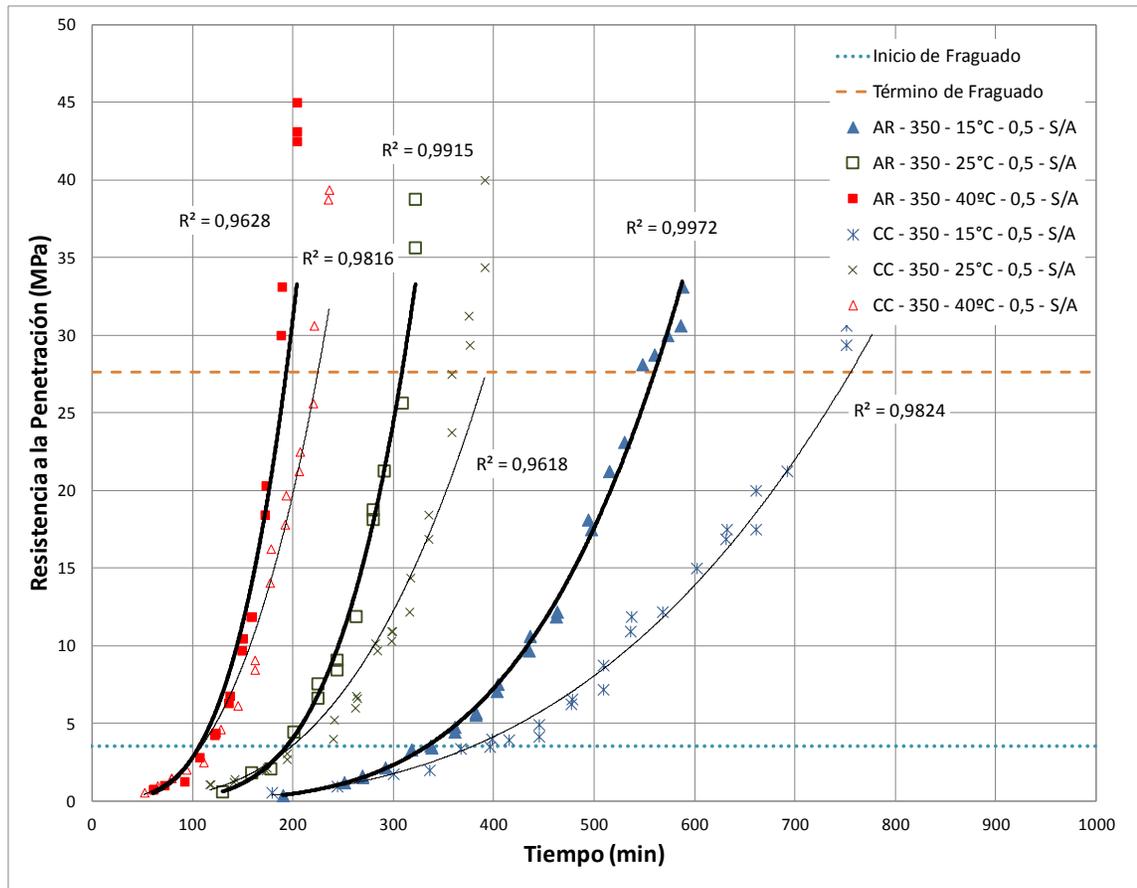


Figura 52: Efecto de la temperatura del hormigón y tipo de cemento (AR y CC) en la relación resistencia a la penetración vs tiempo para hormigones con igual calidad de pasta ($W/C=0,5$) y volumen de pasta (68%).

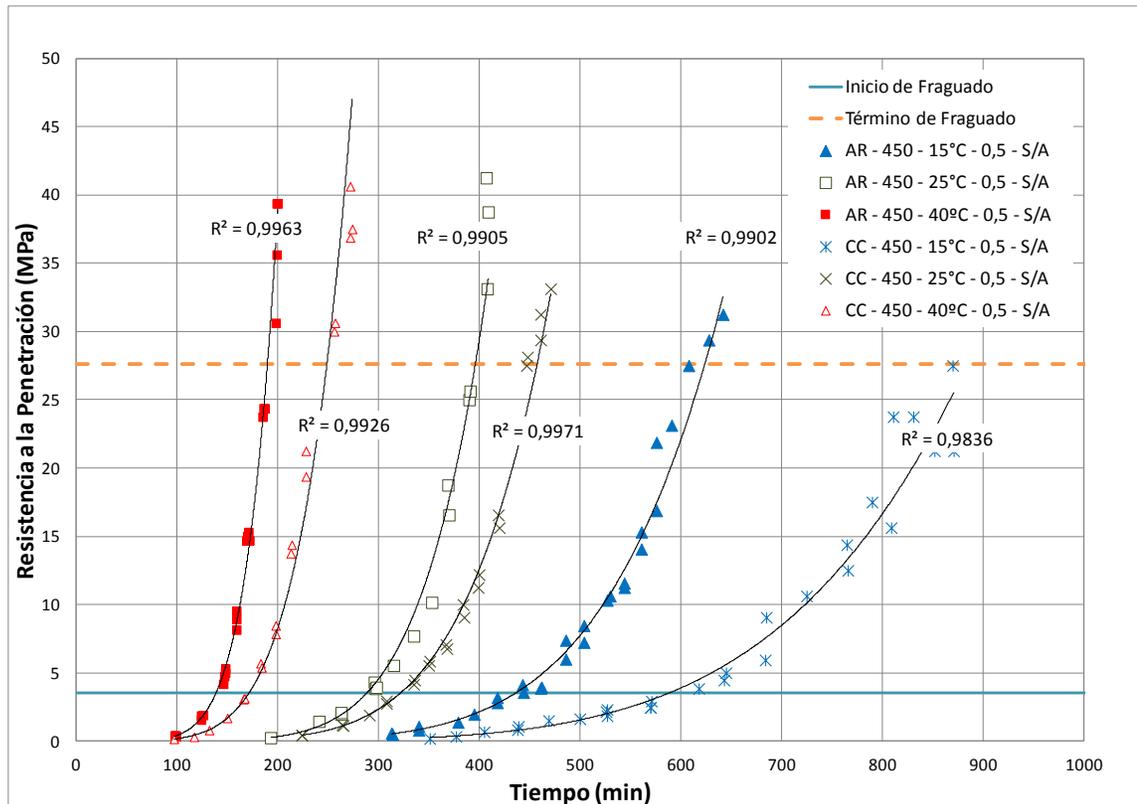


Figura 53: Efecto de la temperatura del hormigón y tipo de cemento (AR y CC) en la relación resistencia a la penetración vs tiempo para hormigones con igual calidad de pasta ($W/C=0,5$) y volumen de pasta (72%).

Con respecto al efecto del aditivo modificador de fraguado en mezclas sometidas a diferentes temperaturas de curado (y por lo tanto diferentes temperaturas del hormigón), se comprobó que a mayores temperaturas los tiempos de inicio y fraguado disminuyen. Adicionalmente a temperatura de 40 °C disminuye en tiempo entre el inicio y el fin del fraguado. Este efecto se observó tanto para morteros con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia como para aquellos con cemento Puzolánico Corriente (ver Figura 54).

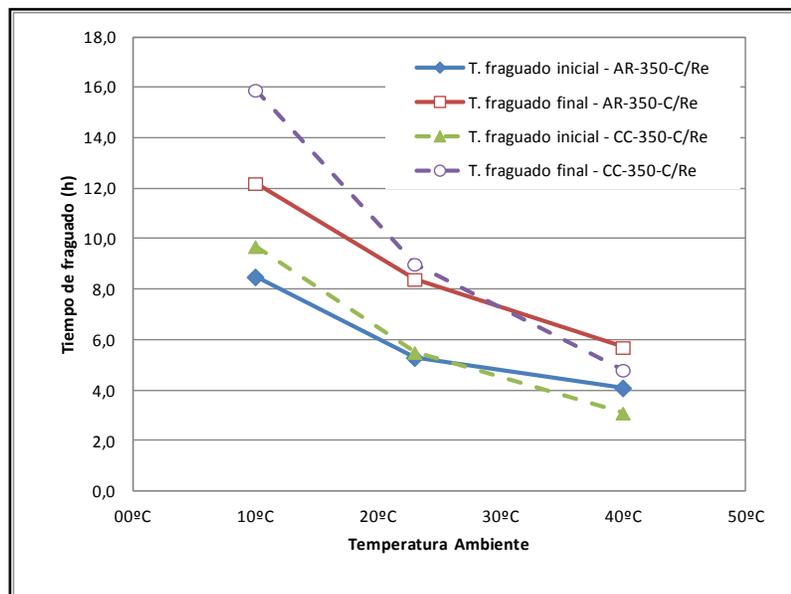


Figura 54: Efecto de la temperatura del hormigón, tipo de cemento y aditivo retardador de fraguado en los tiempos de inicio y fin de fraguado de hormigones con igual calidad de pasta y volumen absoluto de pasta.

6.3.2 Efecto de los Tiempos de Fraguado en los Parámetros de Madurez

El tiempo de fraguado representa el momento en que la pasta comienza a rigidizarse y da inicio al aumento importante de propiedades resistentes en el tiempo asociada (ASTM, 2005; Pinto y Hover, 1999; Pinto y Schindler, 2010). Es por esto que algunos autores sugieren que el comportamiento a diferentes temperaturas durante esta fase podría caracterizarse con un parámetro único de la mezcla. Dicho parámetro sería el mismo que el utilizado en el método de madurez (Temperatura Datum T_0 o Energía de Activación E_a) para estimar propiedades resistentes de una mezcla (Pinto y Hover, 1999).

Pinto y Hover (1999) relacionaron la Energía de Activación, utilizada en la ecuación de madurez, a los resultados de tiempos de fraguado a diferentes temperaturas ambientales. En dicha investigación se realizaron mezclas de mortero con cemento Portland y registraron el tiempo de fraguado en clima frío, estándar y caluroso, midiendo la

temperatura de la mezcla desde el inicio del mezclado hasta el término del fraguado. Este método se basa en que la velocidad de ganancia de resistencia a compresión k de una mezcla de hormigón o mortero, es inversamente proporcional a los tiempos de fraguado (Pinto y Hover, 1999), por lo tanto se podría calcular la Energía de Activación mediante un gráfico de Arrhenius similar al recomendado por ASTM C 1074 (ver Sección 5.5.1: Parámetros Método ASTM para Ecuaciones de Madurez).

Sin embargo, investigaciones recientes (Lachemi *et al.*, 2007; Schindler, 2009; Pinto y Schindler, 2010) indican que la sensibilidad a la temperatura de una mezcla es diferente según la etapa de hidratación en la cual esté, por lo tanto existirían dos valores para E_a y T_0 : uno que representa a la etapa de endurecimiento (propiedades resistentes, cálculo según metodología ASTM) y otro a la etapa de fraguado (propiedades de fraguado). El valor de Energía de Activación, para el caso del fraguado pareciera ser menor que en la etapa de endurecimiento (Schindler, 2009).

Schindler propone un método para determinar los parámetros de madurez al minimizar el error entre la resistencia a la penetración medida y estimada por madurez para diferentes temperaturas de curado (Schindler, 2009). Él estudió mezclas curadas a diferentes temperaturas de un patrón (23 °C) y con diferentes dosis de material cementante (ceniza volante y escoria de alto horno) y determinó que los tiempos de fraguado podían ser caracterizados por un único parámetro Energía de Activación, tal que los tiempos de inicio y término de fraguado quedaran expresados como tiempo equivalente a 23 °C (hormigón patrón).

En la Tabla 22 se resumen los valores obtenidos de Temperatura Datum y Energía de Activación según ASTM, Pinto y Hover y Schindler. Para los parámetros de madurez calculados según Pinto y Hover se presentan los resultados considerando los tiempos de inicio de fraguado y los tiempos entre inicio y término de fraguado.

Tabla 22: Temperatura Datum (T_0) y Energía de Activación (E_a) calculados según procedimientos propuestos por distintos autores.

ID Mezcla	ASTM, 2004		Pinto y Hover, 1999				Schindler, 2009	
			Tpo. de inicio de fraguado		Tpo. entre inicio y fin de fraguado			
	T_0 (°C)	E_a (J/mol)	T_0 (°C)	E_a (J/mol)	T_0 (°C)	E_a (J/mol)	T_0 (°C)	E_a (J/mol)
P-350-S/A	5,9	48.194	-10,7	34.378	-11,6	26.776	-10,3	21.394
P-450-S/A	4,2	40.932	-18,7	27.536	-152,0	21.434	-21,8	15.617
AR-350-S/A	-6,2	25.697	-3,5	43.120	-9,5	33.479	-5,4	26.563
AR-350-C/Re	-6,1	23.882	-19,6	27.433	-9,2	21.474	-17,0	19.065
AR-450-S/A	4,8	47.453	-1,4	45.431	-0,6	35.067	-15,7	34.733
CC-350-S/A	-31,9	12.404	-1,2	48.128	-4,2	37.423	-3,6	29.580
CC-350-C/Re	-27,1	14.415	-3,1	43.952	0,4	34.146	-5,6	29.496
CC-450-S/A	-1,9	34.155	-1,5	46.975	0,7	36.479	-2,8	29.276

De la tabla anterior se observa que según el método de Pinto y Hover al considerar el tiempo entre el inicio y el fin del fraguado se obtienen valores menores de Energía de Activación que al utilizar sólo los tiempos de inicio de fraguado. Esta diferencia confirma que el comportamiento y sensibilidad de las mezclas a la temperatura difiere según las distintas etapas de hidratación del cemento. Sin embargo al aplicar el método de Pinto y Hover y compararlo con los valores obtenidos por el método ASTM, se observa que para la mayoría de los casos en las mezclas con puzolanas naturales (AR y CC) los parámetros obtenidos de la etapa de fraguado son mayores a los obtenidos de la etapa de endurecimiento del hormigón. Esto contradice lo reportado hasta ahora por la bibliografía con respecto a la comparación de dichos comportamientos (Schindler, 2009; Pinto y Schindler, 2010).

El método de Schindler, al minimizar el error entre la predicción y la medición de tiempos de fraguado, debería entregar valores más confiables de Energía de Activación y Temperatura Datum para estimar tiempos de fraguado utilizando el concepto de

madurez. Si se compara también estos resultados con aquellos determinados por ASTM, para los cementos Puzolánico Corriente dichos parámetros son mayores. Para el caso de los hormigones fabricados con cementos Portland Puzolánico Alta Resistencia, los valores según Schindler están levemente por debajo que los calculados según ASTM.

En la Figura 55 se muestran las diferentes curvas de resistencia a la penetración de una mezcla para distintas temperaturas de curado. Se observa el ajuste a la curva patrón (23 °C) de los demás tiempos de fraguado utilizando un sólo parámetro T_0 .

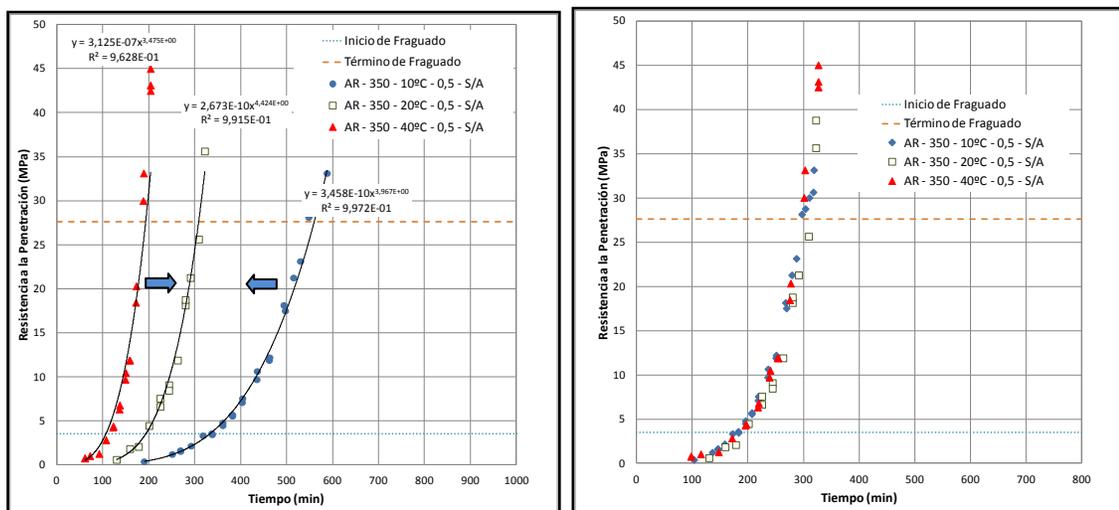


Figura 55: Relación resistencia a la penetración vs tiempo para hormigones con 350 kg/m³ de cemento AR según (a) distintas temperaturas del hormigón y (b) ajustados a una sola curva patrón según Schindler usando T_0 y función de Saul-Nurse.

En la Figura 56 se muestran los tiempos de inicio de fraguado para las diferentes mezclas estudiadas y en la Figura 57 los tiempos equivalentes a 23 °C. Se observan que el concepto de tiempo equivalente de madurez es aplicable a la mayoría de las temperaturas de curado y mezclas estudiadas.

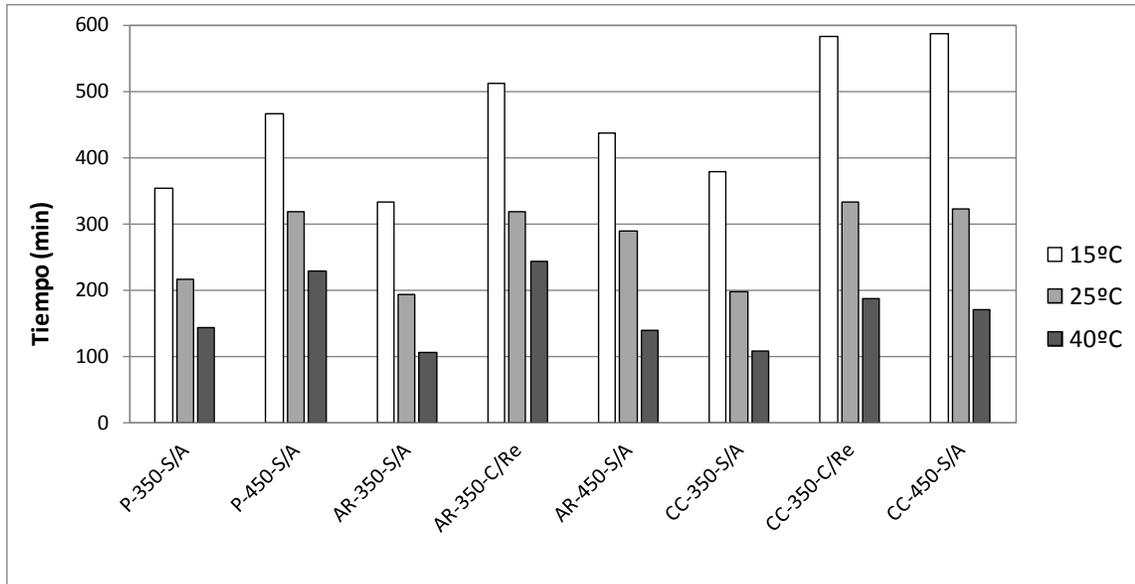


Figura 56: Tiempo de inicio de fraguado.

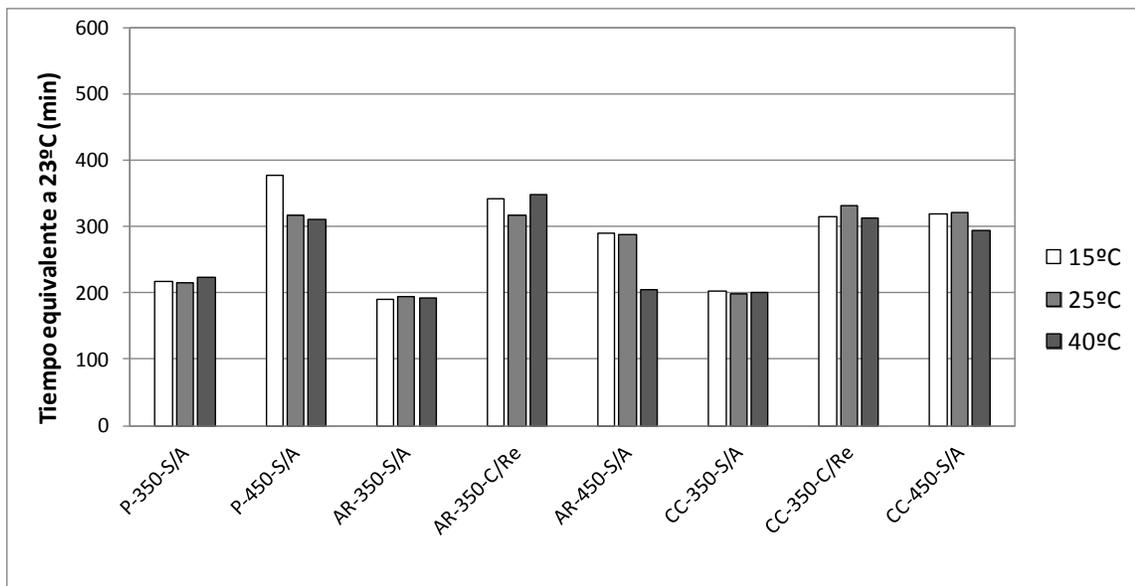


Figura 57: Tiempo de inicio de fraguado a edad equivalente (23°C).

En la Tabla 23 se presentan los tiempos de fraguado de las diferentes mezclas estudiadas y el porcentaje de error al estimar los tiempos de inicio y fin de fraguado según el método de Schindler. Se expresó como valor positivo a la subestimación y negativo a la

sobreestimación de los tiempos de fraguado, además se utilizó la función de Saul-Nurse para calcular el tiempo equivalente a diferentes temperaturas. Se observa que para la mayoría de datos existe un error menor a 10%. Sólo para el caso de las mezclas AR-450-S/A y CC-350-C/Re con curado a 40 °C (valores sombreados) existe una sobreestimación mayor, por lo que se asumen como errores en el ensayo de tiempos de fraguado.

Tabla 23: Porcentaje de error de estimación de tiempos de fraguado según método propuesto por Schindler y con función de Saul-Nurse.

Tipo Cemento	Dosis de Cemento	Aditivo	Temperatura de Curado	VALORES MEDIDOS		VALORES ESTIMADOS		ERROR MÉTODO SCHINDLER	
				Tiempo de fraguado	Tiempo de fraguado	Tiempo de fraguado	Tiempo de fraguado	Error tiempo de fraguado	Error tiempo de fraguado
Portland	350	S/A	10°C	354	580	357	550	-1,0%	5,1%
		S/A	40°C	143	235	145	226	-1,7%	3,9%
	450	S/A	10°C	466	627	449	611	3,7%	2,6%
		S/A	40°C	229	357	231	316	-1,0%	11,5%
Puzolánico Alta Resistencia	350	S/A	10°C	333	560	358	570	-7,6%	-1,8%
		S/A	40°C	107	193	120	192	-12,4%	0,8%
		c/Re	10°C	511	733	479	750	6,3%	-2,4%
		c/Re	40°C	244	339	224	355	8,1%	-4,7%
	450	S/A	10°C	436	624	443	594	-1,6%	4,8%
		S/A	40°C	139	190	200	400	-44,2%	-110,8%
Puzolánico Corriente	350	S/A	10°C	379	756	386	760	-2,0%	-0,5%
		S/A	40°C	109	225	117	245	-7,4%	-8,9%
		c/Re	10°C	582	953	579	934	0,5%	2,0%
		c/Re	40°C	186	290	209	337	-12,1%	-16,1%
	450	S/A	10°C	587	881	645	921	-9,8%	-4,5%
		S/A	40°C	171	249	192	281	-12,1%	-12,9%
							Promedio Valor Absoluto Errores	8,2%	12,1%

Según el método de Schindler se recomienda la utilización de un valor promedio para los parámetros de madurez en tiempos de fraguado según tipo de cemento: valores cercanos a los 30.000 J/mol para E_a y -4,0 °C para T_0 en hormigones fabricados con cemento Puzolánico Corriente; 26.000 J/mol y -12,7 °C para hormigones con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia y 18.000 J/mol y -16,1 °C para hormigones con cemento Portland.

6.4 Conclusiones y Recomendaciones

Si bien los tiempos de fraguado de la pasta de cemento son representativos de los tiempos en que el hormigón ya no es trabajable, de los ensayos realizados se concluye que el procedimiento para determinar tiempos de fraguado está fuertemente influenciado por la cantidad de áridos en la mezcla. Esto concuerda con la diferencia entre tiempos de fraguado de la pasta de cemento y un mortero de hormigón: a mayor porcentaje de árido, menores son los tiempos de inicio y fin de fraguado.

Es importante el uso de aditivos a la hora de modificar tiempos de fraguado. Para hormigones con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia se obtuvieron retrasos del inicio de fraguado entre 2 hasta más de 3 horas para el caso de curados en clima frío (10 °C). Para hormigones con cemento Puzolánico Corriente, el uso de aditivos modificó entre 1 y más de 3 horas el fraguado (según las condiciones ambientales).

Para aquellos hormigones fabricados con aditivos retardadores de fraguado, se observó que a mayor temperatura de curado disminuyó el tiempo entre el inicio y el fin del fraguado. Si bien utilizando aditivos se retrasa el inicio del fraguado, el fin del fraguado se ve levemente adelantado cuando se experimentan altas temperaturas. Esto se podría explicar debido a que el retardante actúa separando las partículas de cemento y retrasa el comienzo de la hidratación. Una vez activado el mecanismo de hidratación del cemento, al estar las partículas más separadas, dicho proceso ocurriría más rápido y se incrementa aún más al tener un curado a altas temperaturas.

El método de Schindler presentó buenos resultados para estimar los tiempos de fraguado del hormigón a diferentes temperaturas de curado, llegando a errores promedio entre un 8 y un 12% para los tiempos de inicio y fin de fraguado respectivamente.

Con respecto a los parámetros de madurez calculados para la etapa de fraguado, los diferentes métodos entregan valores dentro del rango reportado por la literatura: entre

12.000 y 48.000 J/mol para E_a y entre -30 y 5 °C para T_0 . Sin embargo, entre los diferentes métodos difieren en más de un 50% en algunos casos.

Para el comportamiento antes del fraguado se recomienda usar el método de Schindler, ya que minimiza los errores para la determinación de los tiempos de fraguado.

7. CONCLUSIONES GLOBALES Y RECOMENDACIONES

Actualmente, debido a las especificaciones por durabilidad y resistencia, los hormigones contienen elevadas dosis de cemento. Esto genera un importante aumento de temperatura a temprana edad que puede generar no sólo agrietamiento por diferencial térmico, sino que también disminuir las propiedades mecánicas en el largo plazo. Se ha estudiado previamente que temperaturas máximas del orden de 75 °C pueden disminuir la resistencia en un 10% si se compara a un curado estándar.

El calor de hidratación del cemento juega un rol fundamental no sólo en la tasa de ganancia de resistencia a temprana edad, sino también en el máximo calor generado por unidad de material cementicio y volumen de hormigón. Es por esto que el uso de adiciones cementantes ha ido en aumento, además de su beneficio en la reducción de costo de fabricación.

El fenómeno de pérdida de resistencia a altas temperaturas ha sido atribuido, primero a la mala calidad de los productos de hidratación. Al tener una tasa de hidratación más elevada, no hay tiempo suficiente para la difusión de los productos de hidratación lejos de las partículas de cemento, ni para una precipitación uniforme en el espacio intersticial (no así a temperaturas de curado más bajas). Segundo, si el curado se hace a elevadas temperaturas, cuando el agua comienza el proceso de evaporación, este aumento de volumen en la pasta que aún no adquiere resistencia suficiente, puede generar microfisuras a temprana edad que inevitablemente dañen las propiedades resistentes del hormigón en el largo plazo. Este fenómeno se reporta para cementos Portland pero también para otros hormigones con adiciones cementantes como escoria de alto horno.

En la presente investigación se estudiaron los efectos de elevadas temperaturas de curado en hormigones con cementos Portland con adiciones cementantes, específicamente con puzolanas naturales. Se estudió el efecto de la temperatura en: la

predicción de resistencia a compresión mediante el método de madurez; la comparación de resistencia con la usada en especificaciones técnicas; y en los tiempos de fraguado. Para esto se calcularon ciclos térmicos experimentados por hormigones masivos estructurales y se aplicaron en laboratorio a probetas cilíndricas de hormigón.

7.1 Efecto de la Temperatura en la Resistencia del Hormigón

- Al comparar la resistencia de todos los hormigones sometidos a ciclos térmicos con aquellos curados a temperatura constante de 23 °C, se observa que en prácticamente todos los casos existe un deterioro a largo plazo. En algunos hormigones sometidos a ciclos térmicos la disminución de resistencia ya se presenta antes de 14 días y en otros casos sobre los 60 días.
- Si bien la temperatura máxima alcanzada impacta en la resistencia a 28 días, existe un mayor impacto negativo a menor contenido de puzolana natural a largo plazo. Para aquellos hormigones fabricados con 35% de puzolana natural el efecto de la disminución de ganancia de resistencia se ve influenciado a partir de temperaturas cercanas a los 75 °C. En el caso de usar 15% de PN, la disminución se refleja desde los 70 °C y para los hormigones con 0% de PN a partir de los 55 °C.
- Para cementos Portland el hormigón curado bajo condiciones normalizadas logra resistencias entre 20 y 60% mayores a las obtenidas en un curado bajo ciclo térmico, a 28 días.
- Para los hormigones con 15% de puzolana natural (Alta Resistencia) a temprana edad si bien existe una mayor magnitud de resistencia a compresión en hormigones bajo ciclo térmico, en comparación a un curado estándar, esta diferencia se reduce antes de los 14 días. A temprana edad el aumento de resistencia no es tan marcado en estos cementos (como sí lo es en los cementos Puzolánico Corriente (35% de PN) y

Portland), ya que en éstos la finura influye fuertemente en la hidratación rápida a temprana edad, y en la peor calidad de la hidratación que comienza a reflejarse a muy corta edad. El hormigón curado bajo condiciones normalizadas logra resistencias entre 25 y 45% mayores a las obtenidas en un curado bajo ciclo térmico para aquellos hormigones con cementos Alta Resistencia a más de 210 días.

- En el caso de hormigones con 35% de puzolana natural se observa que sólo para los casos de temperatura inicial 40 °C (y temperaturas máximas de 70 y 80 °C) existe un deterioro de la resistencia y éste se evidencia desde los 60 días. Además la alta temperatura, al hacer reaccionar el clínquer con mayor rapidez, hizo aumentar también la reacción puzolánica a temprana edad. El hormigón curado bajo condiciones normalizadas puede lograr resistencias entre 0 y 32% mayores a las obtenidas en un curado bajo ciclo térmico para aquellos hormigones con cementos Puzolánico Corriente a más de 210 días.

7.2 Método de Madurez

- Con respecto a los valores calculados de Temperatura Datum (T_0) según el método ASTM, éstos fueron cercanos a 5 °C para cementos Portland; a 0 °C para hormigones con cemento Alta Resistencia y a -20°C para hormigones con cemento Corriente. Con respecto a valores de Energía de Activación (E_a), éstos son del orden de 45.000 J/mol para cementos Portland, 30.000 J/mol para cementos Alta Resistencia y 20.000 J/mol para cementos Corriente. Si bien en el caso de los cementos Corriente, éstos presentaron valores que escapan a lo reportado en la bibliografía (Carino, 1991; Brooks *et al.*, 2007), para el caso de las mezclas con 450 kg/m³ sí se obtiene un valor de -1,9 °C, que estaría del orden de lo reportado en estudios mencionados. Para estos últimos cementos también, en el caso de usar 350 kg/m³ de dosis de cemento, los valores bordean los -30 °C. Estos valores no serían coherentes con la definición de T_0 y se deberían realizar más estudios para determinar dicho valor.

- Al evaluar la exactitud de la predicción con el método de madurez ASTM se concluye que tiene en promedio un 25% de error y a temperaturas muy altas (80 a 90 °C) pueden sobreestimar hasta un 50% de resistencia, por lo que no se sugiere utilizar este método de predicción para la resistencia a compresión en el caso de experimentar temperaturas sobre 80 °C. Al utilizar la función de tiempo equivalente lineal de Saul-Nurse el método entrega mejores resultados, y si además se usa $T_0 = -10$ °C el error promedio es de un 20% y sería conservador en la mayoría de los casos estudiados al estimar la resistencia a compresión hasta 7 días. También se recomienda el uso de la ecuación hiperbólica para evaluar el tiempo equivalente, en cualquier tipo de cemento, ya que representa de mejor forma el efecto de “resistencia techo” presente en los hormigones sometidos a ciclos térmicos. En el caso de querer obtener incluso mejores estimaciones, se propone un método de ajuste por mínimos cuadrados para el cálculo de T_0 y E_a utilizando cubos de mortero, de manera de minimizar el error entre la estimación y la medición de resistencia. Al calcular por dicho procedimiento, se obtienen valores de T_0 en un rango de -4,2 a 4,1 °C y valores de E_a entre 23.000 y 55.000 J/mol.
- Con el método modificado propuesto (minimizando el error utilizando cubos de mortero) y utilizando una ecuación que represente una “resistencia techo” a largo plazo generada por las altas temperaturas (como una ecuación hiperbólica o exponencial), se puede disminuir el error promedio de 11% de sobreestimación usando la función de Saul-Nurse, la cual es sencilla y fácil de implementar en terreno.

7.3 Tiempos de Fraguado

- Con respecto a los parámetros de madurez calculados para la etapa de fraguado, los diferentes métodos (Shindler y Pinto y Hover) entregan valores dentro del rango reportado por la literatura: entre 12.000 y 48.000 J/mol para E_a y entre -30 y 5 °C

para T_0 . Sin embargo, entre los diferentes métodos difieren en más de un 50% en algunos casos.

- Para el comportamiento antes del fraguado se recomienda usar el método de Schindler para estimar la edad en que la pasta comienza a fraguar a diferentes temperaturas de colocación.

7.4 Investigaciones Futuras

Algunos aspectos que no fueron abordados en esta investigación y que se plantean como temas importantes para investigaciones futuras:

- Estudiar cementos con diferentes porcentajes de reemplazo de puzolanas naturales u otra adición cementante. Que los hormigones sean dosificados tal que tengan una resistencia y cono característicos, de manera de evaluar a igual desempeño potencial el comportamiento a altas temperaturas.
- Medir la evolución de la hidratación mediante microscopía electrónica (SEM). De esta manera se podrá determinar la calidad de los productos de hidratación y una posible fisuración por expansión de vapor de agua al interior del hormigón.
- Analizar otras propiedades de interés a temprana edad además de la resistencia a compresión, como el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción directa o indirecta del hormigón.
- Evaluar la durabilidad a largo plazo de los hormigones con ensayos de permeabilidad ión cloruro.
- Estudiar el efecto de diferentes condiciones de humedad de curado, para incorporar la variable de retracción por secado.

REFERENCIAS

- ACI116. (2000). *R-00: Cement and Concrete Terminology*. American Concrete Institute.
- ACI207. (2005). *1R-05: Guide to Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI207. (2007). *2R-07: Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI207. (2005). *4R-05: Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI212. (2010). *3R-10: Report on Chemical Admixtures for Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI228. (2003). *1R-03: In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*. American Concrete Institute.
- ACI231. (2003). *Behavior of Concrete at Early Ages - Draft*. American Concrete Institute.
- ACI232. (2003). *2R-03: Use of Fly Ash in Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI233. (2003). *R-03: Slag Cement in Concrete and Mortar*. American Concrete Institute.
- ACI305. (1999). *R-99: Hot Weather Concreting*. American Concrete Institute.
- ACI308. (2001). *R-01: Guide to Curing Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI318. (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute.
- AFNOR. (1998). *Standard NFP15-436-98*. Paris.
- Aguilar, C. (2005). *Tesis de Doctorado: Estudio del comportamiento y desarrollo de una metodología de predicción de la retracción hidráulica de hormigones*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- ASTM. (2009). *C 150/ C 150M-09: Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International.

- ASTM. (2005). *C 403/C 403M-05: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance*. ASTM International.
- ASTM. (2005). *C 494/C 494M-05: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International.
- ASTM. (2004). *C 1074-04: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*. ASTM International.
- ASTM. (2005). *C 618-05: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Pozzolan for Use in Concrete*.
- Bentz, D. P. (2010). Agrietamiento del Concreto a Edad Temprana: Causas, Medidas y Mitigación. *National Institute of Standards and Technology*.
- Bentz, D. P., y Peltz, M. A. (2008). Reducing Thermal and Autogenous Shrinkage Contributions to Early-Age Cracking. *ACI Materials Journal* , 105 (4), 414-420.
- Bentz, D., y Stutzman, P. (2006). Curing, Hydration, and Microstructure of Cement Paste. *ACI Materials Journal*, 103 (5), 348-356.
- Bianchi, A. (1991). *Cálculo Indirecto de la Tasa de Generación de Calor de Hidratación en Hormigones*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Brooks, A., Schindler, A., y Barnes, R. (2007). Maturity Method Evaluated for Various Cementitious Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering* , 19 (12), 1017-1025.
- Bustos, F. (2011). *Ms. Cs. Thesis: Understanding Performance of Concrete Using Natural Pozzolans Against Corrosion*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Byfors, J. (1980). *Plain concrete at early ages*. Swedish Cement and Concrete Research Institute Report 3:80.
- Cannon, R. P. (1986). Temperature-Matched Curing: Its Development, Application and Future Role in Concrete Practice and Research. *Concrete (London)*, Parte I: V.20, No. 7, Julio 1986, 27-30; Parte 2: V.20, No. 10, Octubre 1986, 28-32; Parte 3: V. 21, No. 2, Febrero 1987, 33-34.
- Carino, N. J. (1991). CRC handbook on nondestructive testing of concrete. En M. V.M., y N. Carino, *CRC Handbook on nondestructive testing of concrete* (págs. 101-146). CRC.

Carino, N. J., y Lew, H. S. (2001). *The Maturity Method: From Theory to Application*. National Institute of Standards and Technology.

Carino, N., y Lew, H. (1983). Temperature Effects on Strength-Maturity Relations of Mortar. *ACI Journal* , 177-182.

Carino, N., y Tank, R. (1992). Maturity Functions for Concrete Made with Various Cements and Admixtures. *ACI Materials Journal* , V. 89 (2), 188-196.

Carlson, R. W. (1937). The Significance of Early Heat Liberation of Cement Paste. *Proc. Highway Research Board*, Vol. 17, pág. 360.

Carrasquillo, R. (2009). Prácticas Constructivas Recomendadas en Hormigones Masivos. *Seminario Internacional de Hormigones Masivos Estructurales*. Santiago.

Carrasquillo, R. (2009). Tecnología del Hormigón Aplicada al Caso de Hormigones Masivos. *Seminario Internacional de Hormigones Estructurales Masivos*. Santiago.

Chin, F. (1971). Relation between strength and maturity of concrete. *ACI Journal* , 68 (3), 196-203.

Constantino, C., y Carrasquillo, R. (2000). Implementation of Concrete Maturity Method Testing Procedures and Related Specifications. Texas: Center for Transportation Research Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin.

Constantino, C., y Carrasquillo, R. (2000). Maturity Method.

Dodson, C. J., y Rajagopalan, K. S. (1979). Field tests verify temperature effects on concrete strength. *Concrete International* , 1 (12), 26-30.

Emborg, M. (1989). *Thermal stress in concrete structures at early ages - Doctoral thesis*. Lulea: Lulea University of Technology.

Fernández, C. (2009). Hormigones Masivos: Temas Relevantes para el Constructor. *Seminario Internacional de Hormigones Masivos Estructurales*. Santiago: ICH.

Ferreira, H. (2004). *Tesis de Magister: Evaluación de la Aplicabilidad de Ensayos No Destructivos para el Control de Calidad del Hormigón*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

Freiesleben-Hansen, P., y Pedersen, E. J. (1985). Curing of Concrete Structures. *CEB Information Bulletin 166* , 42 p.

Freiesleben-Hansen, P., y Pedersen, E. (1977). Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete. *Nordisk Betong* , 1 (19), 19-34.

Gajda, J., y Alsamsam, E. (2006). *Engineering Mass Concrete Structures*. Professional Development Series - Portland Cement Association.

Gajda, J., y VanGeem, M. (2002). Controlling Temperatures in Mass Concrete. *Concrete International* , 59-62.

García, A., Castro-Fresno, D., y Polanco, J. A. (2008). Evolution of penetration resistance in fresh concrete. *Cement and Concrete Research* , 38, 649-659.

Goto, S., y Roy, D. M. (1981). The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research* , 11 (4), 575-579.

Hewlett, P. C. (1988). *Cement Admixtures - Uses and Applications*. Longman Scientific and Technical, UK.

INN. (1968). *NCh148.Of68: Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales*.

INN. (1985). *NCh170.Of85: Hormigón - Requisitos Generales*. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.

Jensen, O. M., y Freiesleben Hansen, P. (2001). Autogenous deformation and RH-change in perspective. *Cement and Concrete Research* , 1859-1865.

Jonasson, J., Groth, P., y Hedlund, H. (1995). Modeling of temperature and moisture field in concrete to study early age movements as a basis for stress analysis. (E. y. R. Springenschmid, Ed.) *RILEM Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages* , 45-52.

Kanda, T., Sakuramoto, F., y Suzuki, K. (1992). Compressive strength of silica fume concrete at higher temperatures. (A. S.-1. V. M. Malhotra, Ed.) *Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete* , 132, 1089-1104.

Kehl, R., y Carrasquillo, R. (1998). *Investigation of the use of Match Cure Technology in the Precast Concrete Industry*. Center for Transportation Research, The University of Texas. Austin: Bureau of Engineering Research.

- Kim, J. K., Moon, Y. H., y Eo, S. H. (1998). Compressive Strength Development of Concrete with different Curing Time and Temperature. *Cement and Concrete Research* , 28 (12), 1761-1773.
- Kjellsen, K., y Detwiler, R. (1993). Later-age strength prediction by a modified maturity model. *ACI Material Journal* , 90 (3), 220-227.
- Kjellsen, K., Detwiler, R., y Gjorv, O. (1991). Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 21 (1), 179-189.
- Kondo, R., y Ueda, S. (1969). Kinetics and Mechanisms of the Hydration of Cements. *Proceedings 5th International Symposium on the Chemistry of Cement*, 2, pág. 203.
- Masana, C. (2001). *Tesis de Magíster: Desarrollo de un procedimiento para la predicción de la retracción hidráulica en hormigones fabricados con cementos chilenos*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- McIntosh, J. D. (1949). Electrical curing of concrete. *Magazine of Concrete Research* , 1 (21).
- Mehta, P. K., y Monteiro, P. J. (2006). *Concrete: Microestructure, Properties and Materials*. McGraw-Hill.
- Miretti, R. E., Grether, R. O., Passerino, C. R., y Carrasco, M. F. (1998). Evaluación de Hormigones Mediante Ultrasonido y Esclerometría. *Revista Ingeniería de Construcción*, 17, 48-59.
- Neville, A. M. (1996). *Properties of Concrete*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Odler, I., y Abdul-Maula, S. (1987). Effects of Chemical Admixtures on Portland Cement Hydration. *Cement Concrete and Aggregates* , 9 (1), 38-43.
- Paul, A. (2010). *Ms. Cs. Thesis: Characterizing Lightweight Aggregates For Improving Internat Curing of Concrete*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Pinto, R. C., y Hover, K. C. (1999). Application of Maturity Approach to Setting Times. *ACI Materials Journal* , 686-691.

Pinto, R. C., y Schindler, A. K. (2010). Unified modeling of setting and strength development. *Cement and Concrete Research* , 40, 58-65.

Plowman, J. M. (1956). Maturity and the Strength of Concrete. *Magazine of Concrete Research* , 8 (22), 13-22.

Powers, T. C. (1947). A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete. *Proceedings Highway Research Board, Vol. 27*, págs. 178-188. Washington D.C.

Pratt, P. L., y Ghose, A. (1983). Electron Microscope Studies of Portland Cement Microstructures During Setting and Hardening. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* , A310, 93.

Products-Engineering. (2008). *Sure Cure*. Recuperado el 03 de 07 de 2011, de <http://www.concretecuring.com/>

Ramlochan, T., Zacarias, P., Thomas, M., y Hooton, R. (2003). The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part I: Expansive behaviour. *Cement and Concrete Research* , 33, 807-814.

Rawhouser, C. (1945). Cracking and Temperature Control of Mass Concrete. *ACI Journal* , 41 (4), 305-348.

Riding, K., Poole, J., Folliard, K., Juenger, M., y Schindler, A. (2011). New Model for Estimating Apparent Activation Energy of Cementitious Systems. *ACI Material Journal*, 108 (No. 5), 550-557.

Riding, K., Poole, J., Schindler, A., Juenger, C., y Folliard, K. (2006). Evaluation of Temperature Prediction Methods for Mass Concrete Members. *ACI Materials Journal* , 103 (5), 357-365.

Roy, D. M. (1989). Fly Ash and Silica Fume Chemistry and Hydration. *Proceedings of the Trondheim Conference, Vol. 1*, págs. 117-139.

Saul, A. G. (1951). Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. *Magazine of Concrete Research* , 2 (No. 6), 127-140.

Schindler, A. (2004). Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials. *ACI Materials Journal* , 101 (1), 72-81.

Schindler, A. (2009). The Effect of Temperature on Early-Age Behavior of Concrete. New Orleans: ACI Convention Fall 2009.

- Schindler, A., y Folliard, K. (2005). Heat of Hydration Models for Cementitious. *ACI Materials Journal* , 102 (1), 24-33.
- Vega, H., y Guarda, O. (2009). Experiencia de un Hormigón Masivo Estructural. *Seminario Internacional de Hormigones Masivos Estructurales*. Santiago: ICH.
- Verbeck, G. (1965). Cement Hydration Reactions at Early Ages. *Journal of the PCA and Development Laboratories* , 57-63.
- Verbeck, G. J., y Foster, C. W. (1956). *Long-Time Study of Cement Performance in Concrete*. Proc.
- Verbeck, G. J., y Helmuth, R. H. (1968). Structure and Physical Properties of Cement Pastes. *Proc., 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Tokyo , III*, 1-32.
- Videla, C., y Aguilar, C. (1998). Predicción del Tiempo de Desmolde de Hormigón al Vacío por Medio del Concepto de Madurez. *Revista Ingeniería y Construcción* , 18, 62-71.
- Videla, C., y Parada, O. (1988). Predicción de la Resistencia Potencial del Hormigón. *Revista Ingeniería de Construcción* , 5, 17-34.
- Videla, C., Covarrubias, J. P., y Pascual, J. M. (1995). Comportamiento de Hormigones Fabricados con Distintas Clases de Cemento ante Climas Extremos. *Revista Ingeniería y Construcción* , 14, 32-46.
- Wade, S., Nixon, J., Schindler, A., y Barnes, R. (2010). Effect of Temperature on the Setting Behavior of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE* , 214-222.
- Weaver, J., y Sadgrove, B. M. (1971). *Striking times of formwork-tables of curing periods to achieve given strengths*. London: Construction Industry Research and Information Association.

ANEXOS

ANEXO A: Caracterización de Cementos

Para la presente investigación se consideraron tres clases de cementos: Portland, Portland Puzolánico grado Alta Resistencia y Puzolánico grado Corriente. Se les realizaron ensayos para determinar sus características de acuerdo a la normativa chilena y extranjera (INN, 1968; ASTM, 2009).

Para la confección de morteros y hormigones se utilizó una mezcla 1:1 en peso con dos cementos de diferentes proveedores, pero de la misma clase y grado. Las combinaciones se presentan a continuación:

Portland: Cemento Portland Polpaico y Cemento Super Melón.

Portland Puzolánico Alta Resistencia: Cemento Polpaico P400 y Cemento Melón Extra.

Puzolánico Corriente: Cemento Polpaico Especial y Cemento Melón Especial.

Desde la Tabla 24 a la Tabla 26 se muestran los promedios de los resultados obtenidos para las propiedades físicas, mecánicas y térmicas medidas a los diferentes cementos estudiados. En general para todas las propiedades estudiadas, la mezcla 1:1 resultó similar al promedio algebraico de las propiedades de los cementos individuales.

Tabla 24: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del cemento Portland.

Propiedad	Unidad	Portland				
		Polpaico	Melón	Mezcla 1:1	Promedio Polpaico-Melón	Requisitos NCh148
Tiempo de fraguado inicial	min	140	150	150	145	> 45
Tiempo de fraguado final	min	210	220	220	215	< 600
Peso específico		3,168	3,158	3,163	3,163	--
Finura Blaine	cm ² /gr	3095	4779	3930	3937	--
Resistencia a Compresión						
1	Mpa	14	24,2	18,7	19,1	--
3	MPa	29,3	40,7	35,5	35,0	--
7	MPa	42,8	53,4	48,5	48,1	> 25
28	MPa	60,7	65,4	63	63,1	> 35
Resistencia a Flexotracción						
1	MPa	2,8	5,3	4,3	4,1	--
3	MPa	5	6,9	5,8	6,0	--
7	MPa	6,7	7,8	7,5	7,3	> 4,5
28	MPa	8	8	8,5	8,0	> 5,5
Calor de Hidratación						
0,5	cal/gr	32	42	48	37	--
1	cal/gr	54	67	65	61	--
3	cal/gr	62	74	70	68	--
5	cal/gr	63	75	70	69	--
7	cal/gr	64	75	70	70	--
Tiempo de Temperatura max	hrs	21,0	20,0	16,0	21	--

Tabla 25: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia.

Propiedad	Unidad	Portland Puzolánico AR				
		Polpaico	Melón	Mezcla 1:1	Promedio Polpaico-Melón	Requisitos NCh148
Tiempo de fraguado inicial	min	180	150	160	165	> 45
Tiempo de fraguado final	min	260	230	240	245	< 600
Peso específico		2,922	2,936	2,931	2,929	--
Finura Blaine	cm ² /gr	4713	5002	4840	4858	--
Resistencia a Compresión						
1	Mpa	13,4	20,8	17,2	17,1	--
3	MPa	29,3	35,6	32,7	32,5	--
7	MPa	39,5	43,2	41,3	41,4	> 25
28	MPa	51,4	53,7	51,9	52,6	> 35
Resistencia a Flexotracción						
1	MPa	3,2	4,3	3,6	3,8	--
3	MPa	5	5,7	5,6	5,4	--
7	MPa	6,4	6,2	6,4	6,3	> 4,5
28	MPa	7,5	7,4	7,9	7,5	> 5,5
Calor de Hidratación						
0,5	cal/gr	28	50	43	39	--
1	cal/gr	50	67	59	59	--
3	cal/gr	55	67	63	61	--
5	cal/gr	55	67	64	61	--
7	cal/gr	55	67	64	61	--
Tiempo de Temperatura max	hrs	23,0	16,0	18,0	20	--

Tabla 26: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del cemento Pozolánico Corriente.

Propiedad	Unidad	Puzolánico Corriente				
		Polpaico	Melón	Mezcla 1:1	Promedio Polpaico-Melón	Requisitos NCh148
Tiempo de fraguado inicial	min	170	180	190	175	> 60
Tiempo de fraguado final	min	220	240	260	230	< 720
Peso específico		2,832	2,819	2,823	2,826	--
Finura Blaine	cm ² /gr	4773	4317	4452	4545	--
Resistencia a Compresión						
1	Mpa	7,1	11,3	8,6	9,2	--
3	MPa	16,1	20,6	18,6	18,4	--
7	MPa	23,8	27,6	25,7	25,7	> 18,0
28	MPa	35,7	38,4	38,6	37,1	> 25,0
Resistencia a Flexotracción						
1	MPa	1,6	2,5	2,1	2,1	--
3	MPa	3,1	3,9	3,6	3,5	--
7	MPa	4,3	5,2	4,8	4,8	> 3,5
28	MPa	6,3	6,7	7	6,5	> 4,5
Calor de Hidratación						
0,5	cal/gr	24	26	26	25	--
1	cal/gr	41	45	41	43	--
3	cal/gr	47	48	49	48	--
5	cal/gr	47	49	50	48	--
7	cal/gr	47	49	50	48	--
Tiempo de Temperatura max	hrs	20,5	20,0	22,0	20	

ANEXO B: Sistema de Ensayo Probetas Sometidas a Ciclos Térmicos

En los hormigones simulados bajo ciclo térmico en hornos, se procedió a realizar el siguiente mecanismo.

- Los materiales fueron acondicionados por al menos 24 horas antes del mezclado, a las temperaturas iniciales correspondientes (10, 23 o 40 °C).
- La confección de probetas se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 39-10 y en cilindros de 100x200 mm.
- Las probetas luego de confeccionadas, se mantuvieron a su temperatura inicial entre 6 a 7 horas, dependiendo del tipo de cemento.
- El curado se realizó sumergido desde el final del lapso de 6 a 7 horas hasta más de 210 días.
- Para el ensayo a compresión, se procedió a utilizar una prensa y cilindros concéntricos de metal para la nivelación de superficies.

En las Figura 58 y 59 se presentan parte del equipamiento y ensayos utilizados y realizados en la presente investigación.



Figura 58: Probetas cilíndricas antes de ser sometidas a ciclos térmicos.



Figura 59: Hormigón en piscinas sometidos a ciclos térmicos simulando hormigones masivos.

Para estudiar la importancia de los mecanismos de desmolde y enfriamiento luego de 7 días, se fabricó un hormigón con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia y dosis 350 kg/m^3 a temperatura inicial de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ y razón W/C 0,47. Con los datos se determinó que no influyen en la resistencia a mediano y largo plazo.

Se evaluaron 4 casos:

- Hormigón curado normalizado en cámara de curado a $23 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Hormigón curado en ciclo térmico con desmolde frío (desmolde utilizando agua fría para remover el molde).
- Hormigón curado en ciclo térmico con desmolde caliente (desmolde sin utilizar agua fría, sino que sólo por la diferencia de coeficientes de expansión del molde se removió la probeta), y enfriado violentamente desde el día 7 al día 8.
- Hormigón curado en ciclo térmico con desmolde caliente y enfriado gradual en *coolers* térmicos.

Los resultados se presentan en Figura 60. Los valores de resistencia medidos en probetas bajo curado normalizado ($23 \text{ }^\circ\text{C}$) estuvieron por debajo de aquellas resistencia en hormigones curados bajo ciclos térmicos, salvo a 28 días cuando esta resistencia

sobrepasa levemente los valores medidos de los hormigones en ciclo térmico. En el caso de tener un desmolde con enfriado violento, la resistencia aumentó levemente con respecto a aquellos en que el enfriamiento fue lento.

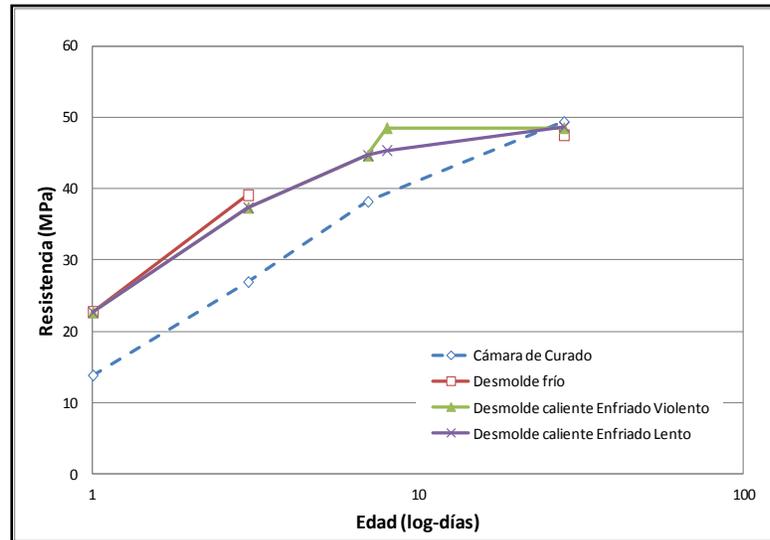


Figura 60: Resistencia a compresión en el tiempo de hormigones sometidos a ciclos térmicos y a curado normalizado bajo diferentes condiciones de enfriamiento y desmolde.

ANEXO C: Ciclos Térmicos Medidos en Probetas de Hormigón

Al realizar la comparación entre las resistencias máximas calculadas (según método Schmidt) y medidas en las probetas de control en los hormigones sometidos a ciclos térmicos, se observa lo representado en la Figura 61. Se observan las rectas de error $\pm 10\%$ (líneas segmentadas). Desde la Figura 62 a la Figura 78 se presentan las temperaturas medidas en el tiempo para las diferentes mezclas estudiadas.

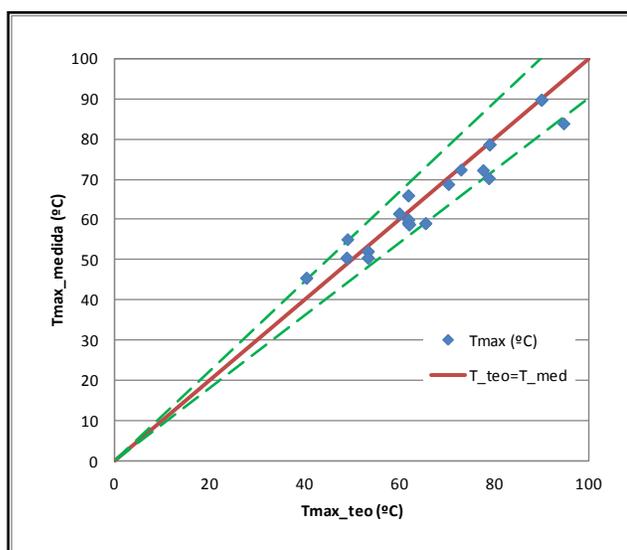


Figura 61: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-10°C-S/A.

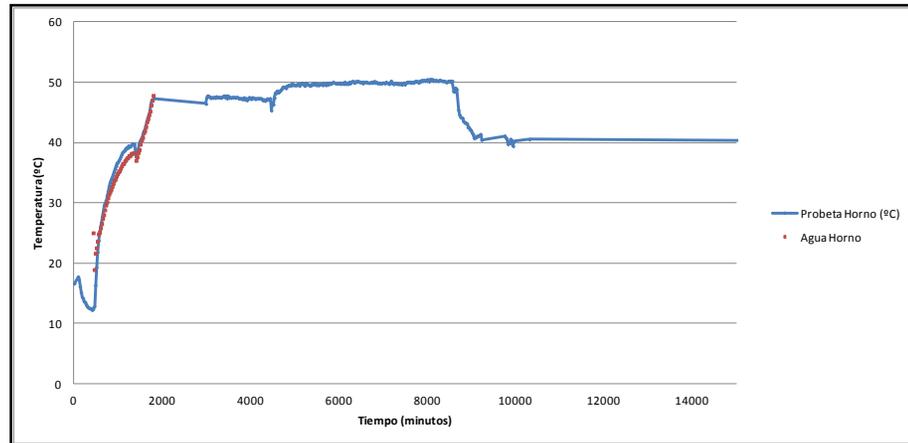


Figura 62: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-10°C-S/A.

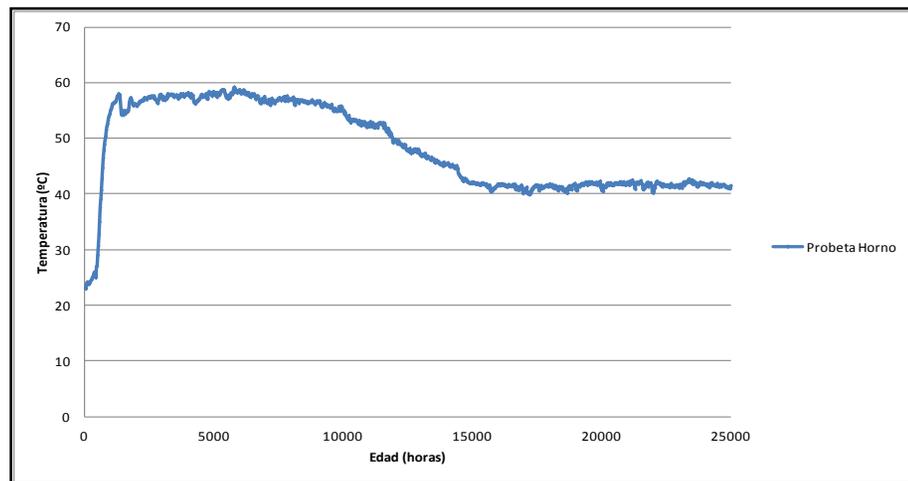


Figura 63: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-23°C-S/A.

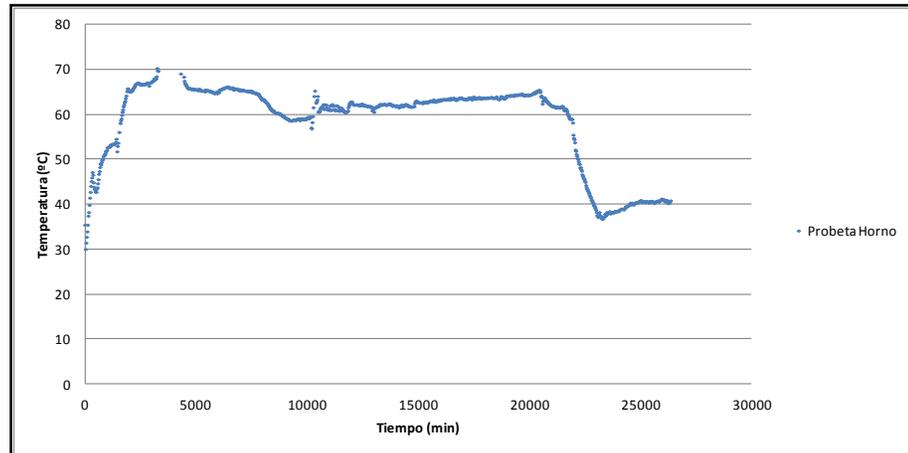


Figura 64: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-40°C-S/A.

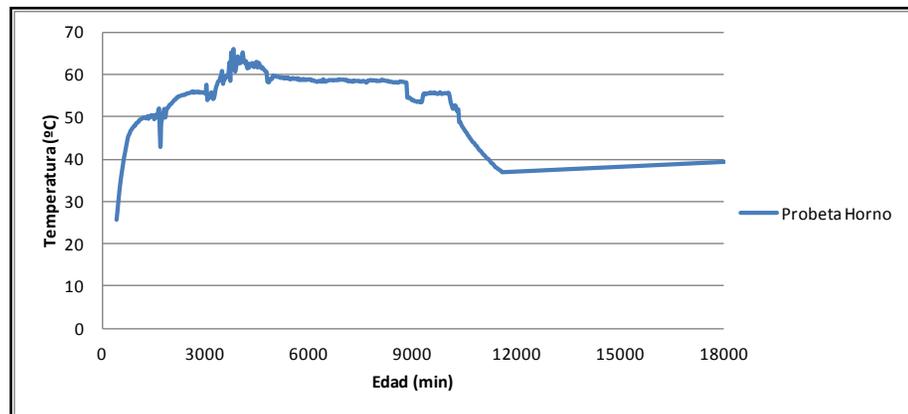


Figura 65: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-350-23°C-C/Re.

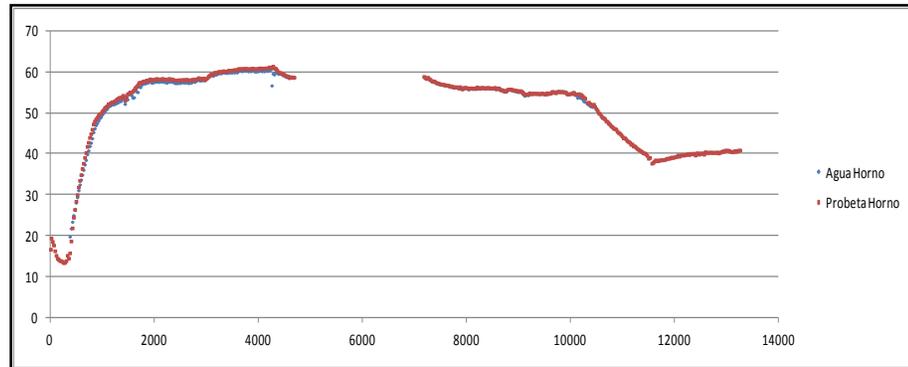


Figura 66: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-450-10°C-S/A.

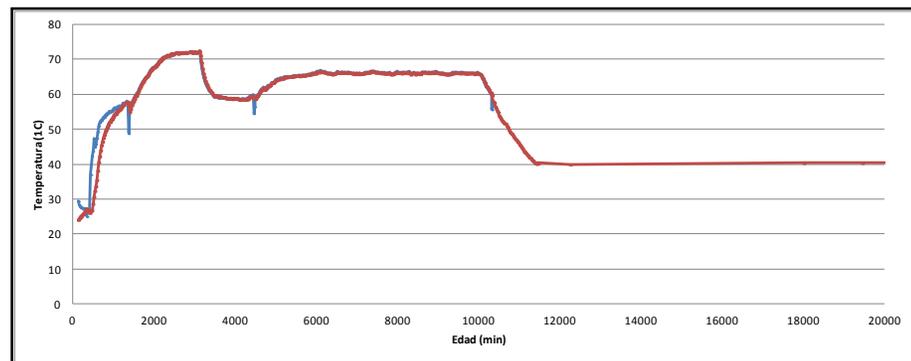


Figura 67: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-450-23°C-S/A.

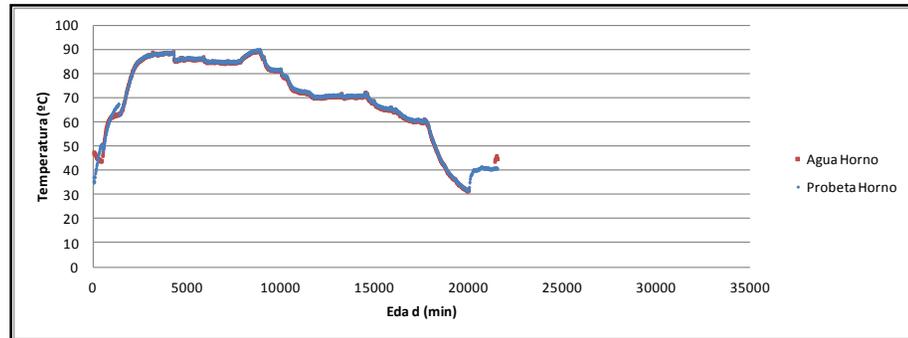


Figura 68: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla AR-450-40°C-S/A.

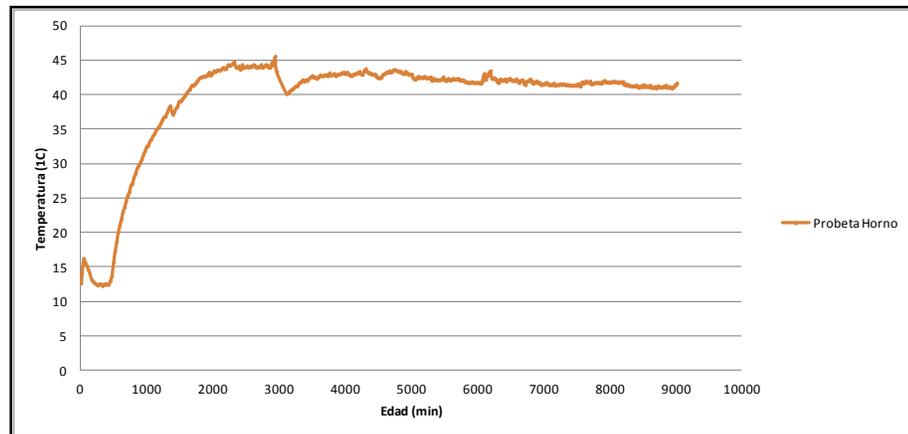


Figura 69: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-350-10°C-S/A.

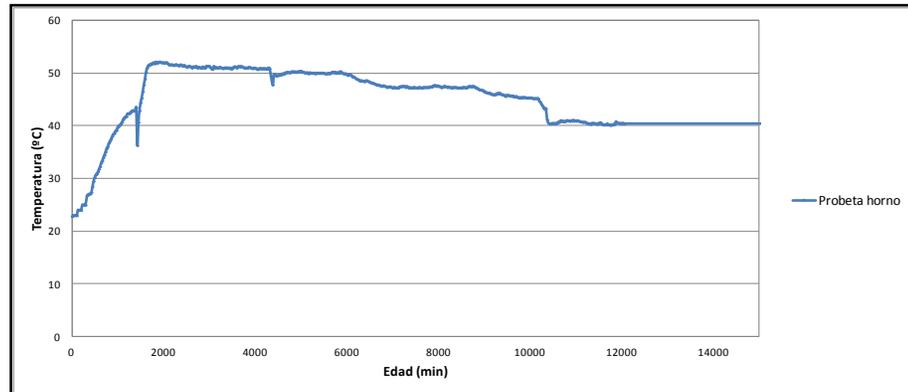


Figura 70: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-350-23°C-S/A.

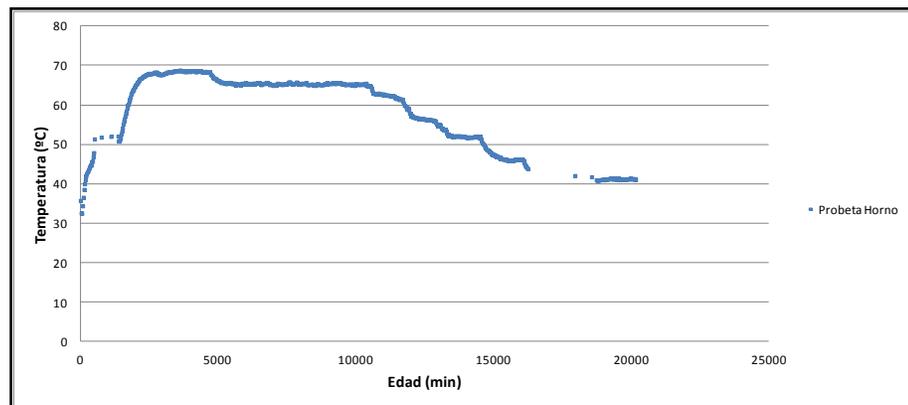


Figura 71: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-350-40°C-S/A.

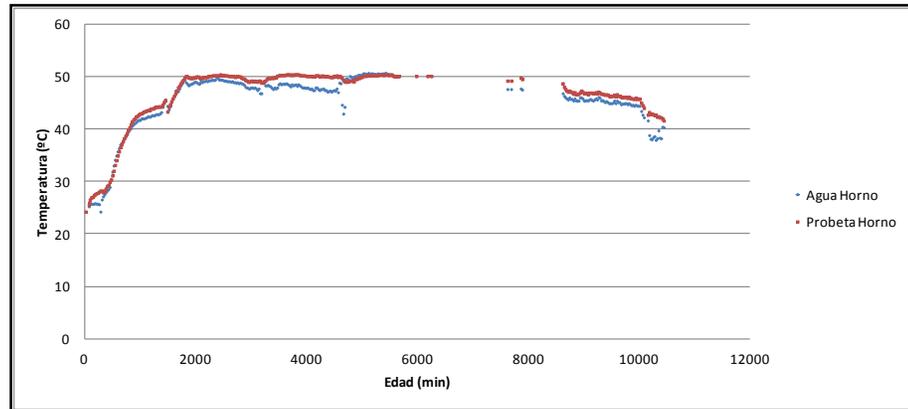


Figura 72: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-350-23°C-C/Re.

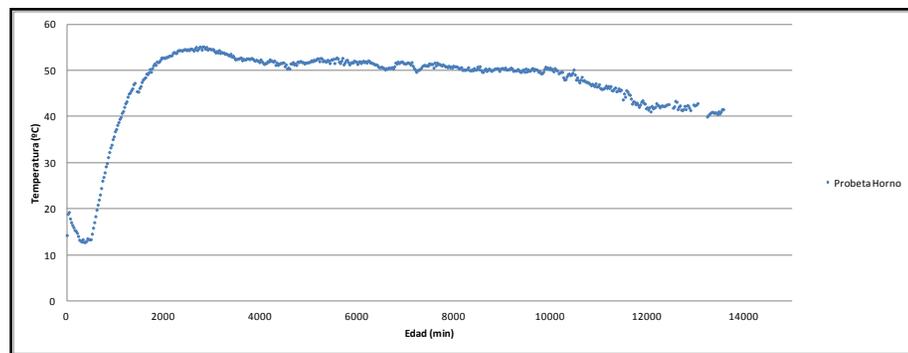


Figura 73: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-450-10°C-S/A.

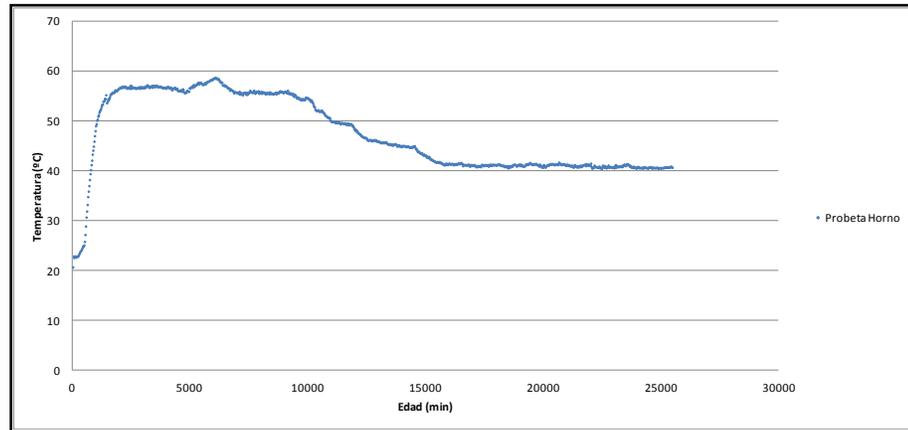


Figura 74: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-450-23°C-S/A.

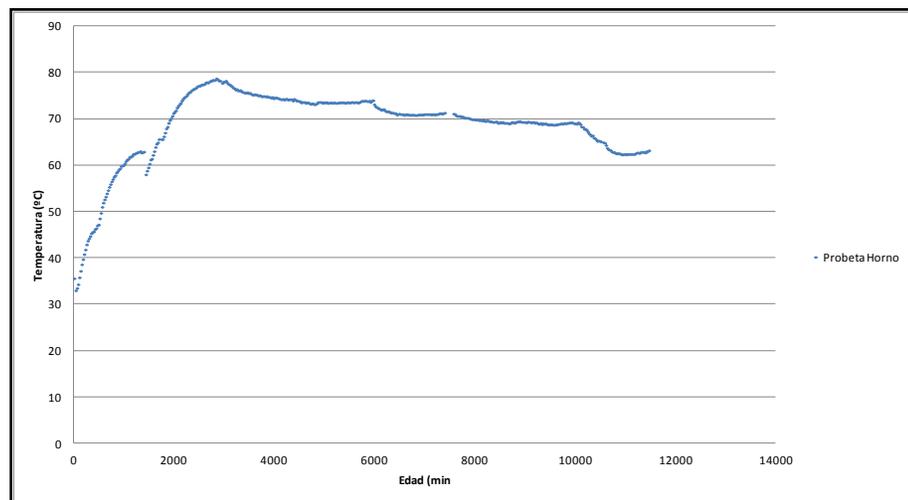


Figura 75: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla CC-450-40°C-S/A.

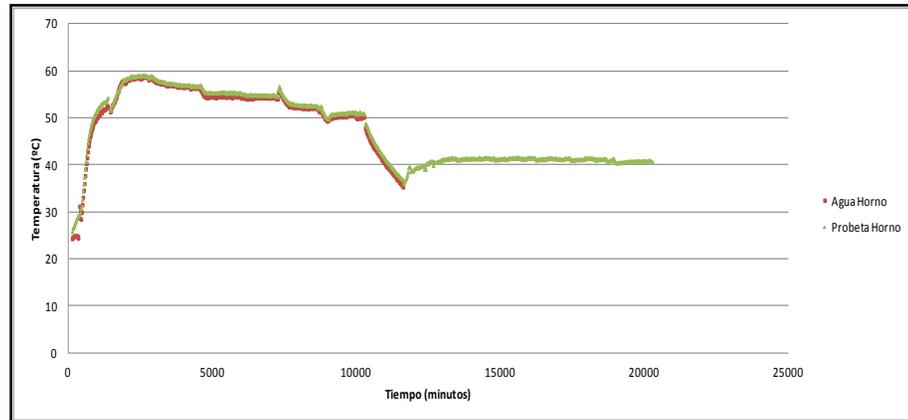


Figura 76: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla P-350-23°C-S/A.

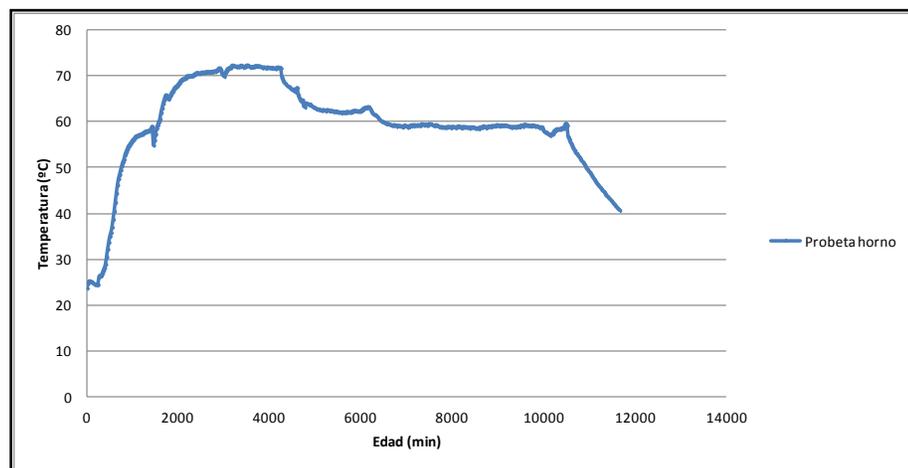


Figura 77: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla P-450-23°C-S/A.

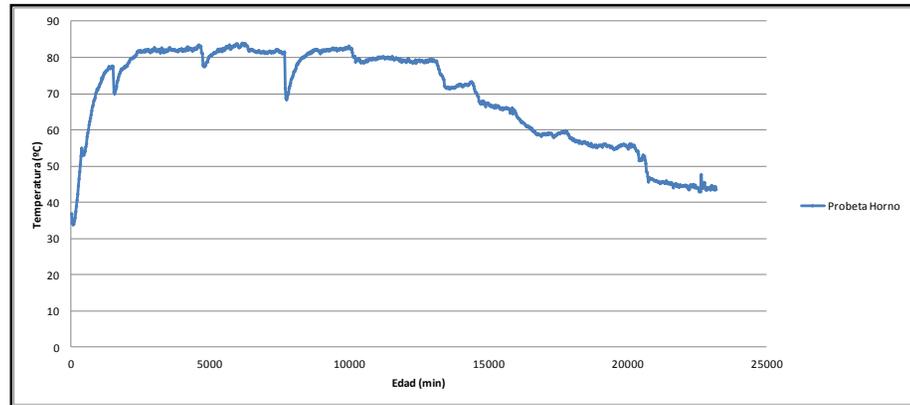


Figura 78: Temperatura medida en probeta de control sometida a ciclo térmico para mezcla P-450-40°C-S/A.

ANEXO D: Resultados Resistencia a Compresión Probetas Cilíndricas Curadas en Régimen Térmico

Tabla 27: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-350-10°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
1 día				
Hora ensayo: 11:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	4060	3696		
Dimensiones (cm)	10,2 20,5	9,8 20,3		
Volumen (cc)	1671	1531		
Densidad (grs/cc)	2,43	2,41		2,42
Fuerza (kgf)	9710	9860		
Area (cm ²)	81,7	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	118,8	130,7		124,8
Resistencia (MPa)	11,9	13,1		12,5
Desviación	-5%	5%		
3 días				
Hora ensayo: 13:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3786,2	3687		
Dimensiones (cm)	9,9 20,2	9,8 20,2		
Volumen (cc)	1555	1524		
Densidad (grs/cc)	2,43	2,42		2,43
Fuerza (kgf)	22010	21890		
Area (cm ²)	77,0	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	285,9	290,2		288,1
Resistencia (MPa)	28,6	29,0		28,8
Desviación	-1%	1%		
28 días				
Hora ensayo: 10:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3702,4	3693,3		
Dimensiones (cm)	9,84 20,2	9,83 20,3		
Volumen (cc)	1536	1543		
Densidad (grs/cc)	2,41	2,39		2,40
Fuerza (kgf)	35780	33610		
Area (cm ²)	76,0	75,9		
Resistencia (kgf/cm ²)	470,5	442,9		456,7
Resistencia (MPa)	47,1	44,3		45,7
Desviación	3%	-3%		
7 días				
Hora ensayo: 10:45 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3704,9	3685,3		
Dimensiones (cm)	9,8 20	9,8 20,2		
Volumen (cc)	1505	1520		
Densidad (grs/cc)	2,46	2,42		2,44
Fuerza (kgf)	32060	30690		
Area (cm ²)	75,4	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	425,0	406,9		416,0
Resistencia (MPa)	42,5	40,7		41,6
Desviación	2%	-2%		
59 días				
Hora ensayo: 12:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3715,4	4028,6		
Dimensiones (cm)	9,81 20,3	10,2 20,2		
Volumen (cc)	1532	1651		
Densidad (grs/cc)	2,43	2,44		2,43
Fuerza (kgf)	38080	42640		
Area (cm ²)	75,6	81,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	503,8	521,8		512,8
Resistencia (MPa)	50,4	52,2		51,3
Desviación	-2%	2%		
14 días				
Hora ensayo: 15:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3705,9	3730,6		
Dimensiones (cm)	9,8 20,1	9,85 20,4		
Volumen (cc)	1516	1555		
Densidad (grs/cc)	2,44	2,4		2,42
Fuerza (kgf)	33200	30950		
Area (cm ²)	75,4	76,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	440,1	406,2		423,2
Resistencia (MPa)	44,0	40,6		42,3
Desviación	4%	-4%		
02-nov 267 días				
Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3751	4058		
Dimensiones (cm)	9,9 20,2	10,3 20,4		
Volumen (cc)	1551	1682		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,41		2,42
Fuerza (kgf)	41510	41920		
Area (cm ²)	77,0	82,5		
Resistencia (kgf/cm ²)	539,3	508,0		523,6
Resistencia (MPa)	53,9	50,8		52,4
Desviación	3%	-3%		

Tabla 28: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-350-23°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3706,4	3998,2		
Dimensiones (cm)	9,85 20,4	10,2 20,2		
Volumen (cc)	1555	1654		
Densidad (grs/cc)	2,38	2,42		2,40
Fuerza (kgf)	17130	18630		
Area (cm2)	76,2	81,9		
Resistencia (kgf/cm2)	224,8	227,5		226,2
Resistencia (MPa)	22,5	22,8		22,6
Desviación	-1%	1%		-100%
3 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	4021,5	3739,6		
Dimensiones (cm)	10,2 20,1	9,83 20,4		
Volumen (cc)	1638	1548		
Densidad (grs/cc)	2,45	2,42		2,44
Fuerza (kgf)	31310	30430		
Area (cm2)	81,7	75,9		
Resistencia (kgf/cm2)	383,2	401,0		392,1
Resistencia (MPa)	38,3	40,1		39,2
Desviación	-2%	2%		-100%
7 días Hora ensayo: 11:45 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	4042,1	4048,5		
Dimensiones (cm)	10,3 20,3	10,3 20,41		
Volumen (cc)	1675	1684		
Densidad (grs/cc)	2,41	2,4		2,41
Fuerza (kgf)	40910	39760		
Area (cm2)	82,5	82,5		
Resistencia (kgf/cm2)	495,8	481,8		488,8
Resistencia (MPa)	49,6	48,2		48,9
Desviación	1%	-1%		-100%
14 días Hora ensayo: 15:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3784	3777,6		
Dimensiones (cm)	9,9 20,4	9,92 20,2		
Volumen (cc)	1566	1561		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,42		2,42
Fuerza (kgf)	38490	38680		
Area (cm2)	77,0	77,3		
Resistencia (kgf/cm2)	500,0	500,5		500,2
Resistencia (MPa)	50,0	50,0		50,0
Desviación	0%	0%		-100%
28 días Hora ensayo: 17:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3704,9	37250		
Dimensiones (cm)	9,85 20,3	9,83 20,29		
Volumen (cc)	1547	1540		
Densidad (grs/cc)	2,4	24,2		13,29
Fuerza (kgf)	39120	39450		
Area (cm2)	76,2	75,9		
Resistencia (kgf/cm2)	513,4	519,8		516,6
Resistencia (MPa)	51,3	52,0		51,7
Desviación	-1%	1%		-100%
58 días Hora ensayo: 14:45 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3743,2	3709,2		
Dimensiones (cm)	9,83 20,4	9,8 20,2		
Volumen (cc)	1549	1524		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,43		2,43
Fuerza (kgf)	41100	39310		
Area (cm2)	75,9	75,4		
Resistencia (kgf/cm2)	541,6	521,1		531,4
Resistencia (MPa)	54,2	52,1		53,1
Desviación	2%	-2%		-100%
02-nov 211 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3739	4031		
Dimensiones (cm)	9,8 20,4	10,3 20,17		
Volumen (cc)	1537	1664		
Densidad (grs/cc)	2,43	2,42		2,43
Fuerza (kgf)	42980	48460		
Area (cm2)	75,4	82,5		
Resistencia (kgf/cm2)	569,8	587,3		578,5
Resistencia (MPa)	57,0	58,7		57,9
Desviación	-2%	2%		-100%

Tabla 29: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-350-40°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 12:30 pm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3673,6	3670	4050	
Dimensiones (cm)	9,8 20,2	9,8 20,2	10,3 20,4	
Volumen (cc)	1524	1524	1682	
Densidad (grs/cc)	2,41	2,41	2,41	2,4
Fuerza (kgf)	17540	15200	16020	
Area (cm2)	75,4	75,4	82,7	
Resistencia (kgf/cm2)	232,5	201,5	193,8	197,6
Resistencia (MPa)	23,3	20,2	19,4	19,8
Desviación	18%	2%	-2%	
3 días Hora ensayo: 10:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	4034,1	4055,4		
Dimensiones (cm)	10,3 20,3	10,3 20,4		
Volumen (cc)	1687	1700		
Densidad (grs/cc)	2,39	2,39		2,4
Fuerza (kgf)	32220	34830		
Area (cm2)	83,3	83,3		
Resistencia (kgf/cm2)	386,7	418,0		402,4
Resistencia (MPa)	38,7	41,8		40,2
Desviación	-4%	4%		-100%
28 días Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3721,6	3733,2		
Dimensiones (cm)	9,83 20,3	9,86 20,2		
Volumen (cc)	1541	1542		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	36600	36720		
Area (cm2)	75,9	76,4		
Resistencia (kgf/cm2)	482,3	480,9		481,6
Resistencia (MPa)	48,2	48,1		48,2
Desviación	0%	0%		-100%
7 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3701,9	3702,7		
Dimensiones (cm)	9,85 20,3	9,85 20,2		
Volumen (cc)	1547	1539		
Densidad (grs/cc)	2,39	2,41		2,4
Fuerza (kgf)	35270	33950		
Area (cm2)	76,2	76,2		
Resistencia (kgf/cm2)	462,9	445,5		454,2
Resistencia (MPa)	46,3	44,6		45,4
Desviación	2%	-2%		-100%
60 días Hora ensayo: 12:20 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3786,5	3785,8		
Dimensiones (cm)	9,9 20,3	9,91 20,3		
Volumen (cc)	1559	1563		
Densidad (grs/cc)	2,43	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	37380	38110		
Area (cm2)	77,0	77,1		
Resistencia (kgf/cm2)	485,6	494,1		489,8
Resistencia (MPa)	48,6	49,4		49,0
Desviación	-1%	1%		-100%
14 días Hora ensayo: 17:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)				
Dimensiones (cm)				
Volumen (cc)				
Densidad (grs/cc)				#DIV/0!
Fuerza (kgf)				
Area (cm2)				
Resistencia (kgf/cm2)				463,4
Resistencia (MPa)				46,3
Desviación				
02-nov 268 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3831	3748		
Dimensiones (cm)	9,9 20,4	9,84 20,4		
Volumen (cc)	1566	1551		
Densidad (grs/cc)	2,45	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	39510	37940		
Area (cm2)	77,0	76,0		
Resistencia (kgf/cm2)	513,3	498,9		506,1
Resistencia (MPa)	51,3	49,9		50,6
Desviación	1%	-1%		-100%

Tabla 30: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-350-23°C-C/Re.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 16:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3709,7	4013,2		
Dimensiones (cm)	9,85 20,2	10,3 20,12		
Volumen (cc)	1541	1660		
Densidad (grs/cc)	2,41	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	18610	20250		
Area (cm2)	76,2	82,5		
Resistencia (kgf/cm2)	244,2	245,4		244,8
Resistencia (MPa)	24,4	24,5		24,5
Desviación	0%	0%		-100%
3 días Hora ensayo: 18:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3720	3691,8		
Dimensiones (cm)	9,75 20,2	9,75 20,12		
Volumen (cc)	1510	1502		
Densidad (grs/cc)	2,46	2,46		2,5
Fuerza (kgf)	31690	32260		
Area (cm2)	74,7	74,7		
Resistencia (kgf/cm2)	424,4	432,1		428,3
Resistencia (MPa)	42,4	43,2		42,8
Desviación	-1%	1%		-100%
28 días Hora ensayo: 15:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3676,1	3998,8	3712,2	
Dimensiones (cm)	9,82 20	10,2 20,16	9,82 20,2	
Volumen (cc)	1519	1662	1532	
Densidad (grs/cc)	2,42	2,41	2,42	2,4
Fuerza (kgf)	41660	40320	41480	
Area (cm2)	75,8	82,4	75,7	
Resistencia (kgf/cm2)	549,8	489,1	548,2	549,8
Resistencia (MPa)	55,0	48,9	54,8	55,0
Desviación	0%	-11%	0%	
7 días Hora ensayo: 11:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3708	4014,5		
Dimensiones (cm)	9,75 20,2	10,3 20,02		
Volumen (cc)	1510	1652		
Densidad (grs/cc)	2,46	2,43		2,4
Fuerza (kgf)	36550	41550		
Area (cm2)	74,7	82,5		
Resistencia (kgf/cm2)	489,5	503,5		496,5
Resistencia (MPa)	49,0	50,4		49,7
Desviación	-1%	1%		-100%
60 días Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3719,6	4011,6		
Dimensiones (cm)	9,8 20,2	10,2 20,12		
Volumen (cc)	1522	1651		
Densidad (grs/cc)	2,44	2,43		2,4
Fuerza (kgf)	42530	47510		
Area (cm2)	75,4	82,0		
Resistencia (kgf/cm2)	563,8	579,2		571,5
Resistencia (MPa)	56,4	57,9		57,1
Desviación	-1%	1%		-100%
14 días hora ensayo: 11:30				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3726,8	4052,7		
Dimensiones (cm)	9,85 20,4	10,2 20,3		
Volumen (cc)	1555	1659		
Densidad (grs/cc)	2,4	2,44		2,4
Fuerza (kgf)	41030	44510		
Area (cm2)	76,2	81,7		
Resistencia (kgf/cm2)	538,4	544,7		541,6
Resistencia (MPa)	53,8	54,5		54,2
Desviación	-1%	1%		-100%
02-nov 282 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3711			
Dimensiones (cm)	9,82 20,3			
Volumen (cc)	1537			
Densidad (grs/cc)	2,41			
Fuerza (kgf)	43760			
Area (cm2)	75,7			
Resistencia (kgf/cm2)	577,8			
Resistencia (MPa)	57,8			
Desviación				

Tabla 31: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-450-10°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 11:45 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3590,4	3630,1		
Dimensiones (cm)	9,75 20,2	9,81 20,3		
Volumen (cc)	1509	1537		
Densidad (grs/cc)	2,38	2,36		2,4
Fuerza (kgf)	12610	13370		
Area (cm ²)	74,7	75,6		
Resistencia (kgf/cm ²)	168,9	176,9		172,9
Resistencia (MPa)	16,9	17,7		17,3
Desviación	-2%	2%	-100%	
3 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3607,2	3600,4		
Dimensiones (cm)	9,81 20,4	9,82 20,2		
Volumen (cc)	1542	1530		
Densidad (grs/cc)	2,34	2,35		2,3
Fuerza (kgf)	26010	24070		
Area (cm ²)	75,6	75,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	344,1	317,8		331,0
Resistencia (MPa)	34,4	31,8		33,1
Desviación	4%	-4%	-100%	
28 días Hora ensayo: 10:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3661,5	3906,2		
Dimensiones (cm)	9,9 20,1	10,2 20,1		
Volumen (cc)	1548	1650		
Densidad (grs/cc)	2,37	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	34660	38980		
Area (cm ²)	77,0	82,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	450,3	474,2		462,3
Resistencia (MPa)	45,0	47,4		46,2
Desviación	-3%	3%	-100%	
7 días Hora ensayo: 12:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3586,2	3621,2		
Dimensiones (cm)	9,83 20,1	9,82 20,2		
Volumen (cc)	1525	1530		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	29990	29200		
Area (cm ²)	75,9	75,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	395,2	385,5		390,4
Resistencia (MPa)	39,5	38,6		39,0
Desviación	1%	-1%	-100%	
62 días Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3932,3	3596,5		
Dimensiones (cm)	10,2 20,1	9,81 20,2		
Volumen (cc)	1646	1527		
Densidad (grs/cc)	2,39	2,36		2,4
Fuerza (kgf)	40290	36120		
Area (cm ²)	81,7	75,6		
Resistencia (kgf/cm ²)	493,1	477,9		485,5
Resistencia (MPa)	49,3	47,8		48,5
Desviación	2%	-2%	-100%	
14 días Hora ensayo: 10:45 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3565,6	3572,4		
Dimensiones (cm)	9,81 20,1	9,8 20		
Volumen (cc)	1515	1505		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	35780	33650		
Area (cm ²)	75,6	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	473,4	446,1		459,7
Resistencia (MPa)	47,3	44,6		46,0
Desviación	3%	-3%	-100%	
02-nov 253 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3603	3918		
Dimensiones (cm)	9,91 20,1	10,3 20,3		
Volumen (cc)	1550	1673		
Densidad (grs/cc)	2,32	2,34		2,3
Fuerza (kgf)	36510	42890		
Area (cm ²)	77,1	82,5		
Resistencia (kgf/cm ²)	473,3	519,8		496,6
Resistencia (MPa)	47,3	52,0		49,7
Desviación	-5%	5%	-100%	

Tabla 32: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-450-23°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 11:30				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3954,6	3918,1		
Dimensiones (cm)	10,2 20,2	10,3 20,2		
Volumen (cc)	1636	1668		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,35		2,4
Fuerza (kgf)	19860	17350		
Area (cm2)	80,9	82,5		
Resistencia (kgf/cm2)	245,4	210,3		227,9
Resistencia (MPa)	24,5	21,0		22,8
Desviación	8%	-8%	-100%	
3 días Hora ensayo: 12:30				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3639,3	3619,8		
Dimensiones (cm)	9,75 20,1	10,1 20,3		
Volumen (cc)	1502	1611		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,25		2,3
Fuerza (kgf)	33370	29450		
Area (cm2)	74,7	79,3		
Resistencia (kgf/cm2)	446,9	371,2		409,1
Resistencia (MPa)	44,7	37,1		40,9
Desviación	9%	-9%	-100%	
7 días Hora ensayo: 14:00				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3607,8	3644,4		
Dimensiones (cm)	9,85 20,1	9,75 20,3		
Volumen (cc)	1533	1516		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,4		2,4
Fuerza (kgf)	35690	33480		
Area (cm2)	76,2	74,7		
Resistencia (kgf/cm2)	468,4	448,4		458,4
Resistencia (MPa)	46,8	44,8		45,8
Desviación	2%	-2%	-100%	
14 días Hora ensayo: 11:00				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3970,6	3645,4		
Dimensiones (cm)	10,3 20,2	9,85 20,2		
Volumen (cc)	1668	1541		
Densidad (grs/cc)	2,38	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	43710	38490		
Area (cm2)	82,5	76,2		
Resistencia (kgf/cm2)	529,7	505,1		517,4
Resistencia (MPa)	53,0	50,5		51,7
Desviación	2%	-2%	-100%	
28 días Hora ensayo: 15:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)				
Dimensiones (cm)				
Volumen (cc)				
Densidad (grs/cc)				
Fuerza (kgf)				
Area (cm2)				
Resistencia (kgf/cm2)				540,1
Resistencia (MPa)				54,0
Desviación			-100%	
78 días Hora ensayo: 12:30				
	Probeta 1			Promedio
Peso (grs)	3689,7			
Dimensiones (cm)	9,82 20,5			
Volumen (cc)	1550			
Densidad (grs/cc)	2,38			2,4
Fuerza (kgf)	43260			
Area (cm2)	75,7			
Resistencia (kgf/cm2)	571,2			571,2
Resistencia (MPa)	57,1			57,1
Desviación	0%	-100%	-100%	
02-nov 310 días Hora ensayo:				
	Probeta 1			Promedio
Peso (grs)				
Dimensiones (cm)				
Volumen (cc)				
Densidad (grs/cc)				
Fuerza (kgf)				
Area (cm2)				
Resistencia (kgf/cm2)				
Resistencia (MPa)				
Desviación				

Tabla 33: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón AR-450-40°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3676,3	3920,9		
Dimensiones (cm)	9,95 20,2	10,3 20,2		
Volumen (cc)	1570	1683		
Densidad (grs/cc)	2,34	2,33		2,3
Fuerza (kgf)	14520	16490		
Area (cm2)	77,8	83,3		
Resistencia (kgf/cm2)	186,7	197,9		192,3
Resistencia (MPa)	18,7	19,8		19,2
Desviación	-3%	3%		-100%
3 días Hora ensayo: 10:45				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3614	3603,6		
Dimensiones (cm)	9,85 20,2	9,8 20,2		
Volumen (cc)	1539	1524		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	22990	22630		
Area (cm2)	76,2	75,4		
Resistencia (kgf/cm2)	301,7	300,0		300,9
Resistencia (MPa)	30,2	30,0		30,1
Desviación	0%	0%		-100%
28 días Hora ensayo: 14:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3622,1	3645,5	3601,3	
Dimensiones (cm)	9,89 20,2	9,84 20,3	9,84 20,1	
Volumen (cc)	1548	1547	1531	
Densidad (grs/cc)	2,34	2,36	2,35	2,3
Fuerza (kgf)	26470	29910	31030	
Area (cm2)	76,8	76,0	76,0	
Resistencia (kgf/cm2)	344,6	393,3	408,0	382,0
Resistencia (MPa)	34,5	39,3	40,8	38,2
Desviación	-10%	3%	7%	
7 días Hora ensayo: 10:20				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3939,6	3918,2		
Dimensiones (cm)	10,3 20,3	10,3 20,2		
Volumen (cc)	1675	1683		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,33		2,3
Fuerza (kgf)	26080	29750		
Area (cm2)	82,5	83,3		
Resistencia (kgf/cm2)	316,1	357,0		336,6
Resistencia (MPa)	31,6	35,7		33,7
Desviación	-6%	6%		-100%
60 días Hora ensayo: 15:25 horas				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3637,2	3678	3639,3	
Dimensiones (cm)	9,81 20,3	9,82 20,4	9,82 20,3	
Volumen (cc)	1533	1547	1534	
Densidad (grs/cc)	2,37	2,38	2,37	2,4
Fuerza (kgf)	26790	23300	35390	
Area (cm2)	75,6	75,7	75,7	
Resistencia (kgf/cm2)	354,4	307,6	467,3	410,9
Resistencia (MPa)	35,4	30,8	46,7	41,1
Desviación	-14%	-25%	14%	
14 días Hora ensayo: 10:45 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3942,2	3629,7	3617,6	
Dimensiones (cm)	10,2 20,2	9,81 20,2	9,85 20,3	
Volumen (cc)	1659	1528	1548	
Densidad (grs/cc)	2,38	2,38	2,34	2,4
Fuerza (kgf)	31350	25190	28050	
Area (cm2)	82,0	75,6	76,2	
Resistencia (kgf/cm2)	382,2	333,3	368,1	361,2
Resistencia (MPa)	38,2	33,3	36,8	36,1
Desviación	6%	-8%	2%	
02-nov 240 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3702			
Dimensiones (cm)	9,95 22,3			
Volumen (cc)	1732			
Densidad (grs/cc)	2,14			2,1
Fuerza (kgf)	33480			
Area (cm2)	77,8			
Resistencia (kgf/cm2)	430,6			430,6
Resistencia (MPa)	43,1			43,1
Desviación	0%			

Tabla 34: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-350-10°C-
S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 9:50 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3674,5	3746,8	4014,7	
Dimensiones (cm)	9,8 20,2	9,88 20,2	10,3 20,3	
Volumen (cc)	1522	1549	1675	
Densidad (grs/cc)	2,41	2,42	2,40	2,4
Fuerza (kgf)	2040	2940	2910	
Area (cm ²)	75,4	76,7	82,5	
Resistencia (kgf/cm ²)	27,0	38,3	35,3	36,8
Resistencia (MPa)	2,7	3,8	3,5	3,7
Desviación	-27%	4%	-4%	
3 días Hora ensayo: 10:50 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3986,4	4006,6		
Dimensiones (cm)	10,3 20,2	10,2 20,2		
Volumen (cc)	1670	1654		
Densidad (grs/cc)	2,39	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	13590	13310		
Area (cm ²)	82,7	81,9		
Resistencia (kgf/cm ²)	164,4	162,6		163,5
Resistencia (MPa)	16,4	16,3		16,3
Desviación	1%	-1%	-100%	
28 días Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3704,7	3985,2		
Dimensiones (cm)	9,8 20,2	10,3 20,2		
Volumen (cc)	1524	1667		
Densidad (grs/cc)	2,43	2,39		2,4
Fuerza (kgf)	33020	33180		
Area (cm ²)	75,4	82,5		
Resistencia (kgf/cm ²)	437,8	402,1		419,9
Resistencia (MPa)	43,8	40,2		42,0
Desviación	4%	-4%	-100%	
7 días Hora ensayo: 14:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3699,6	3753,8		
Dimensiones (cm)	9,83 20,3	9,9 20,2		
Volumen (cc)	1538	1557		
Densidad (grs/cc)	2,4	2,41		2,4
Fuerza (kgf)	21560	22170		
Area (cm ²)	75,9	77,0		
Resistencia (kgf/cm ²)	284,1	288,0		286,0
Resistencia (MPa)	28,4	28,8		28,6
Desviación	-1%	1%	-100%	
60 días Hora ensayo: 15:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3660,3	3714,4		
Dimensiones (cm)	9,8 20,2	9,83 20,4		
Volumen (cc)	1520	1548		
Densidad (grs/cc)	2,41	2,4		2,4
Fuerza (kgf)	35320	36360		
Area (cm ²)	75,4	75,9		
Resistencia (kgf/cm ²)	468,3	479,1		473,7
Resistencia (MPa)	46,8	47,9		47,4
Desviación	-1%	1%	-100%	
14 días Hora ensayo: 10:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3710,6	3717,1		
Dimensiones (cm)	9,81 20,4	9,8 20,3		
Volumen (cc)	1542	1531		
Densidad (grs/cc)	2,41	2,43		2,4
Fuerza (kgf)	27970	28280		
Area (cm ²)	75,6	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	370,1	374,9		372,5
Resistencia (MPa)	37,0	37,5		37,2
Desviación	-1%	1%	-100%	
02-nov 219 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3680	3699		
Dimensiones (cm)	9,82 20,3	9,8 20,3		
Volumen (cc)	1537	1531		
Densidad (grs/cc)	2,39	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	34630	37800		
Area (cm ²)	75,7	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	457,2	501,1		479,2
Resistencia (MPa)	45,7	50,1		47,9
Desviación	-5%	5%	-100%	

Tabla 35: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-350-23°C-

S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 11:00				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3976,4	3695,2		
Dimensiones (cm)	10,2 20,2	9,85 20,2		
Volumen (cc)	1636	1541		
Densidad (grs/cc)	2,43	2,40		2,4
Fuerza (kgf)	4340	4140		
Area (cm ²)	80,9	76,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	53,6	54,3		54,0
Resistencia (MPa)	5,4	5,4		5,4
Desviación	-1%	1%		-100%
3 días Hora ensayo: 9:45				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3982,1	3741,6		
Dimensiones (cm)	10,2 20,2	9,95 20,2		
Volumen (cc)	1636	1572		
Densidad (grs/cc)	2,43	2,38		2,4
Fuerza (kgf)	15290	15940		
Area (cm ²)	80,9	77,8		
Resistencia (kgf/cm ²)	189,0	205,0		197,0
Resistencia (MPa)	18,9	20,5		19,7
Desviación	-4%	4%		-100%
28 días Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3693,1	3691,4		
Dimensiones (cm)	9,85 20,2	9,75 20,2		
Volumen (cc)	1541	1510		
Densidad (grs/cc)	2,4	2,45		2,4
Fuerza (kgf)	31140	31310		
Area (cm ²)	76,2	74,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	408,7	419,4		414,0
Resistencia (MPa)	40,9	41,9		41,4
Desviación	-1%	1%		-100%
7 días Hora ensayo: 12:30				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3954,6	3659,1		
Dimensiones (cm)	10,3 20,1	9,85 20,1		
Volumen (cc)	1660	1533		
Densidad (grs/cc)	2,38	2,39		2,4
Fuerza (kgf)	25520	23480		
Area (cm ²)	82,5	76,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	309,3	308,1		308,7
Resistencia (MPa)	30,9	30,8		30,9
Desviación	0%	0%		-100%
70 días Hora ensayo: 12:30 hrs				
	Probeta 1			Promedio
Peso (grs)	3690,5			
Dimensiones (cm)	9,85 20,2			
Volumen (cc)	1539			
Densidad (grs/cc)	2,4			2,4
Fuerza (kgf)	34020			
Area (cm ²)	76,2			
Resistencia (kgf/cm ²)	446,4			446,4
Resistencia (MPa)	44,6			44,6
Desviación	0%	-100%		-100%
14 días Hora ensayo: 15:45				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3673,6	3973,5		
Dimensiones (cm)	9,95 20,1	10,3 20,1		
Volumen (cc)	1564	1690		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,35		2,4
Fuerza (kgf)	28820	30480		
Area (cm ²)	77,8	84,0		
Resistencia (kgf/cm ²)	370,6	363,0		366,8
Resistencia (MPa)	37,1	36,3		36,7
Desviación	1%	-1%		-100%
02-nov 303 días Hora ensayo:				
	Probeta 1			Promedio
Peso (grs)				
Dimensiones (cm)				
Volumen (cc)				
Densidad (grs/cc)				
Fuerza (kgf)				
Area (cm ²)				
Resistencia (kgf/cm ²)				
Resistencia (MPa)				
Desviación				

Tabla 36: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-350-40°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmoldo frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	4008,4	3673,3		
Dimensiones (cm)	10,2 20,3	9,8 20		
Volumen (cc)	1643	1509		
Densidad (grs/cc)	2,44	2,43		2,4
Fuerza (kgf)	8570	8040		
Area (cm2)	80,9	75,4		
Resistencia (kgf/cm2)	105,9	106,6		106,3
Resistencia (MPa)	10,6	10,7		10,6
Desviación	0%	0%		-100%
3 días Hora ensayo: 15:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3683,1	3618,1		
Dimensiones (cm)	9,89 20,2	9,79 20		
Volumen (cc)	1550	1501		
Densidad (grs/cc)	2,38	2,41		2,4
Fuerza (kgf)	20580	19290		
Area (cm2)	76,8	75,2		
Resistencia (kgf/cm2)	268,0	256,4		262,2
Resistencia (MPa)	26,8	25,6		26,2
Desviación	2%	-2%		-100%
28 días Hora ensayo: 10:10 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)				
Dimensiones (cm)				
Volumen (cc)				
Densidad (grs/cc)				
Fuerza (kgf)				
Area (cm2)				
Resistencia (kgf/cm2)				317,3
Resistencia (MPa)				31,7
Desviación				
7 días Hora ensayo: 16:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3732,4	3649,2		
Dimensiones (cm)	9,93 20,2	9,83 20,1		
Volumen (cc)	1560	1524		
Densidad (grs/cc)	2,39	2,39		2,4
Fuerza (kgf)	24090	23240		
Area (cm2)	77,4	75,9		
Resistencia (kgf/cm2)	311,4	306,4		308,9
Resistencia (MPa)	31,1	30,6		30,9
Desviación	1%	-1%		-100%
60 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3684,6	3640,6		
Dimensiones (cm)	9,85 20,2	9,83 20,2		
Volumen (cc)	1537	1529		
Densidad (grs/cc)	2,4	2,38		2,4
Fuerza (kgf)	23870	24580		
Area (cm2)	76,2	75,9		
Resistencia (kgf/cm2)	313,2	323,9		318,6
Resistencia (MPa)	31,3	32,4		31,9
Desviación	-2%	2%		-100%
14 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3991,3	4001,2		
Dimensiones (cm)	10,2 20,2	10,3 20,1		
Volumen (cc)	1647	1654		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	26360	24610		
Area (cm2)	81,7	82,5		
Resistencia (kgf/cm2)	322,6	298,2		310,4
Resistencia (MPa)	32,3	29,8		31,0
Desviación	4%	-4%		-100%
02-nov 261 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3686	3640		
Dimensiones (cm)	9,82 20,2	9,82 20,1		
Volumen (cc)	1528	1519		
Densidad (grs/cc)	2,4	2,4		2,4
Fuerza (kgf)	27090	25520		
Area (cm2)	75,7	75,7		
Resistencia (kgf/cm2)	357,7	337,0		347,3
Resistencia (MPa)	35,8	33,7		34,7
Desviación	3%	-3%		-100%

Tabla 37: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-350-23°C-C/Re.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3784,7	3974		
Dimensiones (cm)	9,85 20,3	10,2 20,2		
Volumen (cc)	1548	1636		
Densidad (grs/cc)	2,45	2,43		2,4
Fuerza (kgf)	8380	8960		
Area (cm ²)	76,2	80,9		
Resistencia (kgf/cm ²)	110,0	110,7		110,4
Resistencia (MPa)	11,0	11,1		11,0
Desviación	0%	0%	-100%	
3 días Hora ensayo: 15:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3683,3	3700,09		
Dimensiones (cm)	9,8 20,4	9,8 20,4		
Volumen (cc)	1539	1535		
Densidad (grs/cc)	2,39	2,41		2,4
Fuerza (kgf)	17570	17460		
Area (cm ²)	75,4	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	232,9	231,5		232,2
Resistencia (MPa)	23,3	23,1		23,2
Desviación	0%	0%	-100%	
7 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3701	3699,4		
Dimensiones (cm)	9,82 20,4	9,8 20,6		
Volumen (cc)	1541	1554		
Densidad (grs/cc)	2,40	2,38		2,4
Fuerza (kgf)	27540	29170		
Area (cm ²)	75,7	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	363,6	386,7		375,2
Resistencia (MPa)	36,4	38,7		37,5
Desviación	-3%	3%	-100%	
14 días Hora ensayo: 10:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3675,0	3662,1		
Dimensiones (cm)	9,8 20,1	9,8 20,1		
Volumen (cc)	1516	1516		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	31380	28870		
Area (cm ²)	75,4	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	416,0	382,7		399,4
Resistencia (MPa)	41,6	38,3		39,9
Desviación	4%	-4%	-100%	
28 días Hora ensayo: 12:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3685,5	3699,8		
Dimensiones (cm)	9,8 20,4	9,81 20,3		
Volumen (cc)	1537	1531		
Densidad (grs/cc)	2,4	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	33650	33950		
Area (cm ²)	75,4	75,6		
Resistencia (kgf/cm ²)	446,1	449,2		447,6
Resistencia (MPa)	44,6	44,9		44,8
Desviación	0%	0%	-100%	
59 días Hora ensayo: 11:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3681,1	3678,3		
Dimensiones (cm)	9,8 20,2	9,83 20,3		
Volumen (cc)	1526	1541		
Densidad (grs/cc)	2,41	2,39		2,4
Fuerza (kgf)	38220	37680		
Area (cm ²)	75,4	75,9		
Resistencia (kgf/cm ²)	506,7	496,5		501,6
Resistencia (MPa)	50,7	49,6		50,2
Desviación	1%	-1%	-100%	
02-nov 274 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3698,0	3706,0	4004	
Dimensiones (cm)	9,86 20,2	9,83 20,4	10,2 20,3	
Volumen (cc)	1542	1544	1662	
Densidad (grs/cc)	2,4	2,4	2,41	2,4
Fuerza (kgf)	37720	38400	43110	
Area (cm ²)	76,4	75,9	82,0	
Resistencia (kgf/cm ²)	494,0	506,0	525,5	508,5
Resistencia (MPa)	49,4	50,6	52,6	50,8
Desviación	-3%	0%	3%	

Tabla 38: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-450-10°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 10:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3584,3	3898,1		
Dimensiones (cm)	9,8 20,4	10,2 20,2		
Volumen (cc)	1539	1643		
Densidad (grs/cc)	2,33	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	4440	4660		
Area (cm2)	75,4	81,6		
Resistencia (kgf/cm2)	58,9	57,1		58,0
Resistencia (MPa)	5,9	5,7		5,8
Desviación	1%	-1%	-100%	
3 días Hora ensayo: 10:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3553,7	3630,1		
Dimensiones (cm)	9,82 20,2	9,9 20,2		
Volumen (cc)	1531	1556		
Densidad (grs/cc)	2,32	2,33		2,3
Fuerza (kgf)	16960	18030		
Area (cm2)	75,7	77,0		
Resistencia (kgf/cm2)	223,9	234,2		229,1
Resistencia (MPa)	22,4	23,4		22,9
Desviación	-2%	2%	-100%	
7 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3889	3556,2	3649,6	
Dimensiones (cm)	10,3 20,2	9,81 20	9,88 20,2	
Volumen (cc)	1666	1515	1545	
Densidad (grs/cc)	2,33	2,35	2,36	2,3
Fuerza (kgf)	27710	28370	26450	
Area (cm2)	82,5	75,6	76,7	
Resistencia (kgf/cm2)	335,8	375,3	345,0	352,1
Resistencia (MPa)	33,6	37,5	34,5	35,2
Desviación	-5%	7%	-2%	
14 días Hora ensayo: 14:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3580,8	3607,7		
Dimensiones (cm)	9,85 20,1	9,83 20,3		
Volumen (cc)	1532	1538		
Densidad (grs/cc)	2,34	2,35		2,3
Fuerza (kgf)	27740	28750		
Area (cm2)	76,2	75,9		
Resistencia (kgf/cm2)	364,0	378,8		371,4
Resistencia (MPa)	36,4	37,9		37,1
Desviación	-2%	2%	-100%	
28 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)				
Dimensiones (cm)				
Volumen (cc)				
Densidad (grs/cc)				
Fuerza (kgf)				
Area (cm2)				
Resistencia (kgf/cm2)				398,7
Resistencia (MPa)				39,9
Desviación				
60 días Hora ensayo: 15:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3900	3585		
Dimensiones (cm)	10,2 20,2	9,8 20,3		
Volumen (cc)	1653	1527		
Densidad (grs/cc)	2,36	2,35		2,4
Fuerza (kgf)	33930	30350		
Area (cm2)	82,0	75,4		
Resistencia (kgf/cm2)	413,6	402,4		408,0
Resistencia (MPa)	41,4	40,2		40,8
Desviación	1%	-1%	-100%	
02-nov 226 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3876	3880		
Dimensiones (cm)	10,2 20,1	10,2 20,8		
Volumen (cc)	1648	1700		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,28		2,3
Fuerza (kgf)	35840	33480		
Area (cm2)	81,9	81,7		
Resistencia (kgf/cm2)	437,8	409,7		423,7
Resistencia (MPa)	43,8	41,0		42,4
Desviación	3%	-3%	-100%	

Tabla 39: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-450-23°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3576,1	3591,2		
Dimensiones (cm)	9,81 20,1	9,81 20,2		
Volumen (cc)	1519	1528		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,35		2,4
Fuerza (kgf)	5740	5760		
Area (cm ²)	75,6	75,6		
Resistencia (kgf/cm ²)	75,9	76,2		76,1
Resistencia (MPa)	7,6	7,6		7,6
Desviación	0%	0%	-100%	
3 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3625,4	3590,4		
Dimensiones (cm)	9,82 20,3	9,81 20,2		
Volumen (cc)	1537	1525		
Densidad (grs/cc)	2,36	2,36		2,4
Fuerza (kgf)	19620	20620		
Area (cm ²)	75,7	75,6		
Resistencia (kgf/cm ²)	259,1	272,8		265,9
Resistencia (MPa)	25,9	27,3		26,6
Desviación	-3%	3%	-100%	
28 días Hora ensayo: 16:45 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)				
Dimensiones (cm)				
Volumen (cc)				
Densidad (grs/cc)				
Fuerza (kgf)				
Area (cm ²)				
Resistencia (kgf/cm ²)				385,2
Resistencia (MPa)				38,5
Desviación				
7 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3627,4	3637,1		
Dimensiones (cm)	9,84 20,3	9,81 20,4		
Volumen (cc)	1544	1538		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,36		2,4
Fuerza (kgf)	25500	26280		
Area (cm ²)	76,0	75,6		
Resistencia (kgf/cm ²)	335,3	347,7		341,5
Resistencia (MPa)	33,5	34,8		34,2
Desviación	-2%	2%	-100%	
58 días Hora ensayo: 14:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3596,5	3621,6	3577,6	
Dimensiones (cm)	9,22 20,2	9,81 20,3	9,81 20,2	
Volumen (cc)	1351	1534	1525	
Densidad (grs/cc)	2,66	2,36	2,35	2,5
Fuerza (kgf)	31620	27970	30310	
Area (cm ²)	66,8	75,6	75,6	
Resistencia (kgf/cm ²)	473,6	370,1	401,0	385,5
Resistencia (MPa)	47,4	37,0	40,1	38,6
Desviación	23%	-4%	4%	
14 días Hora ensayo: 15:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3597,6	3605,8		
Dimensiones (cm)	9,82 20,2	9,82 20,3		
Volumen (cc)	1531	1537		
Densidad (grs/cc)	2,35	2,35		2,3
Fuerza (kgf)	28610	29010		
Area (cm ²)	75,7	75,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	377,8	383,0		380,4
Resistencia (MPa)	37,8	38,3		38,0
Desviación	-1%	1%	-100%	
02-nov 211 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3605			
Dimensiones (cm)	9,81 20,2			
Volumen (cc)	1527			
Densidad (grs/cc)	2,36			2,4
Fuerza (kgf)	29790			
Area (cm ²)	75,6			
Resistencia (kgf/cm ²)	394,1			394,1
Resistencia (MPa)	39,4			39,4
Desviación	0%			

Tabla 40: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón CC-450-40°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3563,8	3535,5		
Dimensiones (cm)	9,8 20,4	9,83 20,2		
Volumen (cc)	1539	1533		
Densidad (grs/cc)	2,32	2,31		2,3
Fuerza (kgf)	6150	6080		
Area (cm ²)	75,4	75,9		
Resistencia (kgf/cm ²)	81,5	80,1		80,8
Resistencia (MPa)	8,2	8,0		8,1
Desviación	1%	-1%	-100%	
3 días Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3566,1	3563,1		
Dimensiones (cm)	9,85 20,1	9,86 20,2		
Volumen (cc)	1529	1542		
Densidad (grs/cc)	2,33	2,31		2,3
Fuerza (kgf)	17930	18420		
Area (cm ²)	76,1	76,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	235,5	241,2		238,4
Resistencia (MPa)	23,6	24,1		23,8
Desviación	-1%	1%	-100%	
7 días Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3612,9	3893,1		
Dimensiones (cm)	9,89 20,3	10,3 20,3		
Volumen (cc)	1559	1675		
Densidad (grs/cc)	2,32	2,32		2,3
Fuerza (kgf)	20380	22380		
Area (cm ²)	76,8	82,5		
Resistencia (kgf/cm ²)	265,3	271,2		268,3
Resistencia (MPa)	26,5	27,1		26,8
Desviación	-1%	1%	-100%	
14 días Hora ensayo: 10:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3565,8	3519,6	3847,4	
Dimensiones (cm)	9,78 20,3	9,82 19,9	10,2 20,2	
Volumen (cc)	1528	1507	1647	
Densidad (grs/cc)	2,33	2,34	2,34	2,3
Fuerza (kgf)	19990	23700	22690	
Area (cm ²)	75,1	75,7	81,7	
Resistencia (kgf/cm ²)	266,1	312,9	277,7	285,6
Resistencia (MPa)	26,6	31,3	27,8	28,6
Desviación	-7%	10%	-3%	
28 días Hora ensayo: 11:50 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3591,0	3585,0	3673,1	
Dimensiones (cm)	9,82 20,2	9,82 20,3	9,89 20,3	
Volumen (cc)	1526	1539	1559	
Densidad (grs/cc)	2,35	2,33	2,36	2,3
Fuerza (kgf)	22730	19780	23490	
Area (cm ²)	75,7	75,7	76,8	
Resistencia (kgf/cm ²)	300,1	261,2	305,8	289,0
Resistencia (MPa)	30,0	26,1	30,6	28,9
Desviación	4%	-10%	6%	
60 días Hora ensayo: 16:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3917,1	3891,8		
Dimensiones (cm)	10,3 20,4	10,3 20,2		
Volumen (cc)	1682	1669		
Densidad (grs/cc)	2,33	2,33		2,3
Fuerza (kgf)	25820	27460		
Area (cm ²)	82,7	82,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	312,3	332,1		322,2
Resistencia (MPa)	31,2	33,2		32,2
Desviación	-3%	3%		
02-nov 247 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3606,0	3915,0		
Dimensiones (cm)	9,85 20,2	10,2 20,2		
Volumen (cc)	1540	1660		
Densidad (grs/cc)	2,34	2,36		2,3
Fuerza (kgf)	28980	27900		
Area (cm ²)	76,2	82,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	380,3	339,4		359,9
Resistencia (MPa)	38,0	33,9		36,0
Desviación	6%	-6%		

Tabla 41: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón P-350-23°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 15:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3744,4	3815,3		
Dimensiones (cm)	9,85 20,1	9,85 20,2		
Volumen (cc)	1533	1541		
Densidad (grs/cc)	2,44	2,48		2,5
Fuerza (kgf)	20210	19560		
Area (cm ²)	76,2	76,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	265,2	256,7		261,0
Resistencia (MPa)	26,5	25,7		26,1
Desviación	2%	-2%		-100%
3 días Hora ensayo: 15:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3724,5	3808,8		
Dimensiones (cm)	9,75 20	9,85 20,2		
Volumen (cc)	1495	1541		
Densidad (grs/cc)	2,49	2,47		2,5
Fuerza (kgf)	33190	31280		
Area (cm ²)	74,7	76,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	444,5	410,5		427,5
Resistencia (MPa)	44,5	41,0		42,8
Desviación	4%	-4%		-100%
28 días Hora ensayo: 10:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3754,4	4066,8		
Dimensiones (cm)	9,85 20,2	10,2 20,2		
Volumen (cc)	1535	1651		
Densidad (grs/cc)	2,45	2,46		2,5
Fuerza (kgf)	45160	43970		
Area (cm ²)	76,2	81,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	592,6	538,1		565,4
Resistencia (MPa)	59,3	53,8		56,5
Desviación	5%	-5%		-100%
7 días Hora ensayo: 16:30				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3746	3733		
Dimensiones (cm)	9,75 20,2	9,75 20,2		
Volumen (cc)	1510	1510		
Densidad (grs/cc)	2,48	2,47		2,5
Fuerza (kgf)	39350	30490		
Area (cm ²)	74,7	74,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	527,0	408,4		527,0
Resistencia (MPa)	52,7	40,8		52,7
Desviación	0%	-23%		-100%
62 días Hora ensayo: 17:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3724,4	3760,7		
Dimensiones (cm)	9,85 20,1	9,85 20,4		
Volumen (cc)	1532	1551		
Densidad (grs/cc)	2,43	2,43		2,4
Fuerza (kgf)	44810	48460		
Area (cm ²)	76,2	76,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	588,0	635,9		612,0
Resistencia (MPa)	58,8	63,6		61,2
Desviación	-4%	4%		-100%
14 días Hora ensayo: 12:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3756,5	3760,1		
Dimensiones (cm)	9,85 20,1	9,75 20,3		
Volumen (cc)	1533	1513		
Densidad (grs/cc)	2,45	2,49		2,5
Fuerza (kgf)	45830	39400		
Area (cm ²)	76,2	74,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	601,4	527,7		564,6
Resistencia (MPa)	60,1	52,8		56,5
Desviación	7%	-7%		-100%
02-nov 288 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3742	4090		
Dimensiones (cm)	9,82 20,2	10,2 20,1		
Volumen (cc)	1526	1652		
Densidad (grs/cc)	2,45	2,48		2,5
Fuerza (kgf)	52760	62630		
Area (cm ²)	75,7	82,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	696,6	762,0		729,3
Resistencia (MPa)	69,7	76,2		72,9
Desviación	-4%	4%		-100%

Tabla 42: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón P-450-23°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 12:30				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3941,8	3610,1		
Dimensiones (cm)	10,2 20,2	9,65 20,2		
Volumen (cc)	1636	1479		
Densidad (grs/cc)	2,41	2,44		2,4
Fuerza (kgf)	15860	12000		
Area (cm ²)	80,9	73,1		
Resistencia (kgf/cm ²)	196,0	164,1		180,0
Resistencia (MPa)	19,6	16,4		18,0
Desviación	9%	-9%	-100%	
3 días Hora ensayo: 14:45				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3632,6	3603		
Dimensiones (cm)	9,75 20,1	9,85 19,9		
Volumen (cc)	1502	1518		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	25960	26940		
Area (cm ²)	74,7	76,2		
Resistencia (kgf/cm ²)	347,7	353,5		350,6
Resistencia (MPa)	34,8	35,4		35,1
Desviación	-1%	1%	-100%	
28 días Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)				
Dimensiones (cm)				
Volumen (cc)				
Densidad (grs/cc)				
Fuerza (kgf)				
Area (cm ²)				
Resistencia (kgf/cm ²)				514,6
Resistencia (MPa)				51,5
Desviación				
7 días Hora ensayo: 14:30				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3710	3663,3		
Dimensiones (cm)	9,85 20,1	9,75 20,1		
Volumen (cc)	1533	1502		
Densidad (grs/cc)	2,42	2,44		2,4
Fuerza (kgf)	31080	33230		
Area (cm ²)	76,2	74,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	407,9	445,1		426,5
Resistencia (MPa)	40,8	44,5		42,6
Desviación	-4%	4%	-100%	
60 días Hora ensayo: 12:00 hrs 15-mar				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3632,5	3699,7		
Dimensiones (cm)	9,81 20	9,8 20,3		
Volumen (cc)	1512	1531		
Densidad (grs/cc)	2,4	2,42		2,4
Fuerza (kgf)	44240	38840		
Area (cm ²)	75,6	75,4		
Resistencia (kgf/cm ²)	585,3	514,9		550,1
Resistencia (MPa)	58,5	51,5		55,0
Desviación	6%	-6%	-100%	
14 días Hora ensayo: 15:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3658,3	3734,2		
Dimensiones (cm)	9,85 20,2	9,75 20,2		
Volumen (cc)	1541	1510		
Densidad (grs/cc)	2,37	2,47		2,4
Fuerza (kgf)	35410	36410		
Area (cm ²)	76,2	74,7		
Resistencia (kgf/cm ²)	464,7	487,7		476,2
Resistencia (MPa)	46,5	48,8		47,6
Desviación	-2%	2%	-100%	
02-nov 296 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Peso (grs)	3945			
Dimensiones (cm)	10,3 20,1			
Volumen (cc)	1676			
Densidad (grs/cc)	2,35			
Fuerza (kgf)	52600			
Area (cm ²)	83,3			
Resistencia (kgf/cm ²)	631,3			
Resistencia (MPa)	63,1			
Desviación				

Tabla 43: Resistencia a compresión probetas sometidas a ciclos térmicos. Hormigón P-450-40°C-S/A.

Hormigón en Ciclo				
Desmolde frío - caliente				
1 día Hora ensayo: 10:20 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3643,4	3933,1		
Dimensiones (cm)	9,81 20,3	10,3 20,2		
Volumen (cc)	1534	1663		
Densidad (grs/cc)	2,37	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	21710	23250		
Area (cm2)	75,6	82,5		
Resistencia (kgf/cm2)	287,2	281,8		284,5
Resistencia (MPa)	28,7	28,2		28,4
Desviación	1%	-1%	-100%	
3 días Hora ensayo: 14:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3668,7	3653		
Dimensiones (cm)	9,8 20,4	9,83 20,4		
Volumen (cc)	1539	1544		
Densidad (grs/cc)	2,38	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	28740	30470		
Area (cm2)	75,4	75,9		
Resistencia (kgf/cm2)	381,0	401,5		391,3
Resistencia (MPa)	38,1	40,1		39,1
Desviación	-3%	3%	-100%	
28 días Hora ensayo: 10:15 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)				
Dimensiones (cm)				
Volumen (cc)				
Densidad (grs/cc)				
Fuerza (kgf)				
Area (cm2)				
Resistencia (kgf/cm2)				469,6
Resistencia (MPa)				47,0
Desviación				
7 días Hora ensayo: 11:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3710,8	3977,3		
Dimensiones (cm)	9,91 20,4	10,3 20,3		
Volumen (cc)	1570	1675		
Densidad (grs/cc)	2,36	2,37		2,4
Fuerza (kgf)	31920	34160		
Area (cm2)	77,1	82,5		
Resistencia (kgf/cm2)	413,8	414,0		413,9
Resistencia (MPa)	41,4	41,4		41,4
Desviación	0%	0%	-100%	
60 días Hora ensayo: 10:30 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3689,5	3708,5		
Dimensiones (cm)	9,82 20,3	9,81 20,4		
Volumen (cc)	1540	1540		
Densidad (grs/cc)	2,4	2,41		2,4
Fuerza (kgf)	34590	39890		
Area (cm2)	75,7	75,6		
Resistencia (kgf/cm2)	456,7	527,8		492,2
Resistencia (MPa)	45,7	52,8		49,2
Desviación	-7%	7%	-100%	
14 días Hora ensayo: 12:00 hrs				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	3671,9	3631,3		
Dimensiones (cm)	9,8 20,4	9,81 20,2		
Volumen (cc)	1535	1527		
Densidad (grs/cc)	2,39	2,38		2,4
Fuerza (kgf)	33790	34310		
Area (cm2)	75,4	75,6		
Resistencia (kgf/cm2)	448,0	453,9		451,0
Resistencia (MPa)	44,8	45,4		45,1
Desviación	-1%	1%	-100%	
02-nov 233 días Hora ensayo:				
	Probeta 1	Probeta 2		Promedio
Peso (grs)	4031	3741		
Dimensiones (cm)	10,3 20,3	9,84 20,5		
Volumen (cc)	1684	1555		
Densidad (grs/cc)	2,39	2,41		2,4
Fuerza (kgf)	41780	38520		
Area (cm2)	82,8	76,0		
Resistencia (kgf/cm2)	504,4	506,5		505,4
Resistencia (MPa)	50,4	50,7		50,5
Desviación	0%	0%	-100%	

ANEXO E: Curvas de Mejor Ajuste a Relación Resistencia-Tiempo

Varias investigaciones han propuesto diferentes relaciones Resistencia-Tiempo para hormigones. A continuación se presentan las ecuaciones más reconocidas (adaptada de Ferreira, 2004).

Se realizaron ajustes a las curvas Resistencia vs Tiempo. Éstas se indican en la Tabla 44 (adaptada de Ferreira, 2004) para los diferentes hormigones realizados según el factorial del experimento.

Tabla 44: Relaciones resistencia-tiempo.

Número	Relación	Propuesta por
1	$S = S_u(1 - e^{-kt})$	Nykanen, 1956
2	$S = a + b \log(t)$	Plowman, 1956
3	$S = \frac{t}{\frac{1}{A} + \frac{t}{S_u}}$	Bernhardt, 1956; Chin, 1971
4	$S = \frac{S_u k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)}$	Carino y Lew, 1983; Carino 1984
5	$S = S_u e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^a}$	Freiesleben Hansen y Pedersen, 1985
6	$S = S_u \frac{\sqrt{k(t - t_0)}}{1 + \sqrt{k(t - t_0)}}$	Knudsen, 1984
7	$S = a + b[\log(t)]^c$	Videla y Parada, 1988
8	$S = \left[e^{\frac{c}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \right]^2 S_{28}$	Gardner, 2004

Donde, S es la resistencia a compresión (MPa), S_u es la resistencia límite (MPa), t es el tiempo transcurrido desde la fabricación del hormigón (h), t_0 es la edad donde el hormigón comienza a ganar resistencia (h) y $k, a, b, c, A, D, r, a, S_{28}, s$ son variables que dependen de cada mezcla y se obtienen por regresión.

En la Tabla 45 y Tabla 46 se muestran los parámetros de ajuste a todos los hormigones estudiados, tanto los que fueron sometidos a ciclos térmicos como los que se mantuvieron todo el tiempo en curado normalizado (23 °C). Se ajustaron las curvas con resultados a compresión desde 1 hasta 60 días. Además se indica el coeficiente de determinación de cada curva y en celdas sombreadas se ve el valor más alto dentro de las curvas ajustadas. En general para la mayoría de los hormigones estudiados, si bien el coeficiente de determinación es alto, el comportamiento de la resistencia de hormigones pareciera ajustarse mejor a la ecuación de Freiesleben-Hansen y Pedersen (1985). Por el contrario, valores bajos de coeficiente de determinación se observan para la ecuación de Plowman (1956).

Tabla 45: Parámetros de curvas de mejor ajuste a resistencia vs tiempo para las diferentes mezclas estudiadas bajo diferentes regímenes térmicos (Parte 1).

	$T_i - T_{máx}$	Nykanen, 1956			Plowman, 1956			Bernhardt, 1956; Chin, 1971			Carino y Lew, 1983, Carino, 1984			
		1			2			3			4			
		Su	k	R^2	a	b	R^2	A	Su	R^2	Su	k	t_0	R^2
AR-350-S/A	10°C - 50°C	46,8	0,310	0,963	17,2	20,9	0,916	20,6	52,1	0,975	50,7	0,521	0,376	0,982
	23°C - 60°C	51,2	0,524	0,986	28,6	16,5	0,837	43,0	55,0	0,986	53,9	1,076	0,333	0,995
	40°C - 80°C	47,6	0,569	0,988	27,4	14,8	0,757	42,7	51,1	0,951	49,0	1,936	0,650	0,999
	23°C - cte	49,0	0,249	0,976	13,8	27,2	0,987	16,8	57,3	0,993	56,9	0,304	0,054	0,993
AR-350-C/Re	23°C - 60°C	54,3	0,541	0,970	30,6	17,5	0,860	46,5	58,5	0,993	57,5	1,039	0,284	0,998
	23°C - cte	47,3	0,303	0,977	15,7	25,2	0,981	19,7	54,7	0,996	54,0	0,395	0,122	0,997
AR-450-S/A	10°C - 60°C	45,9	0,411	0,962	22,1	17,1	0,894	28,9	50,0	0,990	49,4	0,678	0,198	0,992
	23°C - 70°C	52,8	0,500	0,935	28,6	17,4	0,890	40,2	57,2	0,988	56,8	0,775	0,117	0,989
	40°C - 90°C	37,3	0,629	0,988	22,1	11,5	0,930	36,5	40,1	0,981	40,1	0,909	0,000	0,981
	23°C - cte	47,6	0,252	0,956	13,6	26,3	0,988	16,5	55,6	0,985	55,6	0,297	0,000	0,985
CC-350-S/A	10°C - 40°C	45,2	0,135	0,988	5,2	25,3	0,982	8,1	52,9	0,992	50,8	0,200	0,608	0,999
	23°C - 50°C	42,5	0,181	0,984	8,9	21,7	0,951	10,6	48,3	0,990	46,5	0,298	0,555	1,000
	40°C - 70°C	31,8	0,497	0,986	16,9	10,8	0,705	24,4	34,2	0,919	32,4	2,042	0,761	0,997
	23°C - cte	32,5	0,094	0,980	0,2	20,1	0,983	3,5	44,4	0,984	40,4	0,106	0,599	0,988
CC-350-C/Re	23°C - 50°C	45,9	0,232	0,965	13,5	22,1	0,960	14,9	51,9	0,986	51,4	0,311	0,136	0,987
	23°C - cte	37,2	0,165	0,978	6,0	22,3	0,999	7,9	45,6	0,993	45,2	0,180	0,063	0,993
CC-450-S/A	10°C - 50°C	40,0	0,262	0,984	11,8	19,5	0,862	14,6	44,8	0,957	42,5	0,579	0,737	0,994
	23°C - 60°C	38,6	0,320	0,986	14,3	17,1	0,815	17,9	42,6	0,949	40,3	0,838	0,725	0,997
	40°C - 80°C	29,8	0,424	0,948	13,5	11,9	0,803	18,1	32,7	0,928	30,8	1,362	0,736	0,985
	23°C - cte	31,6	0,143	0,981	3,4	19,5	0,992	5,6	39,6	0,986	37,9	0,170	0,328	0,988
PP-350-S/A	23°C - 60°C	57,0	0,514	0,958	31,5	18,7	0,887	46,7	61,4	0,992	61,1	0,824	0,098	0,992
	23°C - cte	57,2	0,227	0,982	14,6	32,3	0,996	17,5	67,4	0,998	67,5	0,260	0,000	0,998
PP-450-S/A	23°C - 75°C	50,6	0,376	0,948	22,6	19,9	0,937	28,2	55,5	0,994	55,3	0,534	0,070	0,994
	40°C - 95°C	45,2	0,899	0,843	31,2	11,1	0,930	66,8	48,0	0,969	48,0	1,392	0,000	0,969
	23°C - cte	54,8	0,174	0,986	8,6	33,6	0,998	12,2	67,1	0,994	64,2	0,227	0,363	0,997

Tabla 46: Parámetros de curvas de mejor ajuste a resistencia vs tiempo para las diferentes mezclas estudiadas bajo diferentes regímenes térmicos (Parte 2).

	$T_i - T_{\max}$	Freiesleben Hansen y Pedersen, 1985				Knudsen, 1984				Videla y Parada, 1988				Gardner, 2004	
		5				6				7				8	
		Su	r	a	R ²	Su	k	t0	R ²	a	b	c	R ²	s	R ²
AR-350-S/A	10°C - 50°C	51,9	1,524	0,829	0,983	59,8	0,512	0,867	0,982	12,3	28,2	0,558	0,980	0,242	0,965
	23°C - 60°C	53,8	0,874	0,991	0,995	58,3	2,529	0,843	0,987	22,5	25,3	0,398	0,980	0,158	0,947
	40°C - 80°C	48,4	0,921	1,386	0,997	51,7	6,555	0,942	0,998	19,7	25,7	0,257	0,997	0,152	0,892
	23°C - cte	65,0	2,340	0,582	0,995	78,1	0,142	0,752	0,995	12,3	29,3	0,818	0,995	0,308	0,994
AR-350-C/Re	23°C - 60°C	57,8	0,845	0,927	0,998	62,4	2,393	0,826	0,997	24,4	26,5	0,413	0,993	0,156	0,962
	23°C - cte	58,9	1,763	0,649	0,998	70,0	0,242	0,754	0,998	13,7	28,0	0,743	0,998	0,279	0,995
AR-450-S/A	10°C - 60°C	50,3	1,078	0,812	0,993	55,3	1,079	0,809	0,990	17,2	24,3	0,495	0,985	0,194	0,971
	23°C - 70°C	58,4	0,896	0,765	0,992	62,4	1,505	0,780	0,997	22,7	26,0	0,471	0,996	0,174	0,976
	40°C - 90°C	42,6	0,668	0,636	0,989	44,4	1,669	0,646	0,995	19,3	15,8	0,535	0,999	0,145	0,986
	23°C - cte	67,4	2,618	0,520	0,990	77,1	0,133	0,727	0,994	12,3	28,1	0,832	0,995	0,316	0,990
CC-350-S/A	10°C - 40°C	53,3	3,720	0,750	0,999	74,5	0,059	0,959	0,989	3,2	28,4	0,823	0,990	0,442	0,990
	23°C - 50°C	47,7	2,582	0,815	1,000	59,6	0,165	0,943	0,991	5,1	27,6	0,661	0,988	0,363	0,980
	40°C - 70°C	31,9	1,062	1,604	0,999	34,0	7,342	0,972	0,992	10,6	19,5	0,211	0,988	0,168	0,849
	23°C - cte	52,8	9,455	0,536	0,990	194,5	0,001	0,988	0,988	1,4	18,3	1,244	0,992	0,642	0,989
CC-350-C/Re	23°C - 50°C	55,5	2,157	0,648	0,988	65,1	0,198	0,800	0,983	10,7	26,4	0,729	0,980	0,297	0,983
	23°C - cte	60,7	5,492	0,471	0,997	78,5	0,034	0,800	1,000	6,0	22,3	1,001	0,999	0,427	0,997
CC-450-S/A	10°C - 50°C	41,5	1,827	1,176	0,996	49,7	0,566	0,970	0,979	5,6	28,5	0,458	0,973	0,292	0,927
	23°C - 60°C	39,5	1,492	1,268	0,999	45,0	1,239	0,967	0,985	7,5	26,9	0,366	0,979	0,246	0,906
	40°C - 80°C	30,3	1,201	1,384	0,979	33,6	2,665	0,962	0,993	8,1	19,6	0,305	0,950	0,192	0,898
	23°C - cte	47,1	5,267	0,544	0,990	71,3	0,024	0,901	0,993	3,4	19,6	0,994	0,992	0,464	0,990
PP-350-S/A	23°C - 60°C	62,1	0,842	0,804	0,992	67,1	1,639	0,755	0,989	26,0	26,9	0,484	0,984	0,154	0,973
	23°C - cte	80,6	2,900	0,534	0,999	97,5	0,096	0,729	0,999	13,5	33,8	0,887	0,998	0,333	0,999
PP-450-S/A	23°C - 75°C	58,0	1,216	0,694	0,997	63,4	0,686	0,770	1,000	17,9	26,9	0,566	0,999	0,216	0,989
	40°C - 95°C	51,5	0,384	0,567	0,987	52,4	2,886	0,504	0,991	28,5	15,1	0,542	0,996	0,110	0,986
	23°C - cte	73,4	3,513	0,623	0,999	104,5	0,051	0,881	0,999	7,6	35,0	0,900	1,000	0,411	0,997

ANEXO F: Trabajabilidad del Hormigón a Diferentes Temperaturas

Tabla 47: Trabajabilidad según temperatura de fabricación de la mezcla.

PP-350-S/A			PP-450-S/A	
Temp. Inicial Teórica (°C)	Temp. Inicial Medida (°C)	Cono (cm)	Temp. Inicial Medida (°C)	Cono (cm)
10				
23	24,1	4	23,7	20
40			36,9	15

AR-350-S/A			AR-450-S/A		AR-350-C/Re	
Temp. Inicial Teórica (°C)	Temp. Inicial Medida (°C)	Cono (cm)	Temp. Inicial Medida (°C)	Cono (cm)	Temp. Real (°C)	Cono (cm)
10	16,6	6	16,8	22		
23	19,7	3	23,3	12	24,3	4
40	35,5	2	37,1	13		

CC-350-S/A			CC-450-S/A		CC-350-C/Re	
Temp. Inicial Teórica (°C)	Temp. Inicial Medida (°C)	Cono (cm)	Temp. Inicial Medida (°C)	Cono (cm)	Temp. Real (°C)	Cono (cm)
10	14,4	4	14,2	19		
23	22,8	3	19,6	17	24,3	4
40	35,8	2	35,6	17		

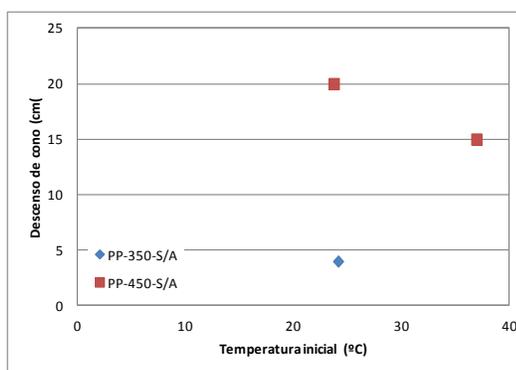


Figura 79: Descenso de cono vs temperatura inicial de hormigones con cemento Portland.

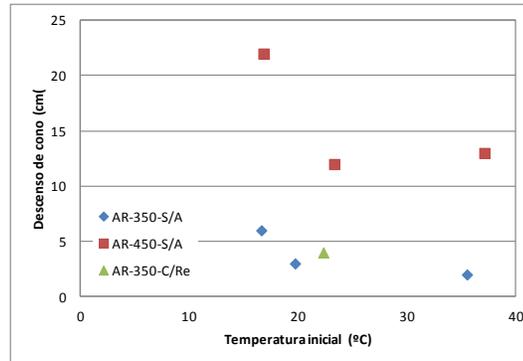


Figura 80: Descenso de cono vs temperatura inicial de hormigones con cemento Portland Pozolánico Alta Resistencia.

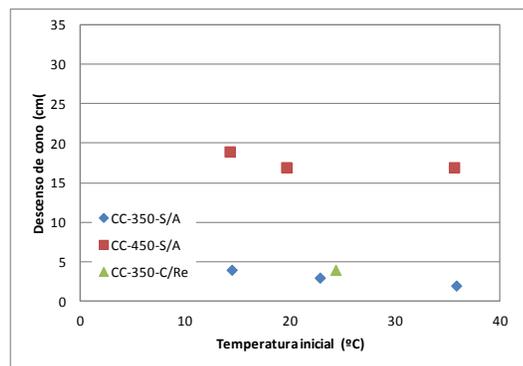


Figura 81: Descenso de cono vs temperatura inicial de hormigones con cemento Pozolánico Corriente.

ANEXO G: Análisis Ensayo Tiempo de Fraguado ASTM

El procedimiento ASTM C 403-C 403M (2005) para determinar el tiempo de fraguado de una mezcla de hormigón consiste en primero fabricar el hormigón, para luego tamizarlo en estado fresco a través de una malla de 5 mm de abertura. Por lo complejo de este mecanismo, y porque las mezclas con dosis 350 kg/m^3 tenían muy bajo cono (entre 2 y 4 cm) se procedió a evaluar una mezcla de hormigón tamizada según ASTM y compararla con otra dosificada de manera diferente, tal que se lograra un mortero con las mismas proporciones de áridos y pasta. Se utilizó una razón W/C de 0,5 y 450 kg/m^3 de cemento Alta Resistencia. Se concluyó que el tiempo de fraguado se puede estudiar confeccionando la mezcla con una dosificación diferente.

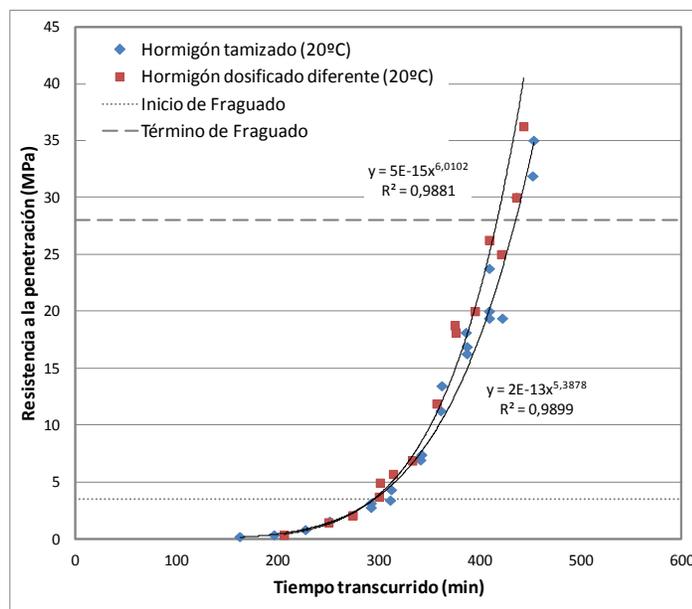


Figura 82: Comparación de tiempos de fraguado entre mezcla dosificada y tamizada.

ANEXO H: Resistencia a Compresión Cilindros de Hormigón y Cubos de Mortero

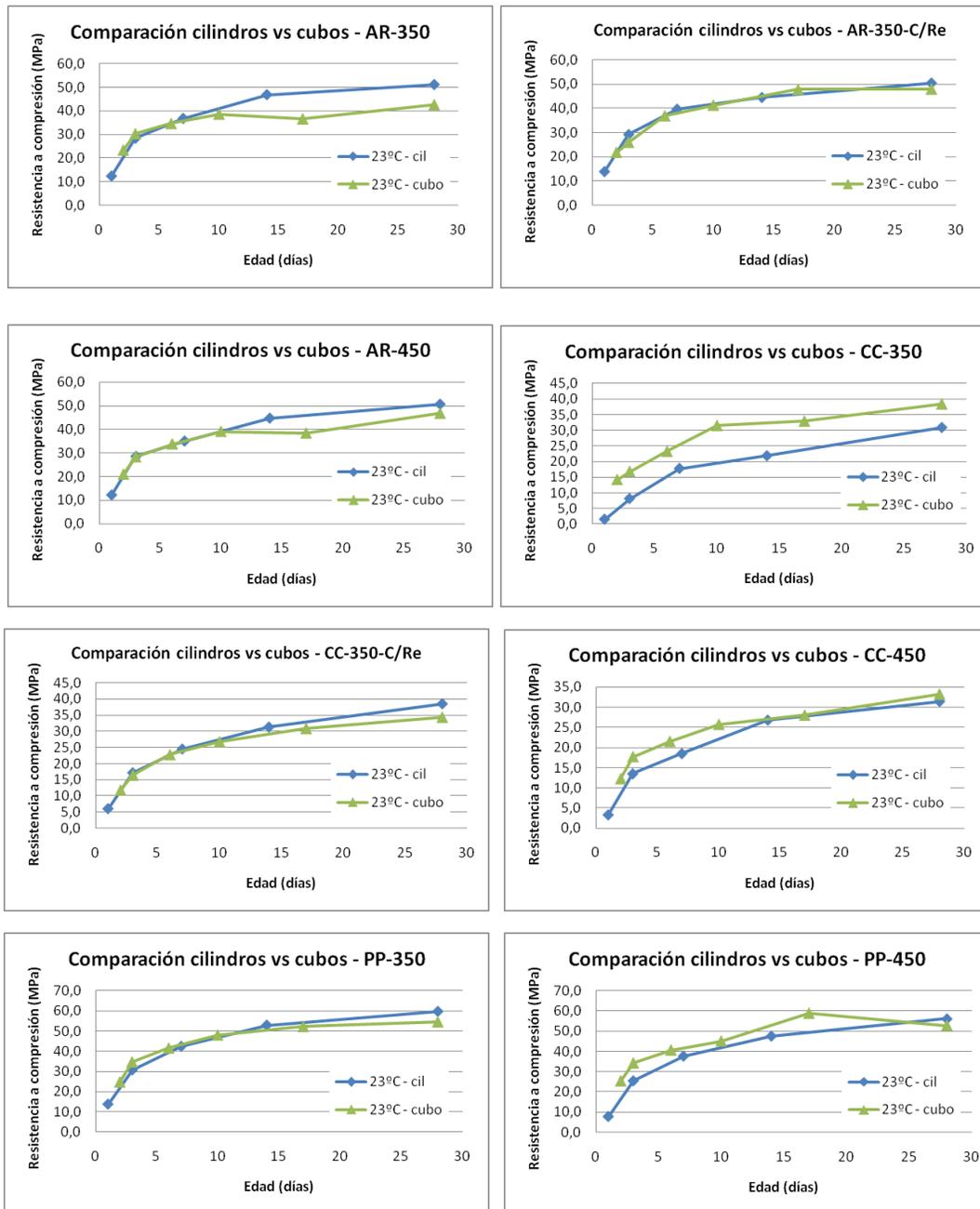


Figura 83: Evolución de resistencia para hormigones y morteros equivalentes.

En la Figura 84 se presenta la comparación del parámetro “ k ” de la Ecuación 5.5 Hiperbólica (Chin, 1971; Carino y Lew, 1983) para hormigón (k_h) y mortero (k_m).

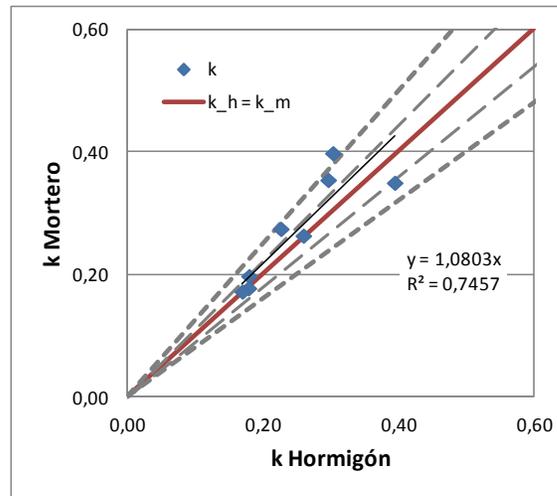


Figura 84: Constantes “ k ” de hormigón vs mortero curados a 23 °C.

ANEXO I: Análisis Estadístico Resistencia a Compresión Cilindros de Hormigón y Cubos de Mortero

A continuación se realiza una evaluación de regresión de los cubos de mortero y cilindros de hormigón, ambos sometidos a 23 °C de curado isotérmico.

Sea t_{b0} el estadístico t del parámetro de corte de la recta de regresión (lineal con respecto al logaritmo del tiempo) y t_{b1} el estadístico t de la pendiente de la recta de regresión. Se comparan ambos estadísticos con una t *student* de 4 grados de libertad y $\alpha = 5\%$ ($\pm 2,776$).

Tabla 48: Estadísticos t para las diferentes dosificaciones estudiadas.

Dosificación	t_{b1}	Conclusión	t_{b0}	Conclusión
AR-350-S/A	-5,75	Pendiente distinta	3,87	Intersección distinta
AR-350-C/Re	-0,20	Pendiente igual	-0,15	Intersección igual
AR-450-S/A	-2,72	Pendiente igual	1,77	Intersección igual
CC-350-S/A	1,61	Pendiente igual	4,81	Intersección distinta
CC-350-C/Re	-3,65	Pendiente distinta	1,15	Intersección igual
CC-450-S/A	-2,32	Pendiente igual	4,49	Intersección distinta
P-350-S/A	-2,46	Pendiente igual	2,22	Intersección igual
P-450-S/A	-1,32	Pendiente igual	3,20	Intersección distinta

Tabla 49: Tabla ANOVA y factorial del experimento.

FV	SC	GL	CM	Fo	valor p
Efecto A	324,1075	2	162,0538	126,8109	8,5E-09
Efecto B	22,62042	1	22,62042	17,70101	0,001216
Efecto C	639,6338	1	639,6338	500,5285	3,75E-11
Efecto AB	23,93583	2	11,96792	9,365178	0,003546
Efecto AC	85,1175	2	42,55875	33,30323	1,27E-05
Efecto BC	0,220417	1	0,220417	0,172481	0,685245
Efecto ABC	39,38563	2	19,69282	15,41009	0,000484
Error	15,335	12	1,277917		
Total	1150,356	23			

Donde A: Es la temperatura inicial.

B: Es la cantidad de cemento.

C: Es el tipo de cemento.

**ANEXO J:Artículo: Efecto de la Temperatura Máxima en la Resistencia a
Compresión del Hormigón**

EFFECTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

Carrillo, Eugenia¹; Videla, Carlos²; Castro, Javier³

¹ *Ingeniero Civil, Estudiante de Magíster en Ciencias, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile*

² *Profesor Titular, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile*

³ *Profesor Asistente, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile*

05 de diciembre de 2011

7.1 Resumen

La especificación de altas dosis de cemento en hormigones estructurales masivos genera importantes temperaturas en el hormigón, alcanzando valores muy superiores a los recomendados en la práctica. Estas altas temperaturas pueden afectar negativamente la resistencia a largo plazo y la durabilidad del hormigón. Esta investigación analiza el efecto de la temperatura del hormigón sobre la resistencia a compresión a temprana edad y largo plazo. Además, considerando que es común el uso de materiales de reemplazo de cemento para controlar el agrietamiento térmico a temprana edad, se evalúa el comportamiento de hormigones fabricados con tres tipos de cementos con 0, 15 y 35% de puzolanas naturales y con distinta finura Blaine.

Considerando los calores de hidratación y dosis de cemento se simularon ciclos térmicos esperados de los hormigones y se sometieron a temperaturas máximas entre 40 y 90°C. Se realizaron ensayos a compresión a temprana edad (1, 7 y 14 días) y a largo plazo (28, 60 y 210 días).

A mayor temperatura del hormigón, mayor fue la velocidad de ganancia de resistencia a temprana edad, pero menor la magnitud de resistencia a mediano y largo plazo, respecto al curado estándar. El comportamiento depende de la dosis de puzolana y de la finura del cemento. A mayor contenido de puzolana, la disminución de la magnitud de resistencia a largo plazo se ve retardada en el tiempo. La velocidad de ganancia de resistencia a temprana edad fue mayor a mayor dosis y menor finura del cemento.

Se concluyó que el deterioro de la resistencia del hormigón a largo plazo depende de la magnitud de la temperatura máxima y del tipo de cemento. Para cementos con 0, 15 y 35% de puzolana, la máxima temperatura del hormigón a la que comenzó a disminuir la resistencia en comparación a la obtenida con curado estándar, fue de 60, 70 y 75°C, respectivamente.

Palabras clave: altas temperaturas, resistencia a compresión, puzolanas naturales.

7.2 Introducción

Diseñadores y constructores de grandes presas de hormigón fueron los primeros en detectar la importancia del aumento de temperatura en las propiedades resistentes y de durabilidad del hormigón y durabilidad en el riesgo de agrietamiento que podían producir (1,2). Normalmente son los hormigones masivos y los curados a altas temperaturas en la industria del hormigón prefabricado los que presentan estos tipos de problemas y se han realizado muchos estudios con respecto a problemas térmicos del hormigón (3, 4, 5). Este fenómeno también puede ocurrir en columnas, pilotes, vigas, muros, fundaciones y en general estructuras de menores dimensiones que una presa, pero que por la cantidad de material cementicio presente, y por técnicas constructivas que retardan la disipación de calor, la temperatura a la que pueden llegar es bastante alta, superando incluso los 90°C. Esto no sólo puede generar agrietamiento por diferencial térmico (restricciones internas o externas) sino que también agrietamiento por la generación de productos expansivos en la pasta de cemento, fenómeno denominado formación diferida de etringita (2, 6, 7).

La fenomenología de las altas temperaturas de curado en el hormigón también está presente en la confección de hormigón prefabricado. Elementos como vigas estructurales generalmente son curados al vapor a temperaturas sobre los 60°C e incluso 90°C igual pueden presentar un deterioro de la resistencia (6,7).

Ha sido reportado que para hormigones fabricados con cementos Portland y curados a temprana edad a temperaturas de hasta 40°C, si bien aumenta la resistencia los primeros días, en el largo plazo (28 o más días) disminuye la ganancia de resistencia con respecto a probetas curadas a menor temperatura inicial, observándose incluso el cruce de las curvas resistencia-tiempo (7, 8, 9, 10, 11). Este fenómeno podría deberse a la peor la mala calidad de los productos de hidratación producidos bajo condiciones de alta temperatura a temprana edad, lo que en un mediano a largo plazo reduciría la magnitud de la resistencia al no permitir con suficiente tiempo la difusión en la hidratación (8). El hormigón endurecido (grado de hidratación alto) también puede presentar menores resistencias cuando se somete a altas temperaturas.

También en el caso de experimentar muy altas temperaturas en pastas de cemento que ya están en un proceso avanzado de hidratación (por lo tanto presentan poca permeabilidad), el agua al presentarse como vapor y expandir su volumen puede también generar fisuras internas debido a la presión (2). Estas grietas pueden tener como consecuencia una disminución en las propiedades resistentes en el tiempo.

En general cuando se anticipa que un hormigón tendrá altas temperaturas durante la construcción, las medidas que se adoptan se enfocan a prevenir problemas de durabilidad, agrietamiento de la estructura y posibles pérdidas de resistencia a largo plazo. Valores se han propuesto para la temperatura máxima (70°C) y diferencia máxima admisible (20°C) (3, 12). Resultados de estudios sugieren que si la temperatura interna del hormigón supera 82°C, la durabilidad a largo plazo puede verse afectada por la formación tardía de etringita (13) y se observa normalmente en cementos o áridos con gran cantidad de sulfatos. Estos daños pueden no detectarse hasta años después de que la obra fue construida y se han observado en hormigones prefabricados curados con vapor de agua donde la temperatura ha llegado a los 90°C. No obstante según Mehta y Monteiro (2) la etringita puede formarse a temperaturas tan bajas como 65°C.

La problemática de la magnitud de resistencia en el largo plazo ha sido estudiada también para hormigones con adiciones cementantes como escoria de alto horno, cenizas volantes o puzolanas naturales (6, 11, 14, 15, 16). El uso de adiciones cementantes en hormigones curados bajo agua a mayores temperaturas a la estándar mejora la magnitud de la resistencia a largo plazo (14). Además el módulo de elasticidad sería mayor al conseguido bajo condiciones de curado estándar (20°C) y mayores a hormigones fabricados con cemento Portland. Con respecto a *creep*, se reportan menores valores con el uso de adiciones cementantes (17, 18).

En el caso de usar adiciones cementantes como ceniza volante, escoria de alto horno o puzolanas naturales, no ha sido demostrado el efecto de cruce. Reportes de resistencia para curados isotérmicos de hasta 40°C en morteros (11) y hormigones con puzolanas naturales (15) indican que a mayor temperatura, mayor es la resistencia hasta al menos 28 días de edad.

7.3 Importancia de la Investigación

En la literatura especializada se encuentran muchos estudios del efecto de las altas temperaturas en hormigones fabricados con cementos Portland (11, 14, 16, 19, 20) pero existe limitada información respecto a hormigones fabricados con puzolanas naturales y sometidos a curados a altas temperaturas (sobre 40°C). Esta investigación busca ayudar a llenar este vacío dado el aumento del uso de puzolanas en los hormigones masivos y a las altas dosis de cemento que se especifican en la actualidad para estas aplicaciones. Por lo tanto en esta investigación se analiza la evolución de la resistencia a compresión en hormigones sometidos a elevadas temperaturas, similares a las condiciones reales de hormigones masivos en terreno. Se analiza el efecto del contenido de puzolana y de la finura Blaine, además de las temperaturas iniciales y máximas experimentadas, para determinar si se producen pérdidas de resistencia a temprana edad y largo plazo. A partir de los resultados obtenidos se entregan recomendaciones respecto a las temperaturas máximas del hormigón que sería adecuado incorporar a las especificaciones.

7.4 Programa de Investigación

4.1 Materiales Utilizados

4.1.1 Áridos

Se utilizaron 2 tipos de áridos: gravilla chancada de tamaño máximo 20 mm y arena gruesa chancada en proporción 50% cada árido.

4.1.2 Cementos

Se utilizaron 3 tipos de cemento: Portland Tipo I con 0% de puzolana natural (P) según ASTM C150 y 3.939 cm²/gr de finura Blaine, Portland Puzolánico Alta Resistencia con 15% de puzolana natural (AR) y mayor finura (4.840 cm²/gr) para lograr un comportamiento a compresión similar a un cemento Portland y Puzolánico Corriente con 35% de puzolana natural (CC) y 4.452 cm²/gr, según NCh 148. El calor de hidratación de los cementos se determinó mediante el ensayo semi-adiabático Langavant, según normativa francesa (25).

En la Figura 14 se muestran las curvas de calor de hidratación versus tiempo para cada uno de los cementos estudiados. Como era de esperarse, el cemento Portland tiene mayor calor de hidratación a 7 días (70 cal/gr) que el cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia (64 cal/gr) y que el cemento Puzolánico Corriente (50 cal/gr).

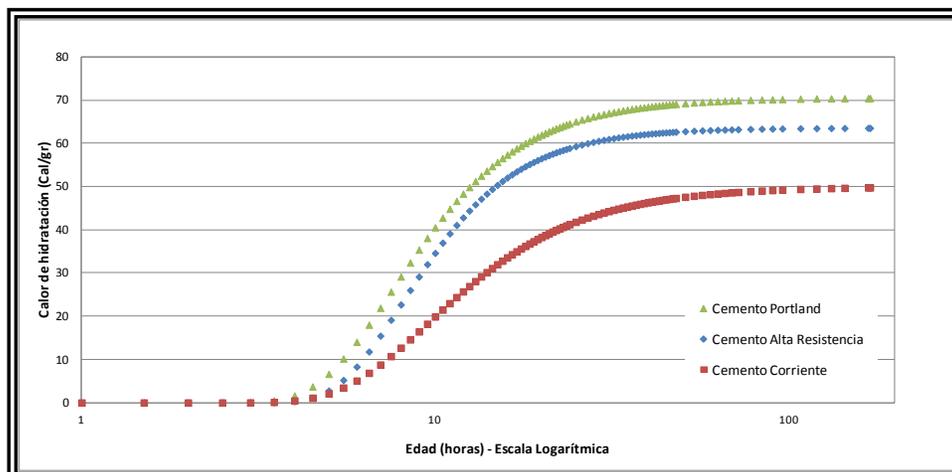


Figura 85: Calor de hidratación para Cemento Portland, Portland Puzolánico Alta Resistencia y Puzolánico Corriente.

4.2 Diseño de Experimentos

Se utilizaron 3 tipos de cemento y dos dosis de cemento: 350 kg/m^3 y 450 kg/m^3 . El objetivo de usar diferentes dosis de cemento fue lograr que los hormigones alcanzaran temperaturas máximas notoriamente distintas. Estos niveles se encuentran dentro de los comúnmente utilizados para proyectos con hormigones estructurales masivos.

Se utilizaron además 3 temperaturas iniciales distintas, simulando condiciones de enfriamiento del hormigón u hormigonado en clima frío (10°C), condiciones estándar ambientales (23°C) y condiciones de clima caluroso (40°C). Además para cada uno de los hormigones estudiados se prepararon probetas que se curaron a temperatura constante de 23°C .

En todos los hormigones se utilizó una razón agua/cemento (W/C) de 0,5. Este valor se definió dado que en proyectos de hormigones estructurales masivos se especifican comúnmente razones entre 0,45 y 0,55 (2). Además dicho valor permitió obtener una trabajabilidad adecuada para todas las mezclas estudiadas. Todas las mezclas se fabricaron sin aditivo.

Los hormigones fueron sometidos a diferentes ciclos térmicos simulando condiciones de terreno. En total se reprodujeron 15 ciclos (ver Tabla 5). En la Tabla 5 se indica la temperatura máxima calculada a la que fue sometido cada hormigón. En la sección siguiente se explica con mayor detalle las características de los ciclos térmicos aplicados.

Tabla 50: Hormigones estudiados.

Tipo de Cemento	Portland Puzolánico Alta Resistencia						Puzolánico Corriente						Portland		
	350			450			350			450			350	450	
Temperatura de Colocación ($^\circ\text{C}$)	10	23	40	10	23	40	10	23	40	10	23	40	23	23	40
Temperatura Máxima Calculada ($^\circ\text{C}$)	50	60	80	60	70	90	40	50	70	50	60	80	60	75	95

El diseño de las mezclas se realizó por volumen absoluto y dado que se fijaron la razón W/C y la dosis de cemento, la dosificación se ajustó con áridos.

4.3 Metodología y Descripción de Ensayos

4.3.1 Ciclos Térmicos Simulados en Hornos

La temperatura que puede alcanzar un hormigón se puede representar por la Ecuación (1).

$$T_{m\acute{a}x} = T_c + \Delta T_i \quad (1)$$

Donde $T_{m\acute{a}x}$ es la temperatura máxima que puede alcanzar el hormigón, T_c es la temperatura de colocación del hormigón y ΔT_i es la temperatura generada por la hidratación del cemento que depende entre otras cosas del tipo y cantidad de material cementicio.

Para determinar el valor de ΔT_i , existen varios métodos (3, 21, 13) y entre ellos destacan el Método Schmidt (22), el método gráfico (*Portland Cement Association*), el presentado en ACI 207.2R y la modelación con elementos finitos. Según Riding *et al.* (21) el método Schmidt, basado en resolver la ecuación de transferencia de calor unidireccional, es uno de los mejores métodos para estimar la temperatura en elementos de hormigón masivo, sobre todo si los datos para la modelación provienen de ensayos de calor de hidratación semi-adiabáticos (con pérdida de calor hacia el exterior). Es por esta razón que se utilizó este método para estimar la temperatura máxima de cada hormigón. Además con este método se obtuvo una referencia de las condiciones de disipación de calor y del tiempo que los hormigones estarían curados a altas temperaturas. Las temperaturas máximas calculadas por este método se muestran en la Tabla 5.

El método usado en laboratorio para reproducir el ciclo térmico en terreno se basó en el uso de piscinas de agua dentro de hornos térmicos. Esto debido a las ventajas de contar con un curado húmedo (evitar pérdidas de humedad y agrietamiento asociado). Luego de fabricado el hormigón, la temperatura se mantuvo constante durante 7 horas e igual a la temperatura de colocación. Pasadas las 7 horas se aumentó la temperatura del hormigón hasta alcanzar aproximadamente a un día la temperatura máxima calculada a una razón entre 1,1 y 2,3 °C/h. Una vez alcanzada la temperatura máxima (entre 20 y 27 horas), se desmoldaron las probetas y se mantuvo la temperatura máxima por las siguientes 72 horas. Se utilizó este procedimiento ya que datos analizados de proyectos indican que para evitar la disipación rápida de calor y prevenir agrietamiento por gradiente térmico en grandes volúmenes de hormigón, generalmente se mantiene constante la temperatura máxima del hormigón entre los 3 y 7 días con el uso de protección en la superficie (23, 24). Finalizado este período, desde el día 4 al día 7 se aplicó un enfriamiento gradual (de entre 0,1 a 0,2 °C/h), de modo que a los 7 días se llegara a un 85% de la temperatura máxima. Desde el día 7 se procedió a bajar la temperatura gradualmente en *coolers* térmicos (entre 0,1 y 2 °C/h) hasta llegar a 40 °C, temperatura que se mantuvo hasta el día 60. Desde el día 61 las probetas fueron trasladadas a una cámara de curado a temperatura estándar (23 °C). Estas últimas temperaturas reflejan mejor las condiciones de disipación lenta que poseen los hormigones masivos estudiados en esta investigación.

Todos los hormigones estudiados se confeccionaron con materiales previamente acondicionados a las temperaturas iniciales según correspondiera por al menos 24 horas antes del mezclado.

Las temperaturas máximas medidas en las probetas de hormigón estuvieron dentro de un rango $\pm 10\%$ con respecto al máximo calculado.

4.3.2 Descripción de los Procedimientos de Ensayo

a) Ensayo a compresión de hormigón curado a 23 °C: Para determinar la curva resistencia-tiempo equivalente a temperatura estándar, se fabricaron probetas cilíndricas de 100x200 mm. Se ensayaron 2 probetas a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. Adicionalmente se dejó una probeta para el registro de temperatura.

b) Ensayo a compresión de hormigones sometidos a ciclos térmicos: Para evaluar la velocidad de ganancia de resistencia, se fabricaron probetas cilíndricas de hormigón de 100x200 mm, las que fueron sometidas a los diferentes ciclos considerados en la investigación. Se ensayaron 2 probetas a compresión a edades de 1, 3, 7, 14, 28, 60 y mayor o igual a 210 días.

En caso de existir una diferencia mayor a un 10% entre los resultados a compresión y el promedio por edad, se ensayó una tercera probeta.

7.5 Presentación y Análisis de Resultados

5.1 Evolución de la Resistencia a Compresión

En las Figura 17 a 4 se muestra la comparación del efecto del ciclo térmico en la evolución de la resistencia a compresión del hormigón, resultados segregados por tipo y dosis de cemento para una misma dosificación de pero con diferentes ciclos térmicos (con temperaturas iniciales de 10, 23 y 40°C; y curado estándar constante a 23°C).

Los resultados se han presentado en un gráfico semilogarítmico ya que investigaciones previas (17, 18) realizadas en hormigones fabricados con cementos chilenos indican que el comportamiento se ajusta muy bien al modelo de Venuat que predice una relación lineal entre la resistencia a compresión y el logaritmo en base 10 del tiempo. Esta consideración se tomó para el caso de las resistencias a muy largo plazo (más de 60 días) en base a las resistencias a mediano plazo.

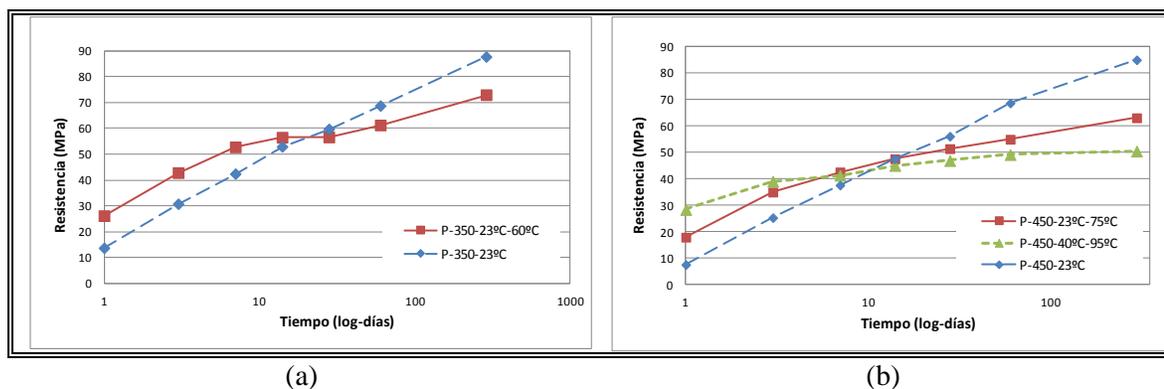


Figura 86: Evolución de resistencia de hormigones con cementos Portland y dosis 350 kg/m^3 (a) y 450 kg/m^3 (b).

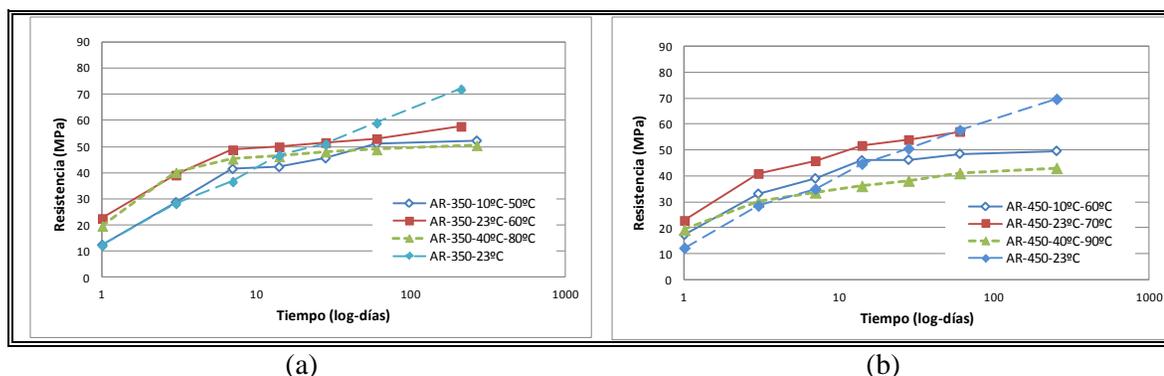


Figura 87: Evolución de resistencia de hormigones con cemento Alta Resistencia y dosis 350 kg/m³ (a) y 450 kg/m³ (b).

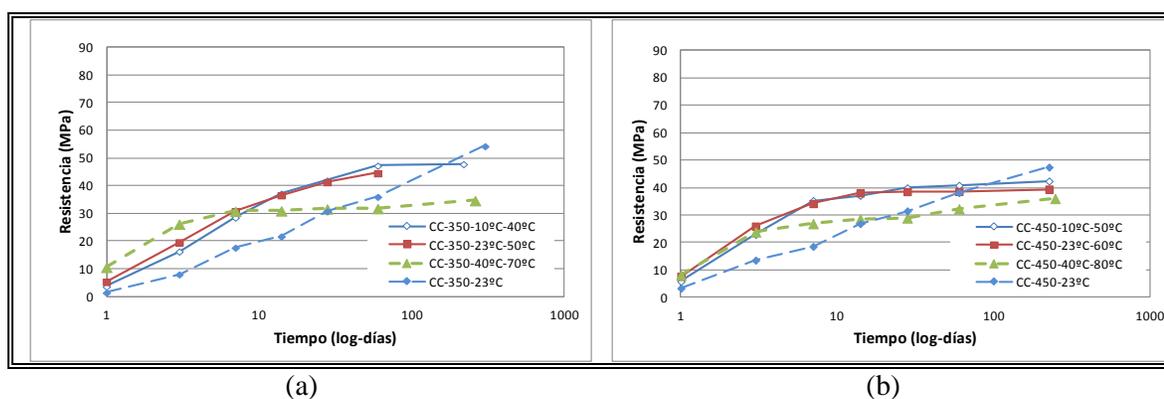


Figura 88: Evolución de resistencia de hormigones con cemento Corriente y dosis 350 kg/m³ (a) y 450 kg/m³ (b).

En los hormigones con cemento Portland (Figura 17) se observa lo reportado en la literatura sobre los efectos de cruce (9, 11), es decir aquellos hormigones que fueron curados a 23°C antes de los 28 días superan en resistencia a aquellos sometidos a altas temperaturas.

Por lo tanto se puede concluir que a altas temperaturas, la resistencia a compresión a largo plazo disminuye en comparación con la resistencia de hormigones bajo curado estándar. Este fenómeno se aprecia en todos los tipos de cemento, pero es más notorio y se produce a más temprana edad en los cementos Portland y Portland Puzolánico Alta Resistencia (con 15% de puzolana natural) que en los cementos Puzolánico Corriente. Se concluye también que por la cantidad de volumen de pasta, en aquellos hormigones con más contenido de cemento, se observa una resistencia techo (más marcada para cementos con puzolanas). Esto se explicaría por el secamiento del gran volumen de pasta, que impide el ingreso de agua adicional y la hidratación tardía del cemento (y que por lo tanto aumente la resistencia). Además en la etapa en que el hormigón ya está endurecido, las altas temperaturas pueden generar fisuración debido a la expansión del volumen de agua.

Por lo tanto se puede concluir que a altas temperaturas, la resistencia a compresión a largo plazo disminuye en comparación con la resistencia de hormigones bajo curado estándar. Este fenómeno se aprecia en todos los tipos de cemento, pero es más notorio y se produce a más

temprana edad en los cementos Portland y Portland Puzolánico Alta Resistencia (con 15% de puzolana natural) que en los cementos Puzolánico Corriente. Se concluye también que por la cantidad de volumen de pasta, en aquellos hormigones con más contenido de cemento, se observa una resistencia techo (más marcada para cementos con puzolanas). Esto se explicaría por el secamiento del gran volumen de pasta, que impide el ingreso de agua adicional y la hidratación tardía del cemento (y que por lo tanto aumente la resistencia). Además en la etapa en que el hormigón ya está endurecido, las altas temperaturas pueden generar fisuración debido a la expansión del volumen de agua.

Además se concluye que la relación de Venuat cumple bastante bien a 23°C, lo que confirma que la hidratación puede continuar en el mediano y largo plazo, tanto para cementos Portland como para cementos con puzolanas naturales.

5.2 Aumento Relativo de Resistencia a Compresión del Hormigón

Con el objeto de observar el efecto de la temperatura de curado en la magnitud de la resistencia a cualquier edad, en las Figuras 5 a 8 se presenta la razón entre la resistencia medida en el tiempo en los hormigones sometidos a un determinado ciclo térmico y la resistencia medida en laboratorio a una temperatura constante de 23°C.

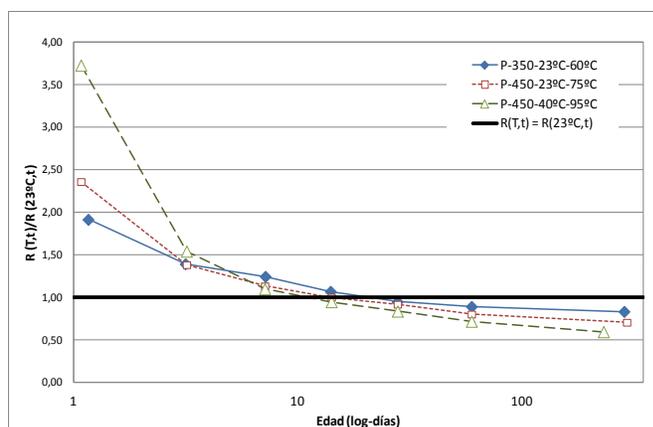


Figura 89: Evolución de la razón entre la resistencia a compresión del hormigón sometido a distintos ciclos térmicos y del hormigón curado a temperatura estándar (23°C) para cementos P.

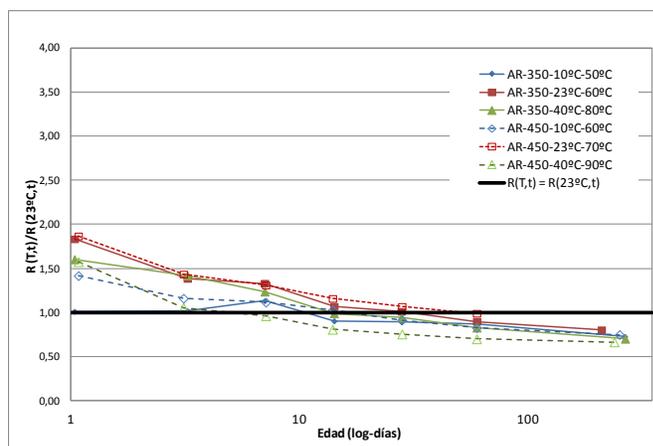


Figura 90: Evolución de la razón entre la resistencia a compresión del hormigón sometido a distintos ciclos térmicos y del hormigón curado a temperatura estándar (23°C) para cementos AR.

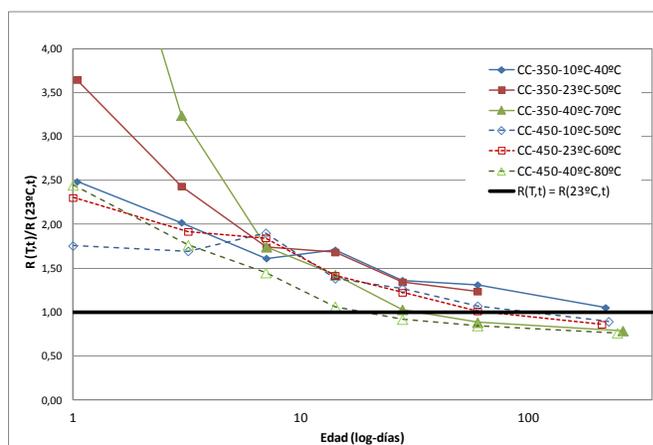


Figura 91: Evolución de la razón entre la resistencia a compresión del hormigón sometido a distintos ciclos térmicos y del hormigón curado a temperatura estándar (23°C) para cementos CC.

Para todos los hormigones se observó una disminución del cociente entre la resistencia medida en los hormigones sometidos a ciclo térmico, con respecto a la resistencia de los hormigones con curado estándar. Se observó también diferente sensibilidad a la temperatura a temprana edad para hormigones fabricados con distintos cementos. En el caso de los cementos AR presentaron menor sensibilidad a la temperatura y se puede explicar debido a la alta finura de este tipo de cemento. La mayor finura haría que aumente la resistencia a temprana edad pero los productos de hidratación se ven afectados por las altas temperaturas, generando una menor ganancia de resistencia a temprana edad en comparación con un curado estándar.

Se comprueba lo reportado en la literatura respecto a una disminución de la velocidad de ganancia de resistencia a compresión del hormigón en el largo plazo al tener un curado inicial a mayor temperatura respecto al caso de curado estándar (9). Para edades superiores a 10 días, se observa una disminución a tasa permanente del cociente de resistencia a compresión en

hormigones curados a altas temperaturas y hormigones con curado estándar. Hormigones curados a muy alta temperatura (95°C), llegaron a valores de resistencia a compresión de sólo un 75% de la resistencia de hormigones curados a 23°C. A temprana edad, a mayor temperatura (mayor madurez) se obtienen mejores resistencias, ya que se aumenta la velocidad de hidratación del cemento. Sin embargo, desde una cierta edad (aprox. 14 días), este efecto de ganancia se pierde por la peor calidad de los productos de hidratación lo que hace que la resistencia disminuya con respecto a la medida en condiciones estándar.

Para los hormigones con cemento AR (15% de puzolana) si bien la razón a temprana edad es mayor que uno, su magnitud no es tan significativamente mayor como en los casos de cementos Portland. Esto se debería a que el aumento de la resistencia a temprana edad debido a la temperatura sobre la velocidad de hidratación del cemento. Este efecto sería menor a causa del aumento de la velocidad de hidratación por la mayor finura del cemento.

Para ambos casos de temperaturas extremas (80°C y 90°C) se produce una disminución de resistencia a largo plazo con respecto a 23°C. Las resistencias medidas llegan a ser entre 65 y 80% la resistencia de un hormigón curado a 23 °C a 210 días de edad.

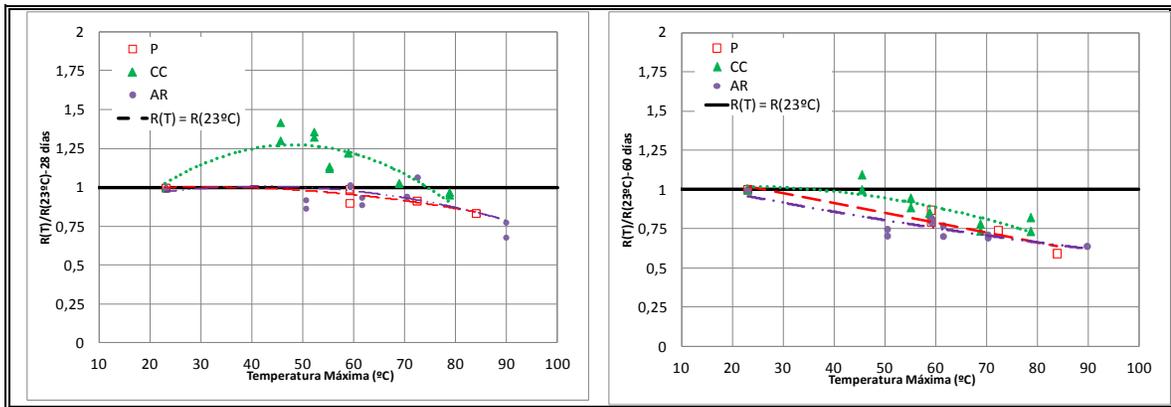
En el caso de cementos CC (con 35% de puzolana natural), se observa que sólo para los casos de temperatura inicial 40°C (y temperaturas máximas de 70 y 80°C) existe una disminución de la resistencia con respecto a 23°C desde los 60 días y sería del orden de 10%. El dato fuera de rango corresponde a un valor cercano a 7 y se explica debido a la alta sensibilidad de este tipo de cemento al ser sometido a muy altas temperaturas a temprana edad. Comparado con los otros 2 cementos la resistencia del hormigón con CC, que contiene 35% de puzolanas naturales presenta una resistencia considerablemente mayor a edades tempranas. Esto se explicaría porque la alta temperatura inicial aumenta la reacción del clínquer, que a su vez es el activador de la puzolana.

5.3 Efecto de la Temperatura Inicial y Temperatura Máxima en la Resistencia a Compresión del Hormigón

Los resultados presentados en las secciones anteriores muestran el fuerte impacto que tiene no sólo de la temperatura inicial, sino también de la temperatura máxima experimentada por los hormigones sometidos a ciclos térmicos. En la Figura 24 se muestra el efecto de la temperatura máxima del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar, a 28 y 60 días separados por tipo de cemento.

Se muestra además una línea de tendencia de los datos en función de la temperatura. Se observa que para todos los tipos de cemento existe una menor velocidad de ganancia de resistencia a muy altas temperaturas (razón menor que 1).

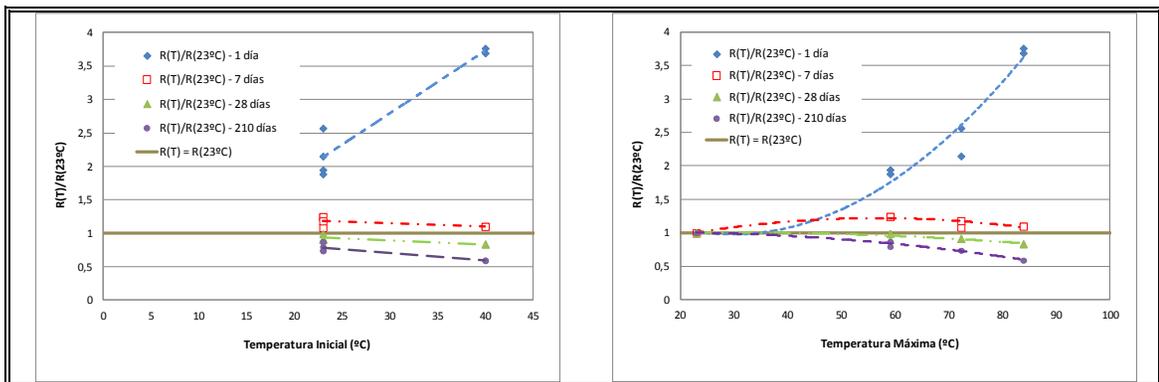
Si bien a 28 días no es tan marcado dicha disminución para cementos CC, a muy largo plazo (60 días), sí se presenta una disminución con respecto a un curado estándar.



(a) (b)

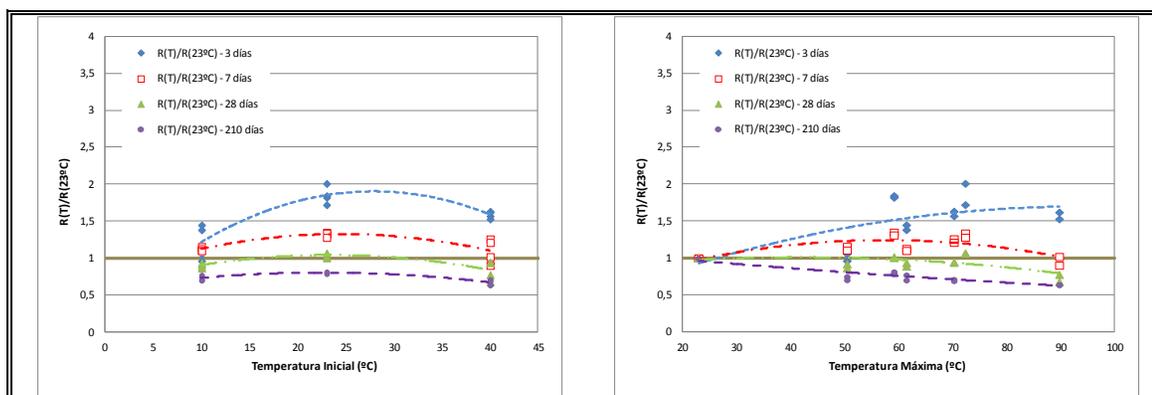
Figura 92: Efecto de la temperatura máxima del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a 28 y 60 días separados por tipo de cemento.

En las Figuras 9 a 11 se compara la misma razón descrita anteriormente a temprana edad (1 o 3 días), 28 días y 210 días según tipo de cemento y en función de la temperatura inicial y temperatura máxima.



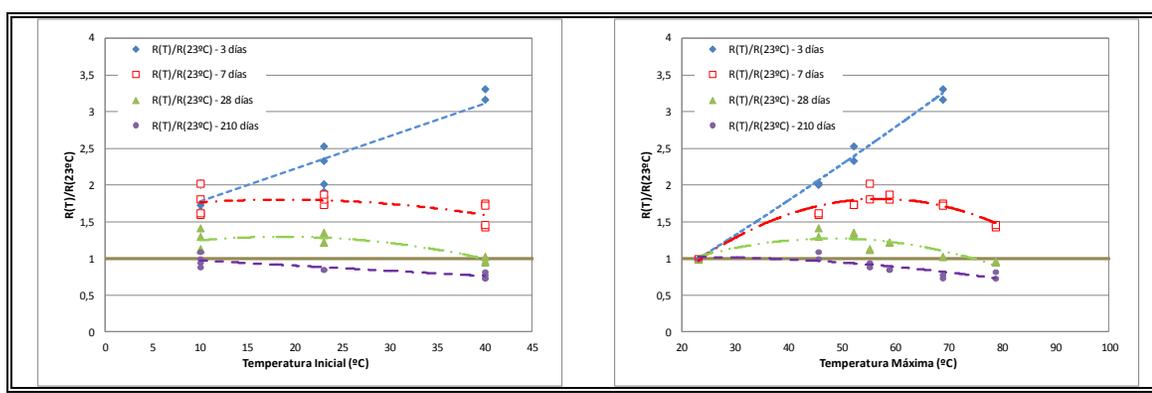
(a) (b)

Figura 93: Efecto de la temperatura inicial (a) y temperatura máxima (b) del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a diferentes edades para hormigones con cemento Portland.



(a) (b)

Figura 94: Efecto de la temperatura inicial (a) y temperatura máxima (b) del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a diferentes edades para hormigones con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia.



(a) (b)

Figura 95: Efecto de la temperatura inicial (a) y temperatura máxima (b) del hormigón en la razón de resistencia a compresión del hormigón sometido a ciclo térmico y la resistencia bajo curado estándar a diferentes edades para hormigones con cemento Puzolánico Corriente.

Para los hormigones fabricados con cemento Portland (0% de puzolana natural) a temperaturas cercanas a los 60°C ya se observa una disminución importante de resistencia con respecto a un curado estándar a 28 días.

Se observa que para hormigones fabricados con cemento Portland Puzolánico Alta Resistencia (15% de puzolana natural) la temperatura óptima de curado inicial es de 23°C para todas las edades, ya que tanto a temperaturas iniciales de 10°C como de 40°C se presenta una disminución de resistencia en comparación a la alcanzada a curado estándar. El efecto de la temperatura máxima en resistencia a 28 días se ve fuertemente marcada, llegando a valores cercanos a sólo un 50% de la resistencia a un curado isotérmico estándar. A temperatura máxima de 70°C ya se observa un deterioro en la resistencia a 28 días.

Para el caso de hormigones fabricados con cementos CC no se observa una disminución de ganancia de resistencia hasta 28 días. A temperaturas máximas desde 75°C se aprecia una disminución de resistencia a partir de dicha edad.

7.6 Conclusiones y Recomendaciones

Las altas temperaturas que alcanzan en la actualidad los hormigones estructurales masivos, han despertado la inquietud respecto a su efecto en la magnitud de la resistencia a compresión a largo plazo. En esta investigación se buscó aportar luz a este fenómeno evaluándose el comportamiento de hormigones fabricados con distintos tipos y dosis de cemento y sometidos a ciclos térmicos que pretenden simular condiciones de terreno.

Las principales conclusiones que se desprenden del estudio son:

- En general a largo plazo (desde 60 días), para todos los hormigones fabricados con distintos tipos de cemento, se observó una disminución de resistencia en comparación con un curado estándar.
- Para hormigones fabricados con cemento Portland y Portland Puzolánico Alta Resistencia se observa que la resistencia obtenida con curado estándar es mayor a la resistencia de los hormigones bajo ciclo térmico hasta los 14 días. En el caso de hormigones fabricados con cemento Puzolánico Corriente la resistencia de los hormigones bajo ciclo térmico fue mayor a la de curado estándar hasta 60 días.
- Los hormigones fabricados con cementos Portland Puzolánico Alta resistencia presentaron menor sensibilidad a la temperatura a temprana edad. Este fenómeno se explicaría debido a la alta finura de estos cementos y a la rápida hidratación y mala calidad de productos de hidratación a temprana edad debió a la combinación con altas temperaturas.
- Para aquellos hormigones fabricados con cemento Portland y Portland Puzolánico Alta Resistencia y sometidos a ciclos térmicos, la resistencia es menor que la resistencia a un curado estándar a partir de los 14 días (en promedio).
- Para aquellos hormigones fabricados con 35% de puzolana natural el efecto de la disminución de ganancia de resistencia a compresión a 28 días se ve influenciado a partir de temperaturas cercanas a los 75°C. En el caso de usar 15% de puzolanas naturales la disminución se refleja desde los 70°C y para los hormigones con 0% de puzolanas naturales a partir de los 55 °C.
- Se presentan curvas de tendencia para diferentes edades y tipos de cemento de manera de aproximar la razón entre resistencia experimentada en terreno por un hormigón masivo y la resistencia a curado estándar que se usa en las especificaciones de diseño estructural. Esta razón podría ser un buen indicador de disminución de ganancia si se conoce la temperatura máxima experimentada en terreno por la estructura de hormigón.
- Se recomienda no sólo controlar la temperatura máxima del hormigón para evitar agrietamiento por gradiente térmico, sino que también para evaluar una posible disminución de resistencia en comparación a un curado estándar.

7.7 Bibliografía

- (1) ACI207. 1R-05: *Guide to Mass Concrete*. American Concrete Institute. (2005).
- (2) Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. McGraw-Hill.
- (3) ACI207. 2R-07: *Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete*. American Concrete Institute. (2007).

- (4) Gajda, J., & VanGeem, M. Controlling Temperatures in Mass Concrete. *Concrete International*, (2002), pp. 59-62.
- (5) Gajda, J., & Alsamsam, E. Engineering Mass Concrete Structures. Professional Development Series - Portland Cement Association, (2006).
- (6) Neville, A. M. *Properties of Concrete*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., (1996).
- (7) Kehl, R., & Carrasquillo, R.. *Investigation of the use of Match Cure Technology in the Precast Concrete Industry*. Center for Transportation Research, The University of Texas. Austin: Bureau of Engineering Research, (1998).
- (8) Verbeck, G., & Helmuth, R. Structure and Physical Properties of Cement Pastes. *Proc., 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Tokyo , III*, pp. 1-32, (1968).
- (9) Carino, N. J. CRC handbook on nondestructive testing of concrete. In M. V.M., & N. Carino, *CRC handbook on nondestructive testing of concrete*, pp. 101-146. CRC, (1991).
- (10) Kim, J. K., Moon, Y. H., & Eo, S. H. Compressive Strength Development of Concrete with different Curing Time and Temperature. *Cement and Concrete Research* , 28 (12), pp. 1761-1773, (1998).
- (11) Brooks, A. G., Schindler, A. K., & Barnes, R. W. Maturity Method Evaluated for Various Cementitious Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering* , 19 (12), pp. 1017-1025. (2007).
- (12) ACI308. *R-01: Guide to Curing Concrete*. American Concrete Institute, (2001).
- (13) Carrasquillo, R. Tecnología del Hormigón Aplicada al Caso de Hormigones Masivos. *Seminario Internacional de Hormigones Estructurales Masivos*. Santiago, (2009).
- (14) Cannon, R. P. Temperature-Matched Curing: Its Development, Application and Future Role in Concrete Practice and Research. *Concrete (London)* , (1986).
- (15) Videla, C., Covarrubias, J. P., & Pascual, J. M. Comportamiento de Hormigones Fabricados con Distintas Clases de Cemento ante Climas Extremos. *Revista Ingeniería y Construcción* , 14 (1995), pp. 32-46.
- (16) Ramlochan, T., Zacarias, P., Thomas, M. D., & Hooton, R. D. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part I: Expansive behaviour. *Cement and Concrete Research* , 33 (2003), pp. 807-814.
- (17) Bustos, F. Ms. Cs. Thesis: *Understanding Performance of Concrete Using Natural Pozzolans Against Corrosion*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, (2011).
- (18) Masana, C. *Tesis de Magister: Desarrollo de un procedimiento para la predicción de la retracción hidráulica en hormigones fabricados con cementos chilenos*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile. (2001).
- (19) Dodson, C. J., & Rajagopalan, K. S. Field tests verify temperature effects on concrete strength. *Concrete International* , 1 (12) (1979), pp. 26-30.
- (20) Kanda, T., Sakuramoto, F., & Suzuki, K.. Compressive strength of silica fume concrete at higher temperatures. (A. S.-1. V. M. Malhotra, Ed.) *Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete* , 132, (1992), pp. 1089-1104.
- (21) Riding, K., Poole, J., Schindler, A., Juenger, C., & Folliard, K. Evaluation of Temperature Prediction Methods for Mass Concrete Members. *ACI Materials Journal* , 103 (5) 2006), pp. 357-365.
- (22) Rawhouser, C. Cracking and Temperature Control of Mass Concrete. *ACI Journal* , 41 (4) (1945), pp. 305-348.
- (23) Fernández, C. Hormigones Masivos: Temas Relevantes para el Constructor. *Seminario Internacional de Hormigones Masivos Estructurales*. Santiago: ICH. (2009).

- (24) Vega, H., & Guarda, O. Experiencia de un Hormigón Masivo Estructural. *Seminario Internacional de Hormigones Masivos Estructurales*. Santiago: ICH. (2009).
- (25) AFNOR. (1998). *Standard NFP15-436-98*. Paris.