

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CALIBRACIÓN Y ESTUDIO DEL MÉTODO DE MADUREZ PARA LA  
OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA DE DOS TIPOS DE CONCRETO DE ALTO  
DESEMPEÑO, MEDIANTE EL USO DE DISPOSITIVOS INALÁMBRICOS**

**Trabajo de Graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Andrés Carranza Neurohr B41453**

*Director del Proyecto de Graduación:*

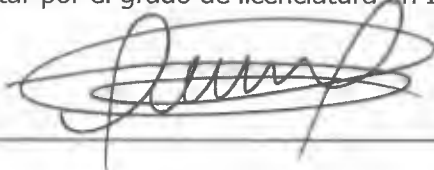
**Ing. Carlos Fernández Chávez, M.Sc**

*Ciudad Universitaria Rodrigo Facio*

*Costa Rica*

*Octubre, 2018*

"Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por los miembros del Tribunal de graduación de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil"



---

Ing. Carlos Fernández Chaves, M.Sc.

**Director del TFG**



---

Andrés Carranza Neurohr

**Candidato**



---

Ing. Andrés Reyes Bonilla, M.Sc.

**Asesor del TFG**



---

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.

**Asesor del TFG**



---

Ing. Laura Ruiz Vega, M.Sc.

**Asesor del TFG**

## **Derechos de propiedad intelectual**

Fecha: 2018, octubre, 30.

El suscrito, Andrés Carranza Neurohr, cédula 1-1607-0803, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B41453, manifiesta que es autor (a) del Proyecto Final de Graduación "*Calibración y estudio del método de madurez para la obtención de la resistencia de dos tipos de concreto de alto desempeño, mediante el uso de dispositivos inalámbricos*", bajo la Dirección del MSc, Ing. Carlos Fernández Chaves, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

*Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.*

## **Dedicatoria**

A mis padres por haberme formado como la persona que soy, por ser los promotores de mis sueños y futuro, por todo el sacrificio y esfuerzo que han realizado para darme la oportunidad de recibir una excelente educación, y por enseñarme a valorar el privilegio de esta oportunidad que me han brindado. Muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los cuales se incluye este. En especial a mi mamá por estar dispuesta a acompañarme cada segundo en mi carrera y por inculcarme la constancia y darme motivación a alcanzar esta meta rápido y de la mejor manera. A mi papá por cada consejo no solo en temas de educación sino en mi vida.

## **Agradecimientos**

A la familia por la constancia y el apoyo a lo largo de estos años, que fue indispensable.

A Erich Neurohr, quien, me transmitió su entusiasmo hacia la Ingeniería Civil y continuó siendo mi mentor a lo largo de la carrera.

A Carlos Fernández y Andrés Reyes por el conocimiento y trabajo aportado para guiarme en todo el proceso del proyecto de Graduación.

A Andrés, Mainor, William y Natalia, de PC, por ayudarme y formar parte del proyecto de graduación siempre con buena disposición, ganas de ayudar y enseñar. Sus participación y aportes fueron muy valiosos.

A mis amigos de carrera con los que compartí todos estos años de estudio, a quienes les deseo muchos éxitos en sus futuras carreras profesionales y en sus vidas.

A la UCR y la Escuela de Ingeniería Civil, por la educación y la oportunidad parte ser parte de esta institución por estos 5 años de carrera.

A Productos de Concreto por disponer de materiales, tiempo, equipo y mano de obra para la ejecución proyecto de graduación.

## Tabla de Contenidos

<b>Derechos de propiedad intelectual</b> .....	ii
<b>Dedicatoria</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iii
<b>Tabla de Contenidos</b> .....	iv
<b>Tabla de Figuras</b> .....	ix
<b>Tabla de Cuadros</b> .....	xiii
<b>Índice de Abreviaturas</b> .....	xv
<b>Resumen</b> .....	xvii
<b>CAPITULO 1 INTODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Justificación.....	2
1.1.1 Problema Especifico.....	2
1.1.2 Importancia .....	3
1.2 Antecedentes Teóricos y Prácticos del Problema .....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General .....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Delimitación del Problema.....	5
1.4.1 Alcance.....	5
1.4.2 Limitaciones.....	6
<b>CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO</b> .....	7
2.1 Madurez.....	8
2.2 Legislación y reglamentación.....	11
2.2.1 Nacional .....	11
2.2.2 Legislación internacional .....	11

2.3	Incertidumbre.....	13
<b>CAPITULO 3 MARCO METODOLÓGICO.....</b>		<b>15</b>
3.1	Diagrama relación entre actividades .....	16
3.2	Fase teórica.....	17
3.2.1	Consulta a normas y reglamentos costarricense .....	17
3.2.2	Consulta a normas y reglamentos internacionales.....	17
3.2.3	Consulta doctrinal (informes, ensayos técnicos y literatura).....	17
3.2.4	Búsqueda de dispositivos inalámbricos .....	17
3.3	Fase Experimental.....	18
3.3.1	Obtención Curvas de Madurez .....	18
3.3.2	Calibración del Método de Madurez en planta con Respecto a Núcleos .....	19
3.4	Fase de Análisis .....	20
3.4.1	Análisis Numérico .....	20
3.4.2	Estudio de Prefactibilidad del Método en los Procesos en Planta de Prefabricado Pesado de Productos de Concreto S.A. ....	20
3.5	Fase de Resultados y Recomendaciones.....	20
3.5.1	Resultados de la Comparación entre los Distintos Métodos de Obtención de Resistencia.....	20
3.5.2	Protocolo Recomendado para el uso del Método de Madurez.....	21
3.5.3	Resultados del Estudio de Prefactibilidad .....	21
<b>CAPITULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>		<b>22</b>
4.1	Obtención de la resistencia de los cilindros y núcleos .....	23
4.1.1	SCC700 .....	23
4.1.2	CAD700 .....	24
4.1.3	Datos estadísticos de la planta.....	25

4.2	Resultados de temperatura .....	26
4.3	Resultados de Madurez.....	29
4.4	Calibración del método de madurez .....	31
4.5	Comparación entre distintos métodos de obtención de resistencia.....	37
4.5.1	Comparación con respecto a los cilindros.....	37
4.5.2	Comparación con respecto a los núcleos.....	42
4.5.3	Comparación entre modelos .....	48
4.5.4	Comparación general .....	49
4.6	Estudio de per-factibilidad del método en un entorno de producción de elementos prefabricados. ....	50
4.6.1	Aspecto técnico .....	50
4.6.2	Costo anual del método de cilindros .....	50
4.6.3	Costo anual del método de madurez .....	52
4.6.4	Comparación entre costos .....	54
CAPITULO 5 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....		55
5.1	Análisis de recolección de datos .....	56
5.1.1	Calibración.....	56
5.1.2	Viga de concreto .....	58
5.2	Análisis de resultados de calibración .....	60
5.2.1	Modelo .....	60
5.2.2	Limitaciones del modelo .....	60
5.3	Comparación entre los distintos métodos de obtención de la resistencia .....	61
5.3.1	Comparación con respecto a los cilindros.....	61
5.3.2	Comparación con respecto a los núcleos.....	62
5.3.3	Comparación con entre curado en laboratorio y curado en patio.....	63

5.4	Guía para el uso del método de madurez para predecir resistencia del concreto a tiempo real.....	64
5.5	Estudio de prefactibilidad del método para un elemento prefabricado por Productos de Concreto S.A.....	66
CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		68
6.1	Conclusiones .....	69
6.2	Recomendaciones .....	70
CAPITULO 7 BIBLIOGRAFÍA.....		72
7.1	Bibliografía .....	73
CAPITULO 8 ANEXOS .....		1
A.	Búsqueda de dispositivos inalámbricos en el mercado .....	A-1
A.1	SmartRock2.....	A-1
A.2	Concremote.....	A-3
A.3	Intellirock II .....	A-4
A.4	Command Center y IDrop.....	A-5
A.5	SmartPrecast.....	A-7
A.6	Resumen de dispositivos .....	A-8
B.	Incertidumbres y datos descartados .....	B-9
B.1	Equipos utilizados .....	B-9
B.2	Incertidumbre.....	B-13
B.3	Error.....	B-15
B.4	Datos descartados .....	B-15
C.	Guía para el uso del método de madurez para predecir resistencia del concreto a tiempo real.....	C-18
C.1	Metodología para la calibración .....	C-18
C.2	Obtención de la resistencia de elementos.....	C-19



C.3 Recalibración y validación .....	C-20
C.4 Procedimiento recomendado para la validación.....	C-21
C.5 Características del proyecto para el uso de madurez .....	C-21
D. Montaje .....	D-23
E. Datos Ensayo de resistencia.....	E-30
F. Cotización de SmartPrecast.....	F-36

## Tabla de Figuras

Figura 3.1 Diagrama de relación entre actividades .....	16
Figura 4.1 Grafica de resultados de ensayo de compresión del concreto para SCC700. ....	23
Figura 4.2 Grafica de resultados de ensayo de compresión del concreto para CAD700.....	24
Figura 4.3 Grafica de resultados de ensayo de compresión del concreto SSC700 de planta de PC. ....	25
Figura 4.4 Grafica de resultados de ensayo de compresión del concreto CAD700 de planta de PC. ....	26
Figura 4.5 Grafica de resultados de temperatura con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla SCC 700. ....	27
Figura 4.6 Grafica de resultados de temperatura con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla CAD 700.....	27
Figura 4.7 Grafica de resultados de temperatura inicial con respecto al tiempo los distintos muestreos de la mezcla SCC 700. ....	28
Figura 4.8 Grafica de resultados de temperatura inicial con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla CAD 700.....	28
Figura 4.9 Grafica de resultados de madurez con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla SCC 700. ....	29
Figura 4.10 Grafica de resultados de madurez con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla CAD 700.....	30
Figura 4.11 Grafica de resultados de madurez inicial con respecto al tiempo los distintos muestreos de la mezcla SCC 700. ....	30
Figura 4.12 Grafica de resultados de madurez inicial con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla CAD 700.....	31
Figura 4.13 Grafica de resultados de temperatura y madurez con respecto al tiempo para cilindros curados en laboratorio de la mezcla SCC 700.....	32
Figura 4.14 Grafica de tendencia lineal de la resistencia de los cilindros con respecto al logaritmo de la madurez para cilindros curados en laboratorio de la mezcla SCC 700. ....	33

Figura 4.15 Grafica de resultados de temperatura y madurez con respecto al tiempo para cilindros curados en laboratorio de la mezcla CAD 700. ....	34
Figura 4.16 Grafica de tendencia lineal de la resistencia de los cilindros con respecto al logaritmo de la madurez para cilindros curados en laboratorio de la mezcla CAD 700. ....	34
Figura 4.17 Grafica de resultados de temperatura y madurez con respecto al tiempo para cilindros curados en patio de la mezcla SCC 700. ....	35
Figura 4.18 Grafica de tendencia lineal de la resistencia de los cilindros con respecto al logaritmo de la madurez para cilindros curados en patio de la mezcla SCC 700. ....	35
Figura 4.19 Grafica de resultados de temperatura y madurez con respecto al tiempo para cilindros curados en patio de la mezcla CAD 700. ....	36
Figura 4.20 Grafica de tendencia lineal de la resistencia de los cilindros con respecto al logaritmo de la madurez para cilindros curados en patio de la mezcla CAD 700. ....	36
Figura 4.21 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Laboratorio. ....	38
Figura 4.22 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Laboratorio. ....	39
Figura 4.23 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Patio. ....	40
Figura 4.24 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Patio. ....	41
Figura 4.25 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Laboratorio. ....	43

Figura 4.26 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Laboratorio.....	44
Figura 4.27 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Patio. ....	45
Figura 4.28 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Patio. ....	46
Figura 4.29 Grafica de comparación entre ambos modelos de predicción y resultados de ensayos de núcleos para SCC 700.....	47
Figura 4.30 Grafica de comparación entre ambos modelos de predicción y resultados de ensayos de núcleos para CAD 700. ....	47
Figura 8.1. Guía de uso de SmartRock2.....	A-2
Figura 8.2. Imagen de sensor Concremate .....	A-3
Figura 8.3. Sistema de Intellirock Wierless.....	A-4
Figura 8.4. Trimble Nomad, sensor y repetidor del sistema Idrop. ....	A-6
Figura 8.5. Guía de uso de SmartRock2.....	A-7
Figura 8.6. Foto de máquina de ensayos. ....	A-9
Figura 8.7. Extracto de certificado de calibración de máquina de ensayos. ....	A-10
Figura 8.8. Extracto de ficha técnica de SmartRock2. ....	A-11
Figura 8.9. Extracto de ficha técnica de SmartRock2. ....	A-11
Figura 8.10. Foto de Vernier, INSIZE Metric Digital Caliper.....	A-12
Figura 8.11 Ejemplo de cálculo de incertidumbre para Resistencia de los cilindros curados en patio de SCC700. ....	B-14
Figura 8.12 Foto de falla defectuosa a 14 días AC-CL011. ....	B-16
Figura 8.13 Foto de falla defectuosa a 14 días AC-CL013. ....	B-17

Figura 8.14. Diagrama de interacción entre actividades de guía para el uso del método de madurez.....	C-22
Figura 8.15. Colocación de dispositivo de madurez en cilindro 150mm antes de chorea... ..	C-23
Figura 8.16. Dispositivo de madurez colocado después de chorea.....	D-23
Figura 8.17. Colocación de dispositivo de madurez en viga antes de chorea. ....	D-24
Figura 8.18. Colocación del sensor de temperatura en viga antes de chorea.....	D-24
Figura 8.19. Viga choreada con sensor con concreto líquido.....	D-25
Figura 8.20. Viga choreada con sensor con concreto endurecido. ....	D-25
Figura 8.21. Viga curada en patio. ....	D-26
Figura 8.22. Cilindros curados junto a viga en patio. ....	D-26
Figura 8.23. Cilindros curados en laboratorio sumergidos en agua.....	D-27
Figura 8.24. Falla de cilindros de concreto.....	D-28
Figura 8.25. Falla de cilindros.....	D-28
Figura 8.26. Ejemplo de resultado de maquina ensayos.....	D-28
Figura 8.27. Extracción de núcleo. ....	D-29
Figura 8.28. Falla de núcleo. ....	D-29
Figura 8.29. Medición de peso para densidad. ....	D-29
Figura 8.30. Tipo de falla de núcleo. ....	D-29

## Tabla de Cuadros

Cuadro 4.1 Resultados de ensayos de compresión de concreto. ....	23
Cuadro 4.2 Resultados de ensayos de compresión de concreto. ....	24
Cuadro 4.3 El análisis de los tres meses de producción.....	25
Cuadro 4.4 Comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Laboratorio. 38	
Cuadro 4.5 Comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Laboratorio. 39	
Cuadro 4.6 Comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Patio.....	40
Cuadro 4.7 Comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Patio. ....	41
Cuadro 4.8 Comparación de resultados de ensayos de núcleos con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Laboratorio.....	42
Cuadro 4.9 Comparación de resultados de ensayos de núcleos con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Laboratorio. ....	43
Cuadro 4.10 Comparación de resultados de ensayos de núcleos con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Patio. ....	44
Cuadro 4.11 Comparación de resultados de ensayos de núcleos con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Patio. ....	45
Cuadro 4.12 Comparación entre las predicciones del modelo calibrado con cilindros curados en patio y cilindros curados en laboratorio, para SCC700.....	48
Cuadro 4.13 Comparación entre las predicciones del modelo calibrado con cilindros curados en patio y cilindros curados en laboratorio, para CAD700. ....	48
Cuadro 4.14 Matriz comparativa de la diferencia entre los distintos métodos utilizados para obtener la resistencia a la compresión del concreto para SCC 700. ....	49
Cuadro 4.15 Matriz comparativa de la diferencia entre los distintos métodos utilizados para obtener la resistencia a la compresión del concreto para SCC 700. ....	49

Cuadro 4.16 Costo diario con el método de madurez para el primer caso. ....	53
Cuadro 4.17 Costo diario con el método de madurez para el primer caso. ....	53
Cuadro 4.18 Costo de calibración para método de madurez. ....	54
Cuadro 4.19 Costo de verificación para método de madurez. ....	54
Cuadro 4.20 Diferencia entre los costos esperados de utilizar ambos métodos. ....	54
Cuadro 8.1 Comparación de precios y costo de utilizar los distintos dispositivos, para la medición de madurez, que ofrece el mercado. ....	A-8
Cuadro 8.2 Cuadro de incertidumbres asociadas a las mediciones ....	A-12
Cuadro 8.3 Ejemplo de cálculo de propagación de incertidumbre. ....	A-13

## Índice de Abreviaturas

$A$	Insumos con incertidumbres asociadas
$A_c$	Área transversal del cilindro
$a$	Constantes obtenidas al calibrar el modelo lineal de madurez
$B$	Insumos con incertidumbres asociadas
$b$	Constantes obtenidas al calibrar el modelo lineal de madurez
$C$	Insumos con incertidumbres asociadas
$d_1$	Diámetro del cilindro de concreto
$d_2$	Diámetro Perpendicular al $d_1$
$d$	Diámetro promedio del cilindro
$f_c$	Resistencia a compresión del concreto a 28 días, kg/cm <sup>2</sup> .
$M$	Madurez
$Q$	Energía de activación dividida por a constante de gas R en K <sup>o</sup>
$S$	Resistencia del concreto
$t_e$	Edad equivalente del intervalo
$T_a$	Promedio de temperatura interna del concreto dentro del intervalo
$T_o$	Temperatura base donde no ocurrirá reacción
$T_s$	Temperatura especifica en K <sup>o</sup>
$Z$	Resultado de cálculo sin aplicar incertidumbres
$\Delta t$	Intervalo de tiempo
$\delta$	Incertidumbre
$\delta_A$	Incertidumbres de insumo A



$\delta_B$	Incertidumbres de insumo B
$\delta_C$	Incertidumbres de insumo C
$\delta_Z$	Incertidumbre del resultado
$\sigma$	Resistencia del núcleo a los 28 días en kg/cm <sup>2</sup>
ACI	American Concrete Institut
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD700	Concreto de Alto Desempeño proporcionado por PC con $f_c$ de 700 kg/cm <sup>2</sup>
CSCR	Código Sísmico de Costa Rica
INTECO	Instituto de normas técnicas de Costa Rica
Lanamme	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
PC	Productos de Concreto S.A.
SCC700	Concreto Auto-Compactante proporcionado por PC con $f_c$ de 700 kg/cm <sup>2</sup>
UCR	Universidad de Costa Rica

Carranza Neurohr, Andrés

*Calibración y estudio del método de madurez para la obtención de la resistencia de dos tipos de concreto de alto desempeño, mediante el uso de dispositivos inalámbricos*

Proyecto Final de Graduación – Ingeniería Civil – San Jose, Costa Rica

## **Resumen**

Esta investigación consiste en calibrar y estudiar el método de madurez para la obtención de la resistencia del concreto mediante el uso de dispositivos inalámbricos en concretos de alto desempeño, en la planta de producción de Productos de Concreto S.A, identificando así un método diferente al de "falla de cilindros". En muchos proyectos, tales como en post-tensado, pre-tensado, pre-fabricado, proyectos con alta exigencia de plazo, entre otros, es importante conocer la resistencia del concreto a lo largo de su etapa de endurecimiento y no solo limitarse a conocer la resistencia en momentos específicos en la falla de cilindros.

Por esta razón, el tema propuesto de investigación valora si el método de madurez es una alternativa tecnológica eficaz que permita la medición de la resistencia del concreto a cualquier edad, y contempla no solo el aspecto técnico, pero también su viabilidad económica y la regulación nacional e internacional que rodea al método de madurez.

Para esto se colaboró con la compañía Productos de Concreto S.A., en donde se utilizó dos mezclas de su proceso normal de producción y los dispositivos SmartRock2 para hacer una calibración del método de madurez y verificar resultados de predicción de resistencia del concreto en una viga choreada con las mismas mezclas y se comparó con respecto a ensayos de cilindros de concreto y pruebas de núcleos extraídos de las vigas. Contemplando estos resultados, la normativa vigente y recomendaciones de otras investigaciones y de fabricantes de los dispositivos, se analizó la prefactibilidad económica de incluir el método de madurez en el proceso de predicción de la resistencia del concreto de las vigas fabricadas en la planta de prefabricado de la empresa PC. A.C.N.

Conceptos clave: madurez, métodos no destructivos de predicción de resistencia de concreto, alternativa a ensayos de cilindros de concreto, calibración de madurez, viabilidad del método de madurez en entorno costarricense

# **CAPITULO 1 INTODUCCIÓN**

## **1.1 Justificación**

### **1.1.1 Problema Especifico**

La resistencia a la compresión del concreto, se puede considerar la característica de mayor importancia en un elemento de concreto. Por la naturaleza del concreto hidráulico, este inicia como una matriz líquida con una resistencia prácticamente nula, la cual, gradualmente aumenta mientras se endurece y llega a la resistencia necesaria. Para complicar más el sistema de determinación de la resistencia, existen varios factores que incluyen en ellos, no solo la dosificación de la mezcla, sino que también el entorno en el cual este se cura, entre otros. Esto implica, a diferencia de otros materiales de construcción como el acero, que en el momento de su colocación no se sabe con certeza cuál va a ser su resistencia final. También es importante aclarar que no solo es necesario saber la resistencia final del concreto, sino que también es de suma importancia conocer la resistencia del concreto a lo largo de su etapa de endurecimiento.

El método más utilizado para la comprobación de la resistencia a la compresión del concreto es el método denominado "fallo de cilindros" normado por La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials, ASTM), normas C31/C31M, C39/C39M y C192/C192M. No obstante, muchos ingenieros, tal como el Ingeniero de la planta de prefabricado de la empresa Productos de Concreto S.A. (en adelante "PC"), Andrés Reyes, consideran que dicho método, tiene deficiencias en muchos aspectos, pues es un proceso tedioso y lento que entorpece la optimización del proceso constructivo. Además, el Ingeniero Reyes opina que las pruebas destructivas desperdician grandes cantidades de material, lo cual, especialmente en lugares de alta producción, como en la planta de PC el desperdicio de material tiene un impacto ambiental negativo. (Reyes, 2018)

Otro aspecto que puede ser negativo del método actualmente utilizado es que, al aislar la muestra de su entorno real, esta tendrá procesos de curado distintos, por lo que es probable que el cilindro presente desviaciones de la resistencia a la compresión a su contraparte en sitio. Los cilindros también presentan la limitación que el ensayo de cilindros es destructivo, por lo que se requiere de un cilindro de concreto por cada vez que se quiera obtener una muestra para predecir la resistencia a la compresión del concreto.

Estas limitantes del método de cilindros de concreto han llevado a la comunidad ingenieril a tener que desarrollar métodos de obtención de resistencia por medio de otros que sean más acertados y versátiles.

### **1.1.2 Importancia**

Como se comentó previamente, es evidente que existen limitaciones en el método de "falla de cilindros" de concreto utilizado actualmente, por lo que los profesionales responsables están demandando la investigación de otros métodos para la obtención de la resistencia a la compresión del concreto, con el fin de establecer un método confiable y práctico, amigable con el ambiente y que asegure el cumplimiento de los requerimientos y el cumplimiento de los estándares para pruebas nacionales e internacionales.

Por esta razón, el tema propuesto de investigación proveerá una alternativa tecnológica que permita un mejor método de medición de la resistencia del concreto a cualquier edad y colaborará a incrementar futuras investigaciones de otros métodos alternativos de obtención de la resistencia a la compresión del concreto en beneficio del gremio ingenieril y de los clientes finales.

Como se indicó, en la actualidad en Costa Rica para medir la resistencia a la compresión del concreto, se utiliza el sistema de "falla de cilindros" de concreto y no se ha promovido eficientemente propuestas concretas que hagan que los diferentes profesionales y empresarios busquen modificar dicho sistema. Por lo que, este trabajo de graduación buscará identificar la existencia de elementos que determinarán los incentivos técnicos, económicos, ecológicos o prácticos que justifiquen la necesidad de ampliar en Costa Rica la investigación del método propuesto e identificar nuevas alternativas y su puesta en práctica.

## **1.2 Antecedentes Teóricos y Prácticos del Problema**

Luego de que en varios lugares del mundo, como en los Estados Unidos de América ocurrieran varios colapsos al quitar los soportes temporales antes que el concreto tuviera la resistencia requerida, la comunidad ingenieril ha buscado nuevos métodos más eficientes para predecir la resistencia a la compresión del concreto. (Schellhammer, 2013) Esto llevó a que se desarrollaran varios métodos alternativos para la obtención de la resistencia del concreto, de los cuales el método de madurez es uno de ellos. (Otros métodos desarrollados son Rebound Hammer ASTM C805, Windsor Probe ASTM C803 y Pullout Test ASTM C900).

La investigación del método de madurez inició a mitad del siglo pasado liderado por J.M. Plowman el cual buscó obtener la relación entre la temperatura y la ganancia de resistencia, quien usando especímenes de concreto cúbicos y variando su temperatura de curado encontró una relación de entre la ganancia de resistencia y su temperatura de curado. (Tarun R. 1992)

En el ámbito costarricense se realizó un proyecto de graduación de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (UCR), preparado por el estudiante Erick Roberto Rodríguez cuyo objetivo general fue el "Correlacionar las curvas de resistencia a la compresión y madurez del concreto utilizado en el mercado internacional". Esta tesis confirmó que, con los materiales y procesos costarricenses, se encuentra la misma relación entre la temperatura de curado y la obtención de resistencia que predice la teoría de madurez. (Rodríguez, 2004)

El método de madurez ya ha sido normado por la norma ASTM 1074 (Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method). En este documento se cuenta con los procedimientos a seguir según la normativa de ASTM. También, brinda unos ejemplos de resultados obtenidos, como se calibró el modelo y los resultados que se obtuvieron.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Calibrar y estudiar el método de madurez para la obtención de la resistencia del concreto mediante el uso de dispositivos inalámbricos en un "Concreto de Alto Desempeño" (CAD700) y un "Concreto Auto-Compactante" (SCC700), en una planta de producción de elementos prefabricados, identificando así un método diferente al de "falla de cilindros".

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar una revisión bibliográfica que soporte la relación entre la madurez del concreto y su resistencia.
- Realizar investigación de mercado para determinar las alternativas disponibles de dispositivos inalámbricos para medición de madurez.
- Crear un modelo de la madurez del concreto para concretos de alto desempeño CAD700 y SCC700, el cual, logre predecir satisfactoriamente su resistencia a la compresión.
- Comparar y calibrar los resultados obtenidos por el método de madurez, con los cilindros de concretos curados en el patio.

- Validar y recalibrar los resultados obtenidos con el método de madurez en una viga prefabricada, mediante la extracción de núcleos para CAD700 y SCC700.
- Presentar recomendaciones para la aplicación del método de madurez, para asegurar el cumplimiento con los requisitos mínimos exigidos por las normas.
- Realizar un análisis de pre-factibilidad, para un caso de elementos prefabricados, de la aplicación del método de madurez, para la obtención de la resistencia del concreto de alto desempeño, mediante el uso de dispositivos inalámbricos.

## **1.4 Delimitación del Problema**

### **1.4.1 Alcance**

- Con el aporte de Productos de Concreto S.A. se contó con un laboratorio de excelencia y con maquinarias de alta tecnología, personal calificado y procesos establecidos que asegurarán, con gran precisión, la homogeneidad de las dosificaciones y los especímenes, cumpliendo rigurosamente con las normas ASTM C31/C31M C39/C9M, C42/C42M y C1074.
- La investigación se limitó a dos diseños de mezcla para concreto de alta desempeño, con una dosificación y materiales proporcionados por PC. Estos diseños de mezcla fueron un "Concreto de Alto Desempeño" (CAD) y "Concreto Auto-Compactante" (SCC), ambos con una resistencia de 700 kg/m<sup>2</sup>.
- Se utilizó un solo dispositivo para la medición de la temperatura interna del concreto y, con esta información, se calibró los modelos matemáticos para obtener la madurez del concreto normados por ASTM 1074.
- Se elaboró una comparación general exclusivamente económica, haciendo comparaciones de los costos al obtener la resistencia por medio de "falla de cilindros" de concreto, mediante laboratorios de materiales que utilizan este método, y los costos de utilizar el método por "madurez" medible mediante dispositivos o "sensor". En donde se utilizarán datos proporcionados por PC, por lo que el factor económico se limitara a los procesos constructivos en la fábrica de PC.

### **1.4.2 Limitaciones**

- Por la naturaleza del proyecto de graduación el estudio sólo abarca el comportamiento en el corto plazo, sean 28 días.
- Se trabajó únicamente con dos diseños de mezcla (CAD700 y SCC700) y un solo entorno de trabajo, por lo que las recomendaciones y conclusiones se limitarán a procesos similares.
- Por el alcance de la fase experimental, el estudio de prefactibilidad está limitado a los procedimientos recomendados por la guía, por lo que principalmente se enfocadas en los procesos que ocurren en la industria de prefabricado y en específico el caso estudiado, ya que el estudio de prefactibilidad elabora en la etapa experimental y análisis esto será lo estudiado.



## **CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO**

## 2.1 Madurez

La reacción química que ocurre en el endurecimiento del concreto es una reacción exotérmica, por lo que los principios de química termodinámica indican que la cantidad de calor obtenido del proceso se puede relacionar directamente con la velocidad de reacción química ocurrida. Esto llevó a relacionar la madurez del concreto con el historial de su temperatura. Una relación que fue formalizada por la ecuación de Nurse-Saul, quien definió la madurez del concreto como el área debajo de la curva de la gráfica de temperatura interna del concreto con respecto al tiempo. Como se muestra en la siguiente ecuación: (ASTM International, 2017)

$$M(t) = \sum (T_a - T_o)\Delta t \quad (1)$$

En donde:

$M(t)$  es la madurez.

$\Delta t$  es el intervalo de tiempo.

$T_a$  promedio de temperatura interna del concreto dentro del intervalo.

$T_o$  es la temperatura base donde no ocurrirá reacción (0C° en el proyecto).

También existe la ecuación del químico Svante Arrhenius, la cual relaciona la velocidad de reacción con respecto a la temperatura de la reacción. Utilizando el método propuesto por Arrhenius se modificó el método de obtención de la madurez, ya que se considera que la variable de tiempo se debe calcular utilizando una edad equivalente de la reacción. Para este método de obtención de la madurez, se utiliza la siguiente formula: (ASTM International, 2017)

$$t_e = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right)} \Delta t \quad (2)$$

En donde:

$t_e$  es la edad equivalente del intervalo.

$\Delta t$  es el intervalo de tiempo.

$T_a$  promedio de temperatura interna del concreto dentro del intervalo.

$T_s$  es la temperatura específica en K.

$Q$  es energía de activación dividida por a constante de gas R en K.

Ambos métodos presentados son respaldados y recomendados por la norma ASTM 1074 para la obtención de la madurez del concreto y la calibración de su modelo.

Utilizando estos métodos para la obtención la madurez del concreto J. M. Plowman, PhD, en 1956, buscó relacionar estos datos de madurez directamente con la resistencia a la compresión del concreto. En la revista "Magazine of Concrete Research" Plowman presentó una investigación donde encontró que la relación entre la madurez y la resistencia del concreto es logarítmica, la cual se muestra en la ecuación siguiente: (Plowman, 1956)

$$S = A + B \log(M(t, T)) \quad (3)$$

En donde:

S es la resistencia del concreto

A y B son constantes obtenidas al calibrar el modelo

$M(t, T)$  es la madurez del el concreto

(Naik, 1992)

La literatura indica que, al igual que el método de falla de cilindros de concreto, el método de madurez da resultados de la resistencia a la compresión, pero lo que aparentemente ha hecho atractivo el método de madurez, son las diversas ventajas prácticas y técnicas que tiene sobre otros métodos, como el de falla de cilindros de concreto. (Giatec Scientific, 2017)

Una de estas ventajas que señala la literatura es que el método de madurez permite evaluar puntos de control específicos o los más críticos según su ubicación. Es decir, se puede poner el dispositivo de medición de temperatura en los puntos donde se demandará la mayor resistencia, mientras que el cilindro es una aproximación general de todo el elemento. También el método de falla de cilindros es un método lento que normalmente lleva un proceso largo para la obtención de la resistencia y que solo se obtiene información en puntos discretos, por ejemplo, a 1 día, 7 días, 14 días y 28 días, mientras que el método de madurez puede conocer la resistencia del concreto en toda su historia de vida en tiempo real, desde que se coloca. Permitiendo, quitar soportes temporales, colocar cargas, aplicar presfuerzo, en el momento que el concreto llega a la resistencia requerida, sin necesidad de esperar un tiempo determinado. Depende del proyecto esta podría ser una característica de gran importancia

porque llegaría a optimizar el proceso de construcción, lo que provocaría mayor eficiencia y ahorro de dinero. (Naik, 1992)

Finalmente, el cilindro, aunque se obtiene de la misma mezcla del concreto, no necesariamente tendrá las mismas condiciones de endureciendo que el resto del elemento, ya que no es posible asegurar que los ambientes de ambos sean iguales o que ocurra contaminación de la mezcla después del moldeado, por lo que este método lo que establece es la resistencia del cilindro como tal y con ello se relaciona indirectamente con la resistencia del resto del elemento. Mientras que, con el método de madurez, las mediciones son directas, individuales y dirigidas hacia al elemento específico.

También es importante mencionar que el método de madurez tiene ciertas limitaciones. Una de ellas es que es un método mediante el cual su modelo solo aplica para un diseño de mezcla específico, por lo que se tendrá que calibrar para cada mezcla. Al igual que si se le agrega algún aditivo a la mezcla de concreto, se tendrá que recalibrar el modelo ya que no se considera que las mezclas son iguales. Además, al usar el método se asume que se está realizando un curado adecuado. Otros problemas que se presentan son que la segregación del agregado por asentamiento, los espacios vacíos y las burbujas de aire en la mezcla, conllevan a que el concreto no sea homogéneo y presente altas variaciones con respecto la resistencia calculada. (Naik, 1992)

## **2.2 Legislación y reglamentación**

### **2.2.1 Nacional**

El Código Sísmico de Costa Rica, en el inciso 8.1.1a), establece como requisitos para el concreto estructural reglamenta que, en este ámbito, se debe cumplir con lo reglamento en las especificaciones del comité 318 del ACI. (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, 2010)

El Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, actualmente, no tiene ninguna normativa que regule el uso del método de madurez para obtener la resistencia del concreto.

Mientras que en el reglamento de construcciones actualizado a 2018 únicamente existen los artículos 16 y 105, los cuales señalan que se debe seguir las disposiciones del CSCR. (INVU, 2018)

### **2.2.2 Legislación internacional**

A diferencia que la legislación nacional, en la legislación internacional existen muchas normas que tienden a regular la resistencia del concreto.

En la sección 26.12 del ACI318S-14 se encuentre reglamentado el uso de ensayos para la obtención de la resistencia del concreto. Según lo estipulado en el ACI318S-14 el laboratorio debe de cumplir con la norma ASTM C1077 la cual brinda los estándares para los ensayos de concreto en la cual regula las instalaciones, equipo, calibración y personal técnico calificado para efectuar las fallas. (Comité ACI 318, 2014)

Este reglamento también plantea como requisitos mínimos de frecuencia de muestreos: por lo menos una muestra al día, al menos una muestra cada 110m<sup>3</sup>, al menos una muestra cada 460m<sup>2</sup> de losa o muro, si se tiene más de 5 tandas de mezcla y por los otros requisitos se deben hacer menos muestreos que la cantidad de mezclas la escogencia de cuales se muestrear debe ser aleatoria y si se tienen igual o menos de 5 tandas de mezclado se debe tener al menos una muestra por cada tanda. Todos estos muestreos se deben de hacer de manera aleatoria, deben de crearse las probetas necesarias contemplando todas las edades requeridas de la misma muestra y no se le puede agregar aditivos, agua ni agregados después del muestreo. (Comité ACI 318, 2014)

Una muestra se conforma de grupos de cilindros para cada edad que se requiere saber la resistencia. Como mínimo se debe de obtener la resistencia del concreto a los 28 días para

comprobar el  $f_c'$ . Además, se debe hacer obtener especímenes para fallar a edades importantes, requeridas por la etapa constructiva o por otras razones. En proyectos de edificios de concreto reforzado, 7 y 14 días son edades comunes de obtener resistencia para quitar puntales de apoyo y asegurarse que los elementos estructurales tengan la resistencia para soportar las cargas de la etapa constructiva. Si se utilizan métodos de losas planas con post-tensado se requieren edades cercanas a los 4 días, pero este puede variar según el día que se tensen los torones ya que se debe cumplir cierta resistencia para el tensado. (Bravo, 2018) En el ámbito de concreto prefabricado la edad de más importancia es la del desmolde el cual es alrededor de las 18 horas variando ligeramente depende del elemento, además a edades de 7 días también es importante ya que se están entregando los productos al proyecto donde tendrá cargas de construcción, según el ingeniero Andrés Reyes de Productos de Concreto. (Reyes, 2018)

Además, el ACI318S-14 determina que se debe tener un mínimo de 2 probetas si se utiliza cilindros de 150mm de diámetro por 300mm de altura y 3 probetas si se utiliza cilindros de 100mm de diámetro por 200mm de altura para cada edad que se requiera conocer la resistencia del concreto. La toma del concreto debe hacerse con respecto a la norma ASTM C172M, los cilindros deben de crearse y curarse siguiendo la norma ASTM C31M y finalmente su falla es regulada la norma por ASTM C39M. (Comité ACI 318, 2014)

## 2.3 Incertidumbre

Toda investigación cuenta con diversos factores que pueden inducir error a sus resultados. Una fuente de error importante a considerar es la inexactitud de las mediciones realizadas en proyectos experimentales. Esta incertidumbre se asocia a la precisión de los instrumentos de medición y no solo es importante considerar la inexactitud de cada medición, sino también tomar en cuenta la propagación de este error, en los cálculos y en otros usos de las mediciones, hasta el resultado final. No es posible brindar conclusiones adecuadas sobre resultados que no se sepa su precisión.

Dentro del área de incertidumbre existen muchos métodos para la propagación de esta. Algunos toman en cuenta las probabilidades de desviación de la medición, otros utilizan enfoques numéricos utilizando series de Taylor o cálculo diferencial. Para este estudio se utilizará el enfoque funcional. El cual busca la propagación del error aleatorio asociado a combinar variables, las cuales tienen incertidumbres asociadas a las mediciones iniciales.

Para el uso de este método, las mediciones deben tener valores de incertidumbre asociados a que el valor real de la medición este encasillado por un valor máximo o mínimo. Este enfoque propuesto pretende arrastrar el error en cada uno de los cálculos, por lo que por cada cálculo que se hace la misma operación con todas las permutaciones de máximos y mínimos de cada una de las variables, obteniendo todas las posibles combinaciones de error, de las cuales se asigna el resultado con los valores máximos y mínimos como la incertidumbre del valor calculado sin la aplicación de incertidumbres. (Hughes & Hase, 2010)

$$Z = f(A, B, C, \dots) \quad (4)$$

$$Z \pm \delta_Z = f(A \pm \delta_A, B \pm \delta_B, C \pm \delta_C, \dots) \quad (5)$$

En donde:

$A, B$  y  $C$  son insumos de la función con incertidumbres asociadas

$\delta_A, \delta_B, \delta_C$  son las incertidumbres de cada insumo, la cual puede tomar diferente valor en su versión positiva y negativa

$Z$  es el resultado de la fusión

$\delta_Z$  es la incertidumbre del resultado

Este método se utiliza a lo largo de todos los cálculos del proyecto, de manera que se obtienen 3 resultados finales, uno contemplando las incertidumbres que aumentan el valor del resultado, otro con los valores sin incertidumbre y finalmente uno contemplando las incertidumbres que disminuyen el valor del resultado. (Hughes & Hase, 2010)



## **CAPITULO 3 MARCO METODOLÓGICO**

### 3.1 Diagrama relación entre actividades

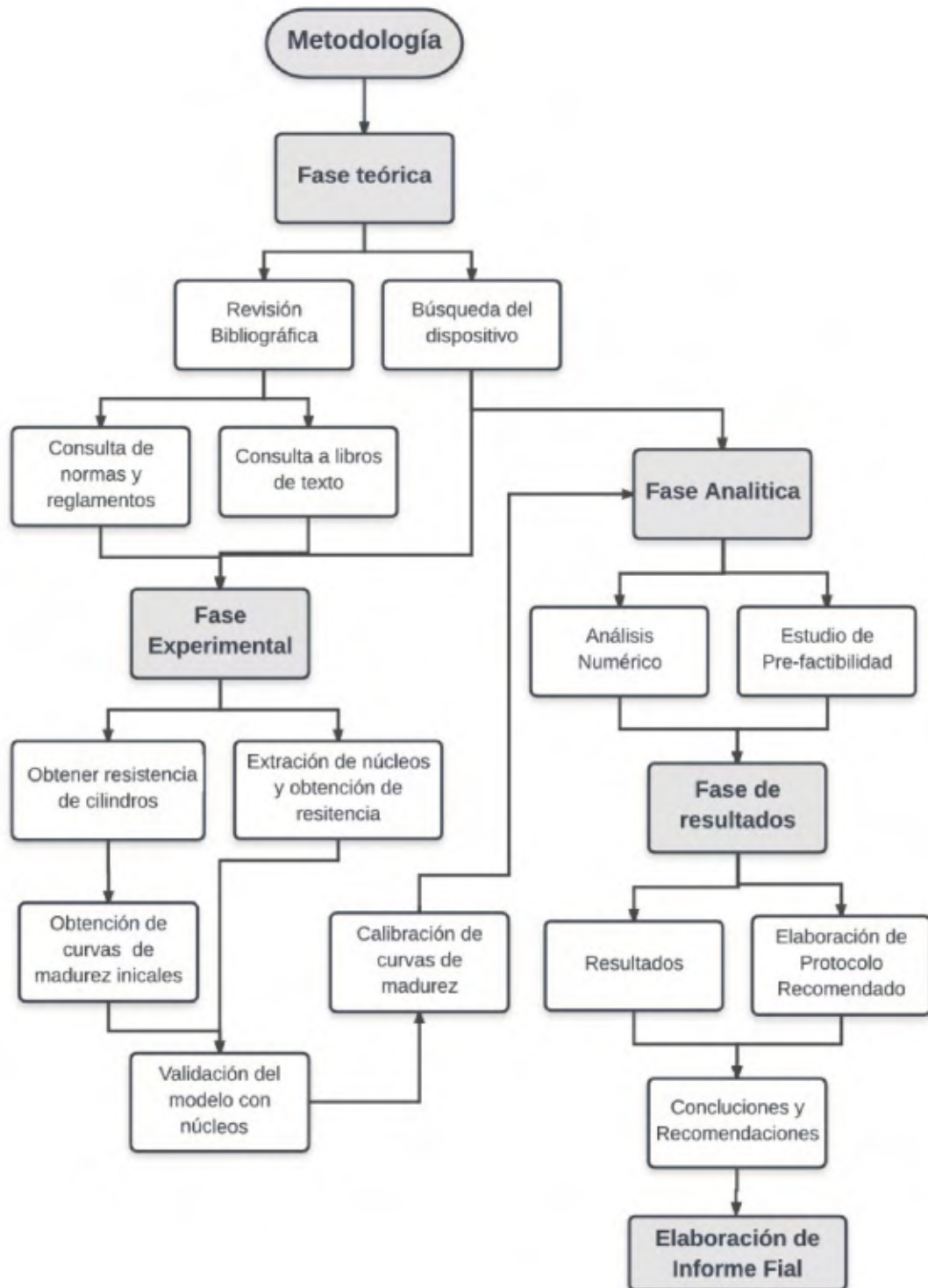


Figura 3.1 Diagrama de relación entre actividades

Elaborado por: Andrés Carranza

Fuente: Lucid Charts

## **3.2 Fase teórica**

### **3.2.1 Consulta a normas y reglamentos costarricense**

En la primera etapa se recolecta información sobre la legislación costarricense en cuanto a las normas y reglamentos aplicables, tales como, el Código Sísmico de Costa Rica 2010 en su Capítulos 3 y 8 y aquellas normas concordantes, con el fin de establecer la posibilidad de utilizar métodos no convencionales para la obtención de la resistencia a la compresión del concreto. Además, se consulta la Norma INTECO para la elaboración del concreto, para revisar que sean cumplidos en la producción del concreto empleado en el proyecto.

### **3.2.2 Consulta a normas y reglamentos internacionales**

Seguidamente se investiga sobre normativas y reglamentos en el ámbito internacional que regulan el uso del método de madurez, tales como el CBD-187 canadiense, Capítulo 26 ACI 318SR-14 y la Norma ASTM 1074. Buscando en los parámetros de estas normas, la posible aplicación de estas al entorno costarricense y así poder concordar en procesos y resultados normalizados.

### **3.2.3 Consulta doctrinal (informes, ensayos técnicos y literatura)**

Utilizando la literatura existente, los resultados de informes y ensayos técnicos de la compañía Giatec Scientific y lo recomendado en el proyecto de Graduación de Erick R. Rodríguez "Relación entre Resistencia y Temperatura del Concreto Utilizando el Método de Madurez" (Rodríguez, 2004), se estudia el proceso de la obtención de la resistencia por medio del método de madurez y se adecua a las necesidades para asegurar éxito de los objetivos de esta investigación.

### **3.2.4 Búsqueda de dispositivos inalámbricos**

Se investiga sobre posibles dispositivos inalámbricos en el mercado internacional, similares a SmartRock 2 de la compañía Giatec Scientific o Concremate de la compañía Doka, que cumplan con la norma ASTM C1074, en cuanto a la medición de la temperatura interna del concreto y que brinden información en tiempo real, contemplando también la calidad y precio adecuado.

## **3.3 Fase Experimental**

### **3.3.1 Obtención Curvas de Madurez**

Para la calibración de las curvas se utiliza un procedimiento en concordancia con lo establecido en la Norma ASTM 1074. (ASTM International, 2017)

#### **3.3.1.1 Fabricación y curado de los especímenes**

- La mezcla se hace con dos diseños de mezcla, un concreto de alta resistencia (CAD 700) y un Concreto Auto-Compactante (SCC 700) con dosificación y materiales proporcionado por Productos de Concreto S.A.
- De la mezcla se crea; 18 cilindros de concreto, curados en laboratorio siguiendo la norma ASTM C192/C192M y ASTM C511, otra tanda de 18 cilindros de concreto pero curados en el patio con el elemento de producción de referencia. De cada tanda de 18 cilindros 3 se les coloca el sensor el cual es colocado como recomienda su fabricante en un cilindro de 150mm de diámetro los restantes 15 se cuelean en cilindros de 100mm de diámetro.
- Para el curado de todos los cilindros se cumple con la especificación C511.

#### **3.3.1.2 Obtención de resistencia especímenes**

Se fallan 3 cilindros curados el laboratorio y 3 cilindros curados en el patio, cumpliendo con las especificaciones C39/C39M a edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. (ASTM International, 2017)

#### **3.3.1.3 Obtención de curva de madurez**

Se recolectan los datos de temperatura a lo largo del tiempo de los cilindros que contienen los dispositivos. Con estos datos y los resultados de la resistencia de las pruebas de los cilindros curados en laboratorio se calibra la curva madurez para cada mezcla de CAD 700 y SCC 700 utilizando las ecuaciones de Nurse-Saul o Arrhenius. (ASTM International, 2017)

#### **3.3.1.4 Búsqueda de relación entre madurez y resistencia**

Con los resultados de madurez se busca un modelo para encontrar una relación entre la madurez y la resistencia y para ser utilizada para hacer predicciones de resistencia para elementos conformados por esta mezcla. Después de tener el modelo inicial se utilizarán los datos de los cilindros curados en el patio para comparar los resultados y hacer modificaciones a la curva si es necesario.

### **3.3.2 Calibración del Método de Madurez en planta con Respecto a Núcleos**

#### **3.3.2.1 Fabricación de las vigas**

- Se coloca el sensor antes de que la viga prefabricada sea colada de manera que cumpla con las especificaciones recomendadas por el fabricante del sensor. Se marca su ubicación.
- Se cuela una viga para CAD700 y otra para SCC700 las cuales debe utilizar la misma mezcla de concreto con la que se calibro la curva de madurez.
- La toma de datos inicia a partir de que se cuele el concreto.
- El concreto se cuela utilizando siempre el mismo método.

#### **3.3.2.2 Obtención y Prueba de Núcleos del Elemento**

Para la obtención de núcleos y su residencia, a edades de 14 y 28 días, se sigue la normativa de ASTM C42. Para tener más información se obtendrá núcleos a 7 días de edad, teniendo en cuenta que estos son extras, ya que la normativa advierte que núcleos de edades menores a los 14 días pueden ser dañados por el proceso de extracción. Seguidamente se muestran algunos puntos importantes a seguir: (ASTM International, 2017)

- Se obtienen 2 núcleos en buen estado para cada edad.
- Los núcleos deben ser mayores a 95mm.
- La longitud de los núcleos debe ser de 1,9 a 2,1 veces su diámetro.
- Después de extraído y secado el núcleo se debe guardar en bolsas plásticas para evitar pérdida de humedad.
- Se deben mantener los especímenes lejos de la luz solar directa.
- Se deben medir las dimensiones y el peso del núcleo.
- Verificar su planicidad.
- Utilizar norma ASTM C39 para la falla del núcleo.

### 3.3.2.3 Calibración y validación de curvas utilizando resultados de núcleos

Se recolectan los datos de temperatura interna a lo largo del tiempo de las vigas que contienen los dispositivos. Con estos datos, se calcula la resistencia con la curva de madurez obtenida en el punto 6.3.1.3. Con estos resultados, se calibra y valida las curvas de madurez con respecto a los datos de resistencia a la compresión de la prueba de núcleos de cada viga con su respectivo modelo de madurez.

## **3.4 Fase de Análisis**

### **3.4.1 Análisis Numérico**

Se compara, los datos de resistencia a la compresión obtenidos por núcleos, el método de cilindros de concreto y el método de madurez de los dispositivos, tanto en los cilindros como dentro del elemento. Se enfoca en definir si estos métodos están produciendo el mismo resultado y también se analiza las diferentes ventajas que se pueden obtener de un sistema versus el otro.

### **3.4.2 Estudio de Prefactibilidad del Método en los Procesos en Planta de Prefabricado Pesado de Productos de Concreto S.A.**

Este estudio de prefactibilidad se hace con respecto a un volumen de concreto de producción estimado por PC de alta demanda en el mercado producido en planta de Prefabricado Pesado de PC. Se incluye un análisis de índole inclusivo que tome en cuenta, no solo los resultados de la resistencia a la compresión del concreto, sino que también muestre sus ventajas en términos de ahorro de tiempo, mano de obra, maquinaria y costos al utilizar el método de madurez, con relación al método actual. Así se identifica posibles incentivos económicos para los fabricantes de elementos prefabricados que, les inciten a investigar si este método puede ser más beneficioso y favorable.

## **3.5 Fase de Resultados y Recomendaciones**

### **3.5.1 Resultados de la Comparación entre los Distintos Métodos de Obtención de Resistencia**

Se compara los resultados de los distintos métodos para la obtención de la resistencia, método por madurez, la prueba destructiva de cilindros de concreto y la prueba destructiva de núcleos

de concreto. Ya que los núcleos forman parte de la matriz de concreto, de la cual se está buscando encontrar la resistencia, se utilizan los valores de la resistencia de concreto como los valores reales del elemento y se utilizará estos resultados para comparar los resultados obtenidos por los otros dos métodos.

### **3.5.2 Protocolo Recomendado para el uso del Método de Madurez**

Se redacta una serie de recomendaciones para el uso del método de madurez, enfocándose en (i) recomendaciones generales obtenidos de la literatura e investigaciones similares, (ii) resultados obtenidos en esta investigación y (iii) problemas encontrados en la etapa experimental, de tal forma que, esta última será el enfoque mayor de las recomendaciones. Es de gran importancia mencionar que como la parte experimental estará enfocado en solo estos los dos diseños de mezcla de la fábrica de prefabricado, las recomendaciones, aunque tengan algunos aspectos generales, se enfocaran principalmente para los diseños de CAD 700 y SCC 700 de PC.

### **3.5.3 Resultados del Estudio de Prefactibilidad**

Con ayuda de información brindada por PC, se valora económicamente los costos que tiene la empresa, asociados al uso del método destructivo de cilindros para obtención de la resistencia del concreto, con respecto a los costos que tendrían si de obtuviera la resistencia mediante el método de madurez, siguiendo la normativa ASTM 1074 y las recomendaciones del empleo de este método propuesta en el punto 6.5.2. Este estudio se realizará para los dos diseños de mezcla estudiados en la etapa experimental, por lo que las recomendaciones y los costos podrían variar si se estudiara otros diseños de mezcla.

## **CAPITULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS**



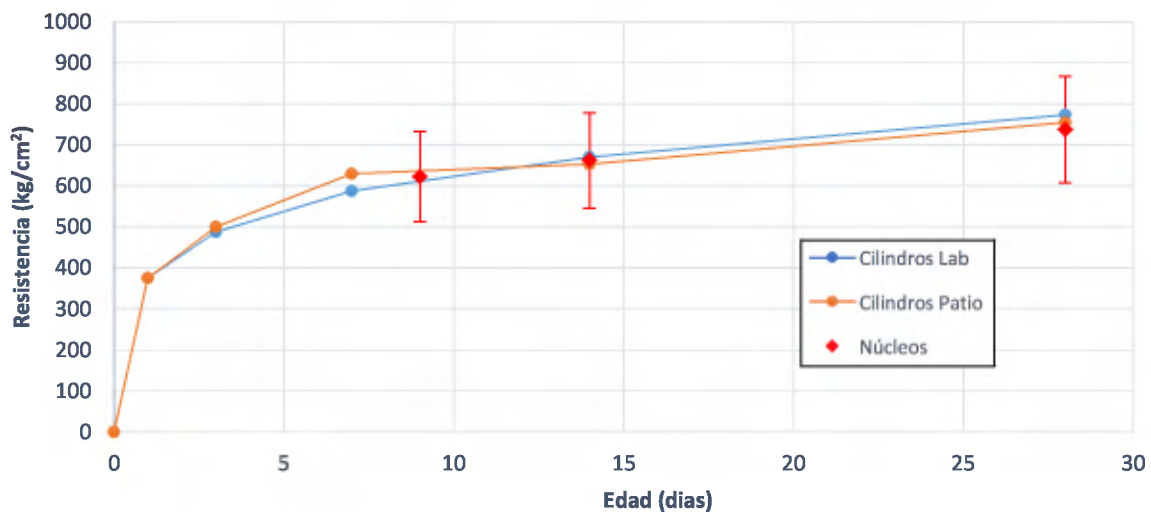
## 4.1 Obtención de la resistencia de los cilindros y núcleos

### 4.1.1 SCC700

El día 9 de abril del 2018, a las 4:40 pm, en la planta Norte de PC se coló una viga de 3.5 m, 30 cilindros de 100mm de diámetro y 6 de 150mm de diámetro cumpliendo con las normas ASTM C192/C192M para su confección. Introduciendo dos sensores en la viga de concreto y uno en cada uno de los cilindros de 150mm de diámetro. Luego de un curado adecuado, se fallaron obteniendo los siguientes resultados observados en el Cuadro 4.1 y la Figura 4.1:

**Cuadro 4.1 Resultados de ensayos de compresión de concreto.**

Edad	Curado en Laboratorio (kg/cm <sup>2</sup> )	Curado en el Patio (kg/cm <sup>2</sup> )	Núcleos (kg/cm <sup>2</sup> )
24 horas	375,37	375,37	-
3 días	487,95	499,96	-
7 días	587,60	629,75	622,56 (a 9 días)
14 días	669,79	652,67	662,03
28 días	773,11	754,45	737,66



**Figura 4.1 Grafica de resultados de ensayo de compresión del concreto para SCC700.**

Elaborado por: Andrés Carranza

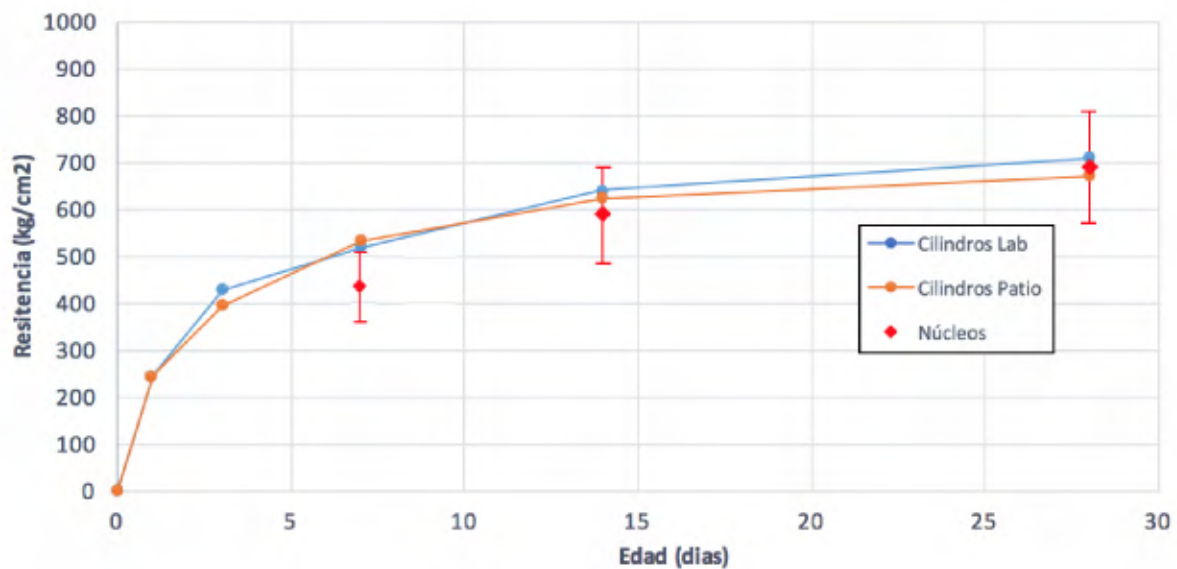
*Nota: No se incluye las barras de incertidumbre asociada a la resistencia de los cilindros ya que los datos más altos de incertidumbre son de alrededor de 0,1% y no se aprecia gráficamente, por lo que solo se coincidió el 17.6% de incertidumbre en las fallas de los núcleos, explicado en los anexos B.3.*

### 4.1.2 CAD700

El día 17 de abril del 2018, a las 2:35 pm, en la planta Norte de PC se coló los cilindros y viga para la segunda mezcla y se fallaron los cilindros obteniendo los siguientes resultados observados en el Cuadro 4.2 y la Figura 4.2:

**Cuadro 4.2 Resultados de ensayos de compresión de concreto.**

Edad	Curado en Laboratorio (kg/cm <sup>2</sup> )	Curado en el Patio (kg/cm <sup>2</sup> )	Núcleos (kg/cm <sup>2</sup> )
24 horas	245,37	245,37	-
3 días	425,69	393,58	-
7 días	515,46	531,77	433,13
14 días	638,91	621,17	587,59
28 días	707,72	668,85	688,89



**Figura 4.2 Grafica de resultados de ensayo de compresión del concreto para CAD700.**

Elaborado por: Andrés Carranza

*Nota: No se incluye las barras de incertidumbre asociada a la resistencia de los cilindros ya que los datos más altos de incertidumbre son de alrededor de 0,1% y no se aprecia gráficamente, por lo que solo se coincidió el 17,6% de incertidumbre en las fallas de los núcleos, explicado en los anexos B.3.*

### 4.1.3 Datos estadísticos de la planta

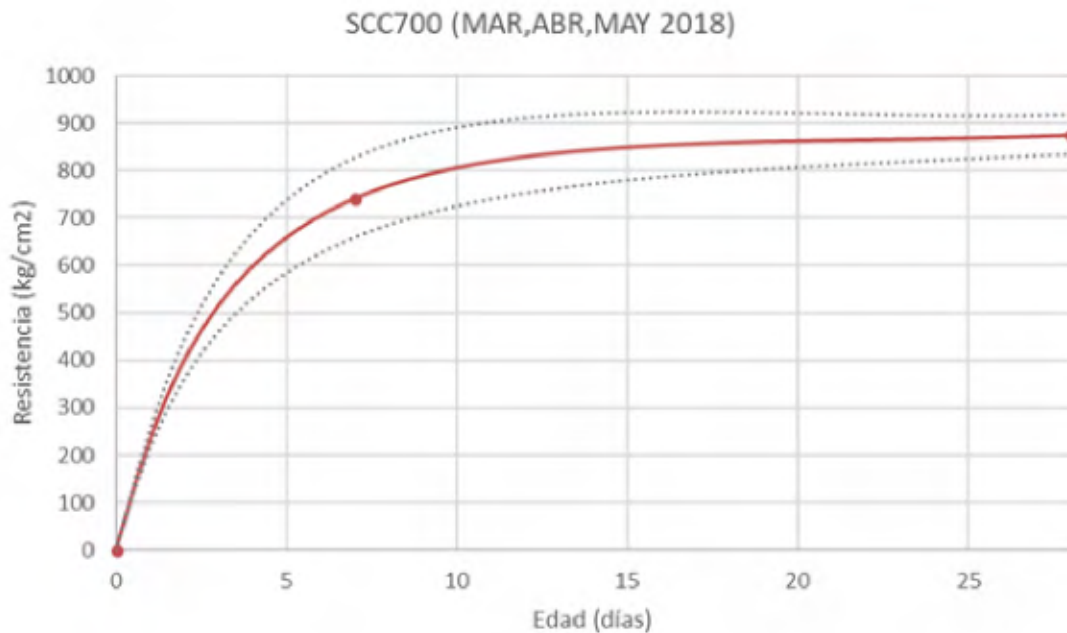
La Planta de Productos de concreto proporciono los datos estadísticos de las resistencias obtenidas para los diseños de mezcla utilizados durante el periodo de recolección de datos de todos los ensayos de compresión realizados por la empresa. Con estos datos se encontró los siguientes datos.

**Cuadro 4.3 El análisis de los tres meses de producción**

Diseño	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )				Coeficiente de variación		
	NOMINAL	Promedio		Desviación		7 DÍAS	28 DÍAS
		7 DÍAS	28 DÍAS	7 DÍAS	28 DÍAS		
SCC700	700	742	875	84	42	11%	5%
CAD700	700	682	840	47	44	7%	5%

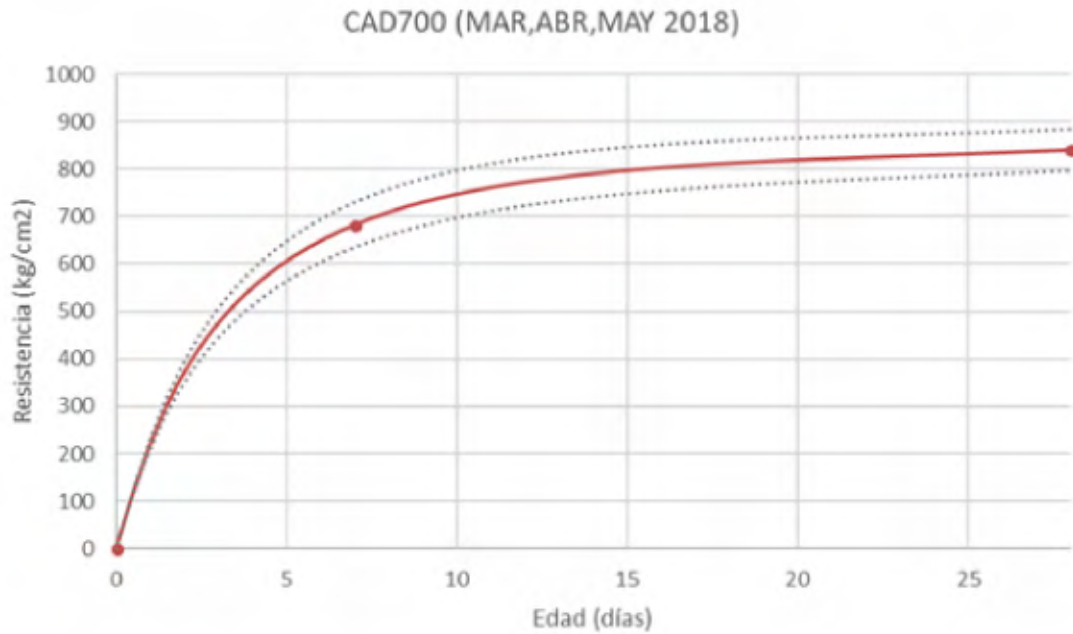
Elaborado por: Productos de Concreto, 2018

Modificado por: Andrés Carranza



**Figura 4.3 Grafica de resultados de ensayo de compresión del concreto SCC700 de planta de PC.**

Elaborado por: Productos de Concreto, 2018

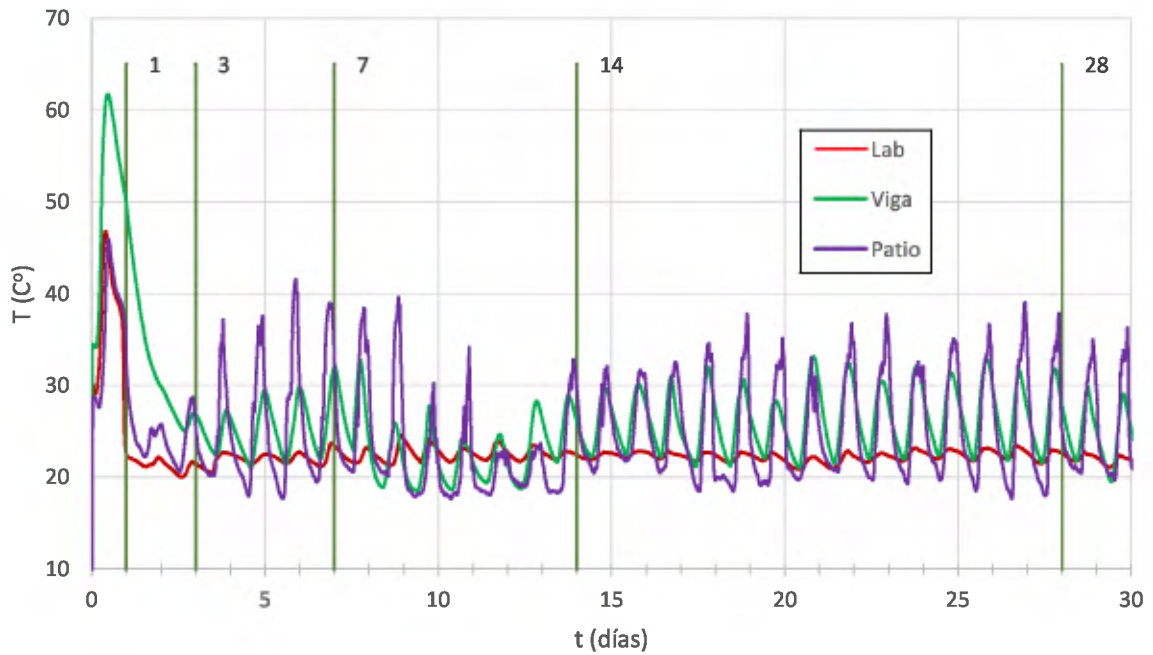


**Figura 4.4 Gráfica de resultados de ensayo de compresión del concreto CAD700 de planta de PC.**

Elaborado por: Productos de Concreto, 2018

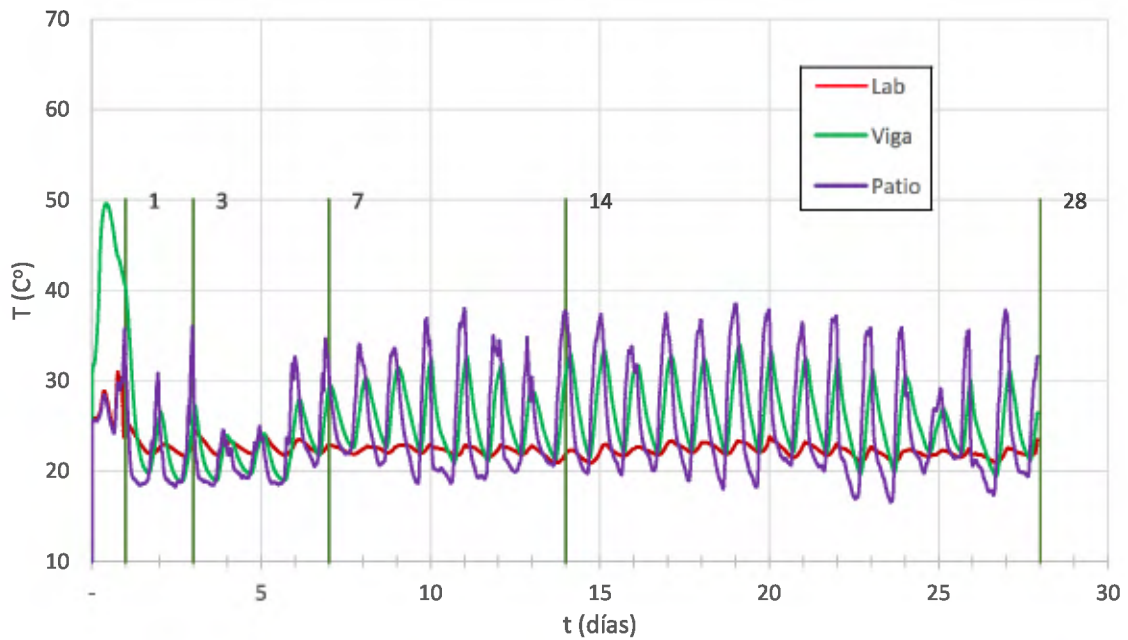
## 4.2 Resultados de temperatura

En las siguientes figuras muestra el historial de temperatura de cada uno de los elementos. Dado a que se tenían varios sensores por elemento, el historial se creó con el promedio de los datos obtenidos por elemento. En verde, rojo y morado se muestra los resultados de los sensores embebidos en la viga, en los cilindros curados en laboratorio, y en los cilindros curados en patio respectivamente. Las figuras 4.5 y 4.6 muestran el historial completo de 0 a 28 días, mientras que las figuras 4.7 y 4.8 muestran las temperaturas iniciales, abarcando solo los primeros 5 días. Además, se agregó unas líneas de referencia temporales de las edades cuando se efectuaron las fallas de los cilindros.



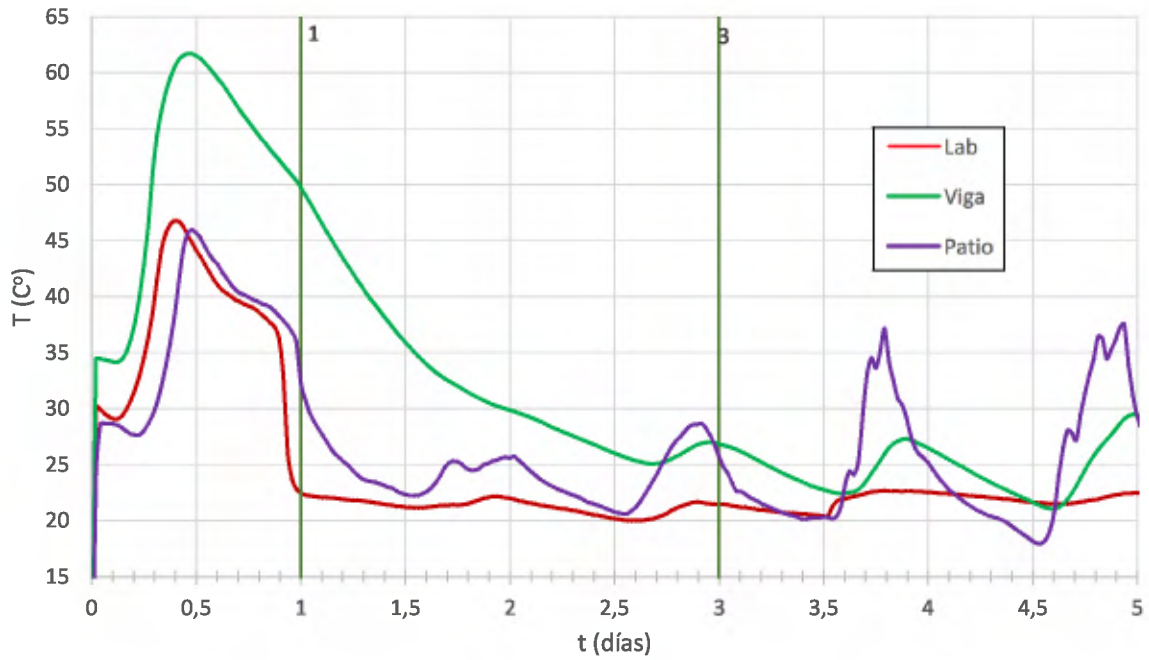
**Figura 4.5 Grafica de resultados de temperatura con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla SCC 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



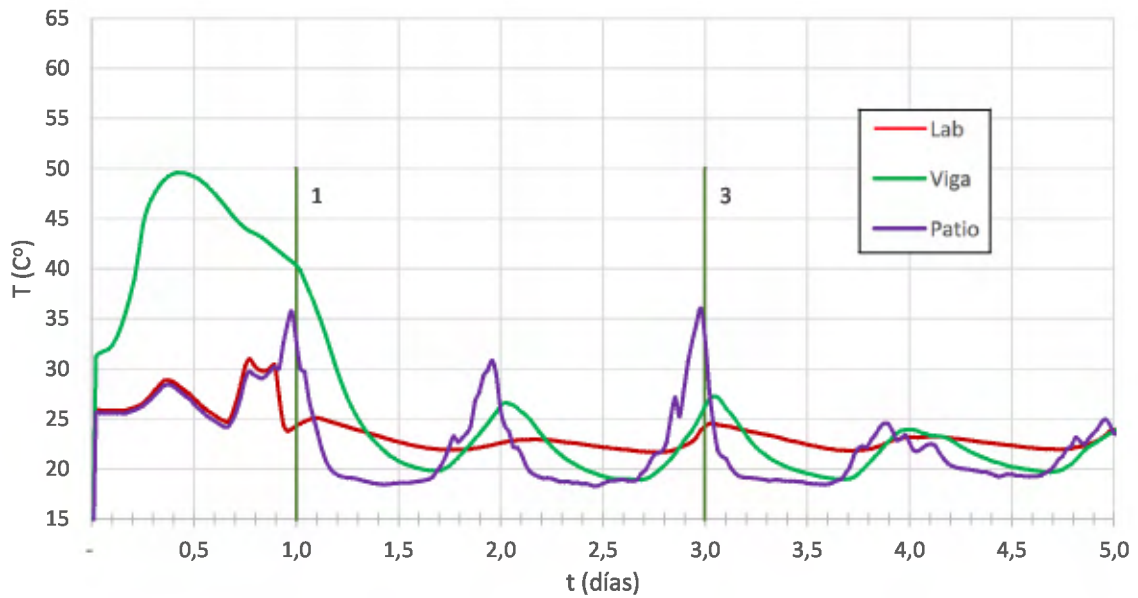
**Figura 4.6 Grafica de resultados de temperatura con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla CAD 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



**Figura 4.7 Grafica de resultados de temperatura inicial con respecto al tiempo los distintos muestreos de la mezcla SCC 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

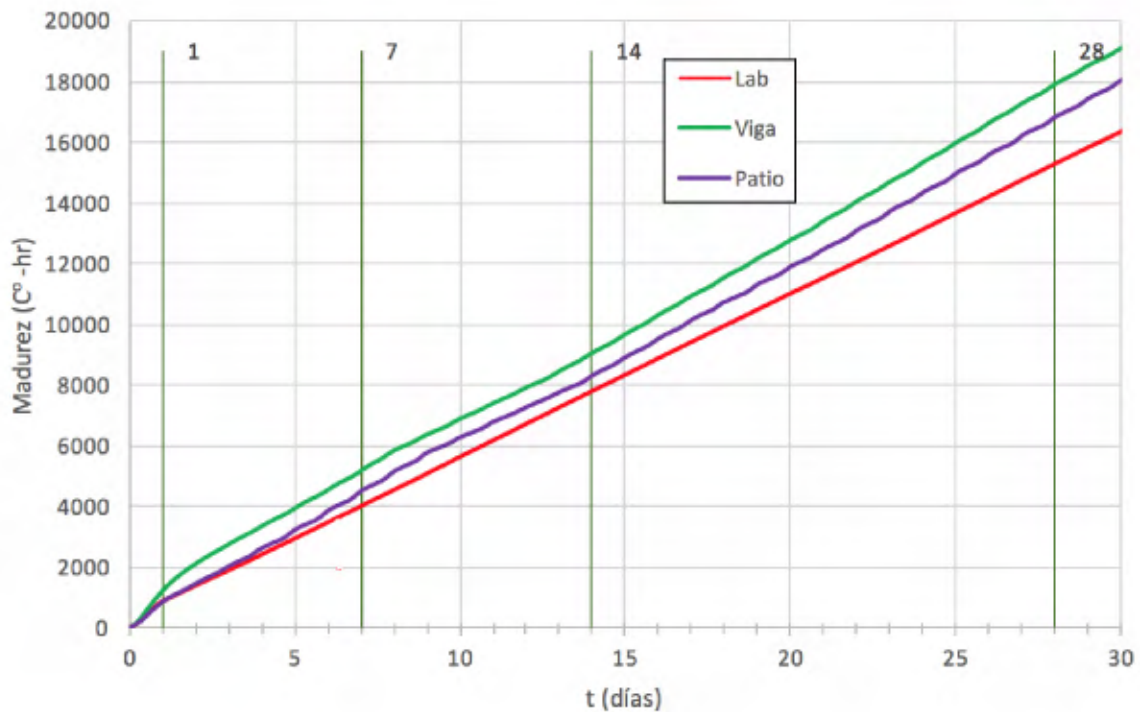


**Figura 4.8 Grafica de resultados de temperatura inicial con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla CAD 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

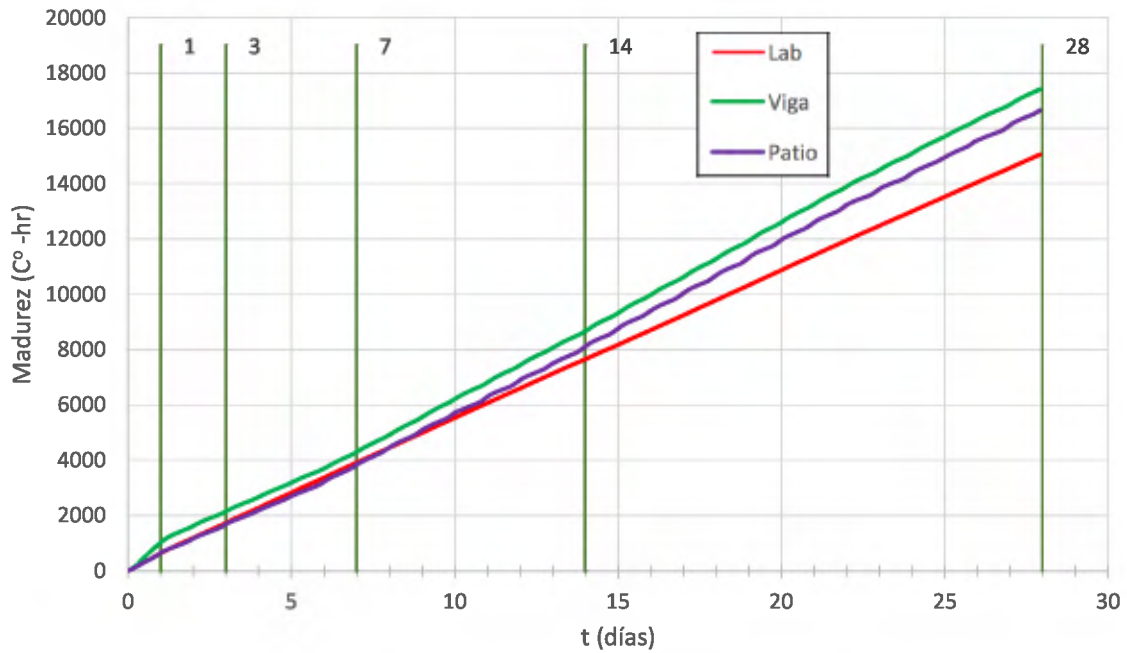
### 4.3 Resultados de Madurez

Utilizando los datos de la sección anterior de la temperatura promedio de los dispositivos en función del tiempo, se le calcula integral para obtener la madurez a través del tiempo. Para esto se utilizó la ecuación (1) de Nurse-Saul, la cual calcula el área bajo la curva de temperatura en función de tiempo en puntos discretos para aproximarse a la integral. En verde, rojo y morado se muestra los resultados de la curva de madurez de la viga, los cilindros curados en laboratorio, y los cilindros curados en patio respectivamente. Las figuras 4.9 y 4.10 muestran el historial completo de 0 a 28 días, mientras que las figuras 4.11 y 4.12 muestran las temperaturas iniciales, abarcando solo los primeros 5 días. Además, cuenta con unas líneas de referencia temporales de las edades cuando se efectuaron las fallas de los cilindros.



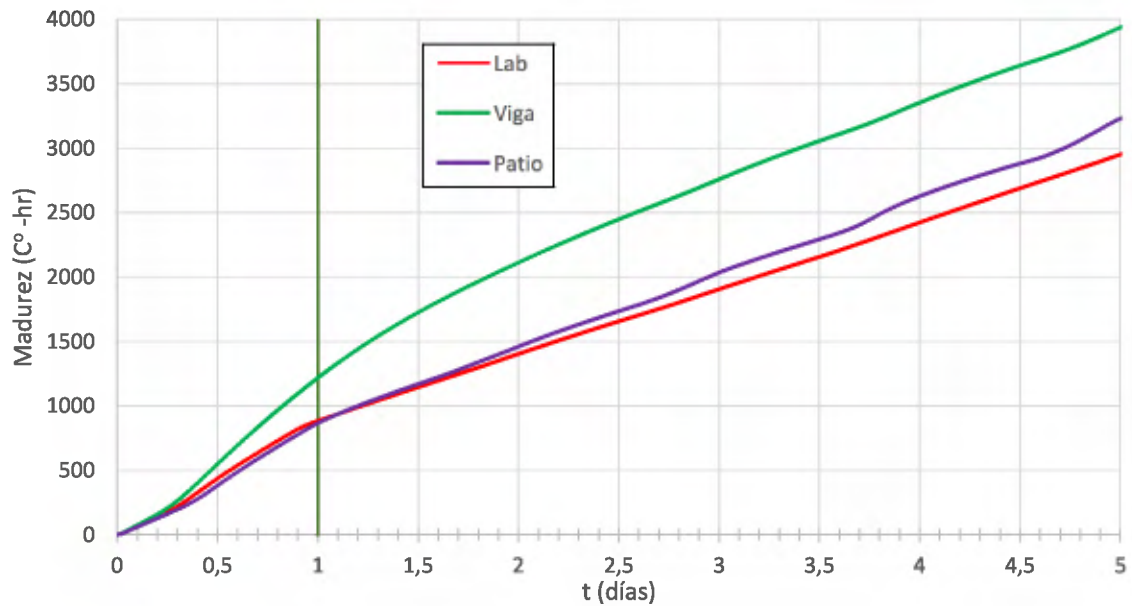
**Figura 4.9 Grafica de resultados de madurez con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla SCC 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



**Figura 4.10 Grafica de resultados de madurez con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla CAD 700.**

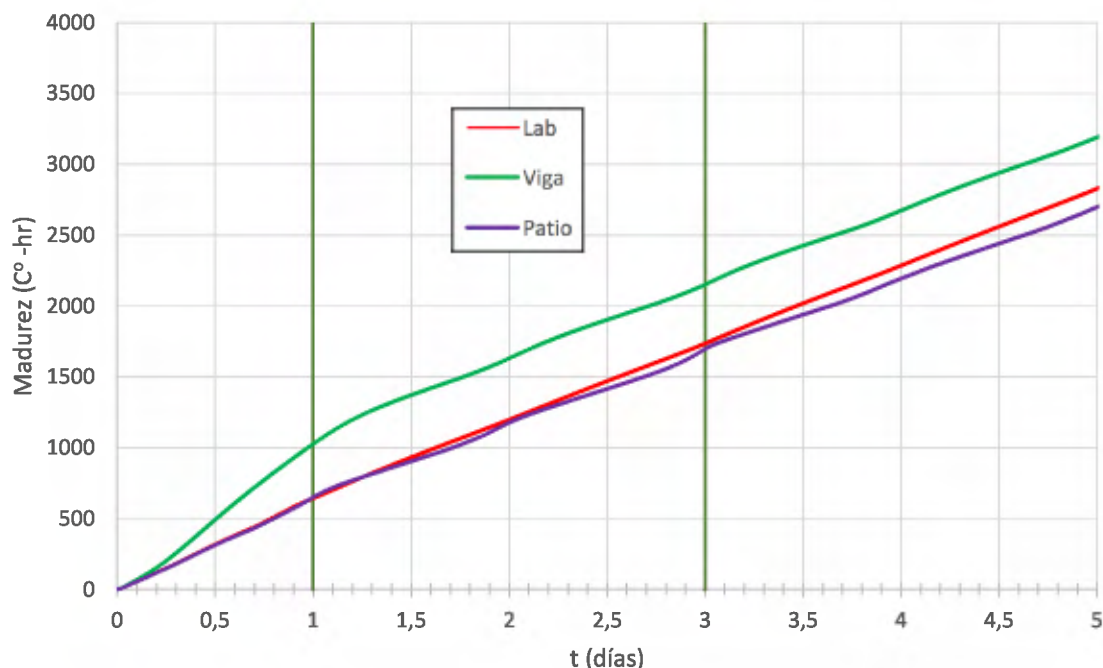
Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



**Figura 4.11 Grafica de resultados de madurez inicial con respecto al tiempo los distintos muestreos de la mezcla SCC 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018





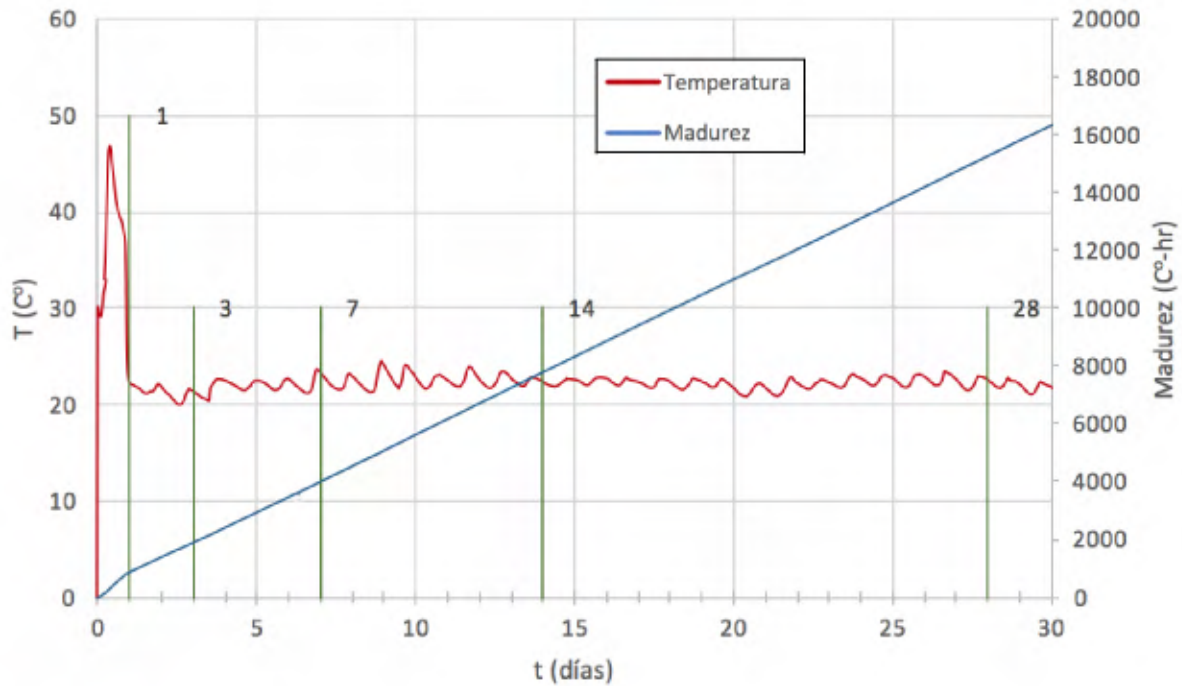
**Figura 4.12 Grafica de resultados de madurez inicial con respecto al tiempo para los distintos muestreos de la mezcla CAD 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

#### **4.4 Calibración del método de madurez**

A continuación, se presenta los resultados y proceso de calibración para cada una de las mezclas. Se utilizaron los datos tanto de los cilindros curados siguiendo las normas ASTM 511 para curados en tanques de agua y un curado siguiendo la norma ASTM C31 para los elementos curados en el patio al lado de la viga.

La figura 4.13 se muestra la variación en el tiempo de, la temperatura promedio de los tres dispositivos embebidos en los cilindros y la madurez, calculada por la ecuación (1) de Nurse-Saul, la cual es la integral de la curva de temperatura, en la figura están en rojo y azul respectivamente. Además, se agregó en verde unos puntos de referencia temporales de cuando se efectuaron las fallas de los cilindros. Esta figura muestra los resultados obtenidos para los cilindros curados en laboratorio de la mezcla SCC 700.

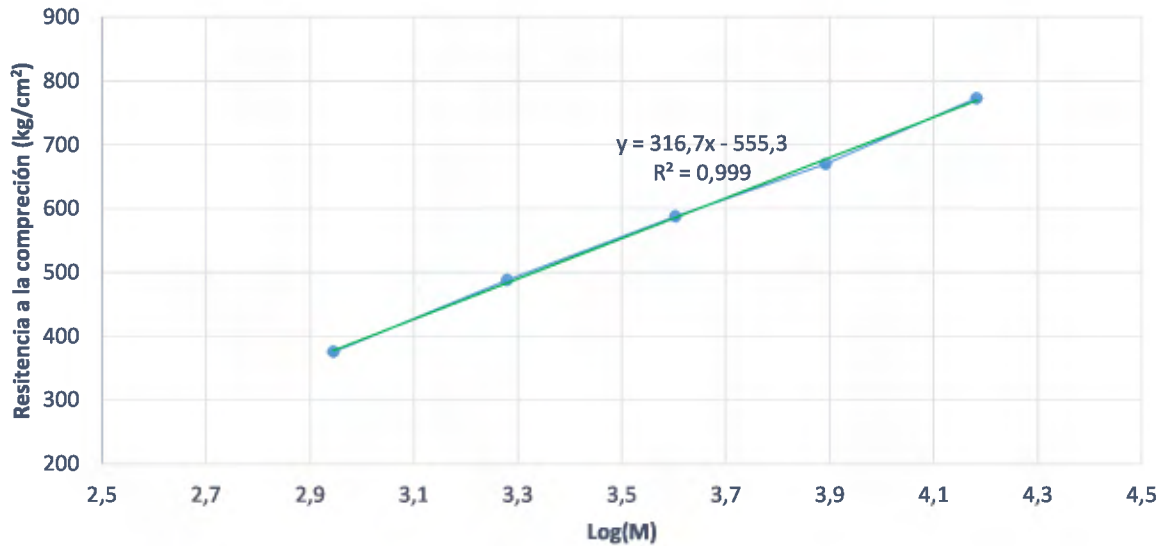


**Figura 4.13 Gráfica de resultados de temperatura y madurez con respecto al tiempo para cilindros curados en laboratorio de la mezcla SCC 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

Utilizando los datos de resistencia de los cilindros de la sección 4.1 y los datos del apartado anterior de madurez se sigue lo estipulado por J. M. Plowman, en 1956 como mencionado en el marco teórico, donde se busca una tendencia lineal en el comportamiento logarítmico de la madurez y así encontrar los coeficientes A y B de la ecuación (3) mostrada en el Marco Teórico. Con estos datos se montó la gráfica mostrada en la Figura 4.6 y se encontró la siguiente tendencia lineal:

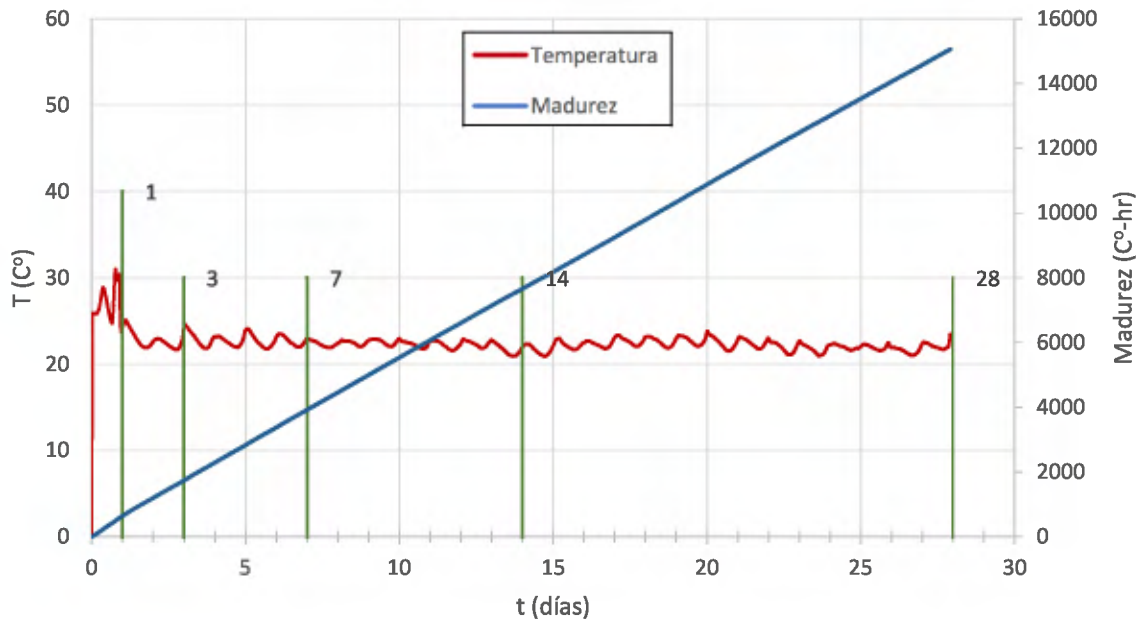
$$\sigma = 316,7 \log(M) - 555,3$$



**Figura 4.14 Grafica de tendencia lineal de la resistencia de los cilindros con respecto al logaritmo de la madurez para cilindros curados en laboratorio de la mezcla SCC 700.**

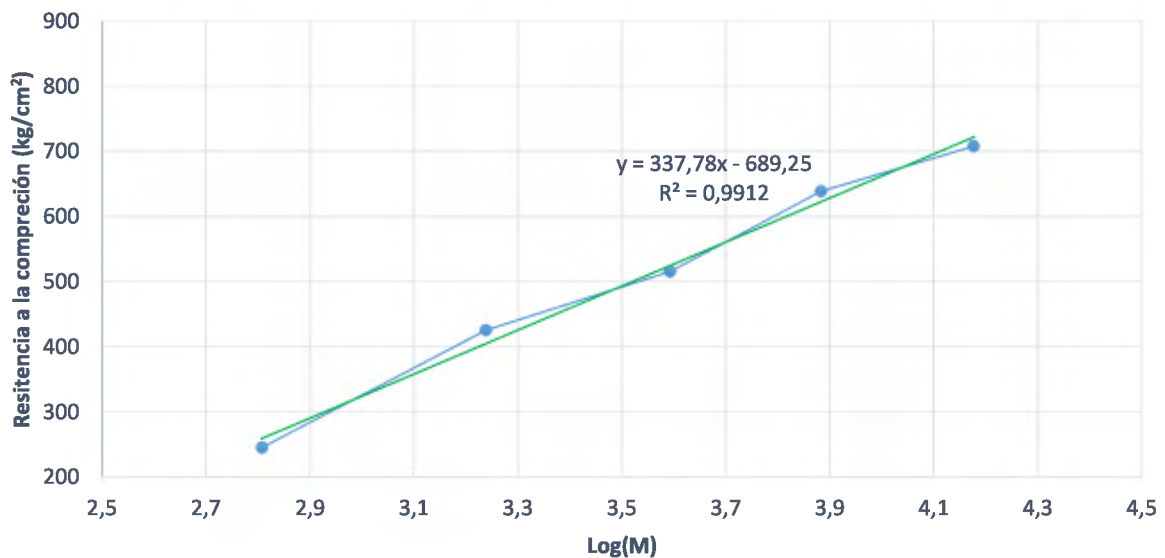
Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

De la misma manera a continuación se presentan los resultados para CAD 700 en las Figuras 4.7 y 4.8, además se incluyeron los resultados de las calibraciones utilizando los cilindros curados en patio los cuales, aunque no cumplen con la normativa ASTM 1074 para utilizar madurez, se quiere ver si se obtienen resultados más precisos ya que el curado y las temperaturas de la viga y los cilindros en este caso son el mismo. Resultados para las calibraciones curadas en patio de SCC 700 están en las Figuras 4.9 y 4.10 y para CAD 700 en las Figuras 4.11 y 4.12. En donde se puede observar las grandes diferencias en las temperaturas entre los cilindros de patio y lo cilindros de laboratorio.



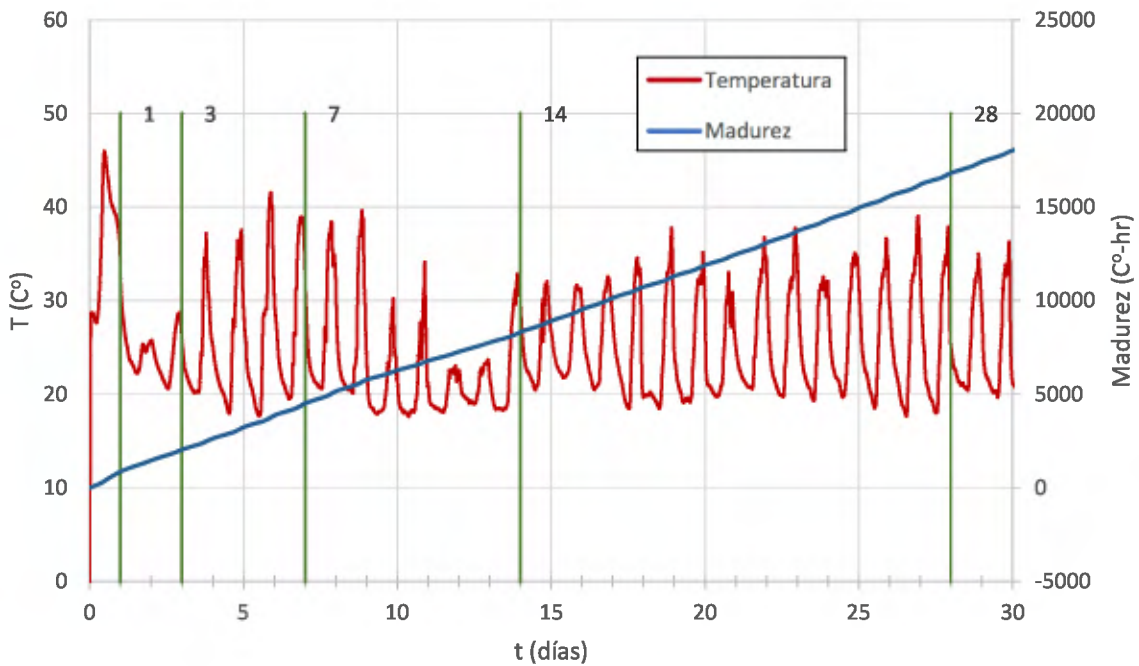
**Figura 4.15 Grafica de resultados de temperatura y madurez con respecto al tiempo para cilindros curados en laboratorio de la mezcla CAD 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



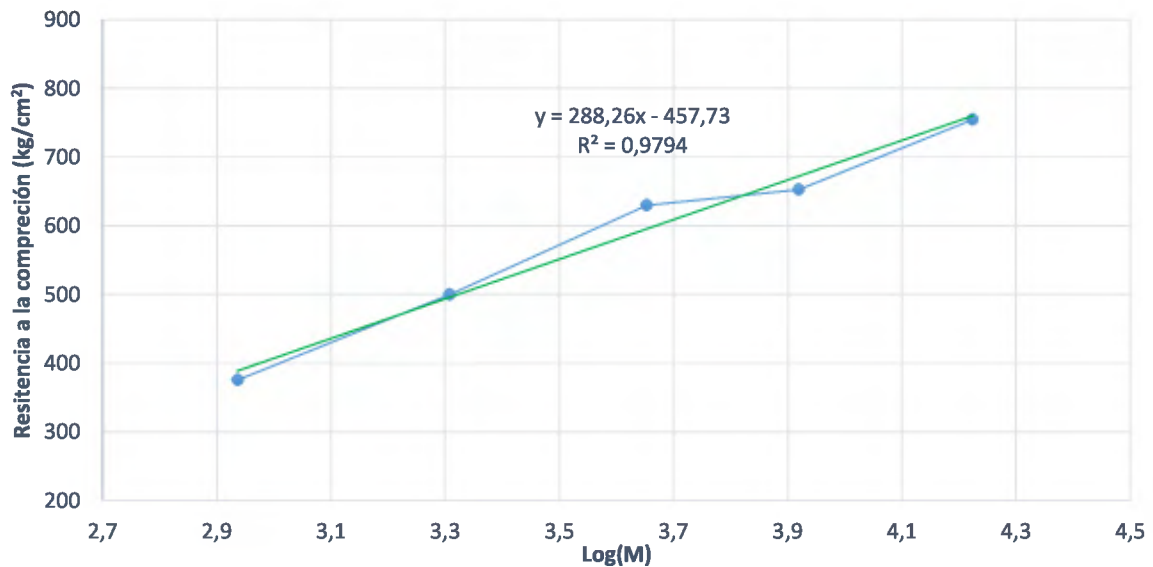
**Figura 4.16 Grafica de tendencia lineal de la resistencia de los cilindros con respecto al logaritmo de la madurez para cilindros curados en laboratorio de la mezcla CAD 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



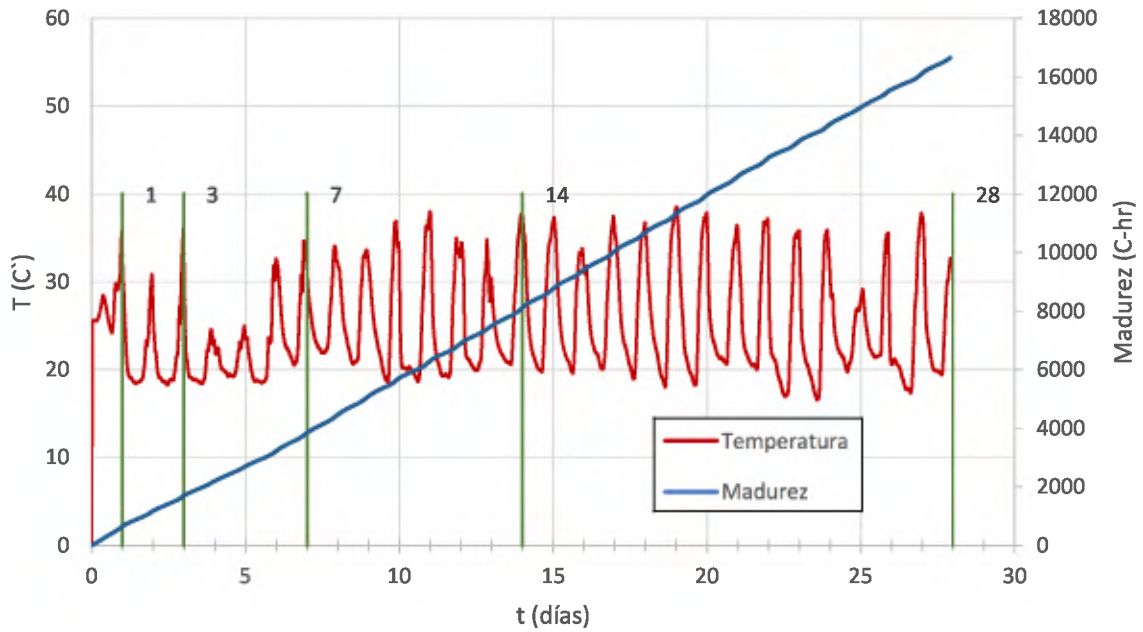
**Figura 4.17 Grafica de resultados de temperatura y madurez con respecto al tiempo para cilindros curados en patio de la mezcla SCC 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



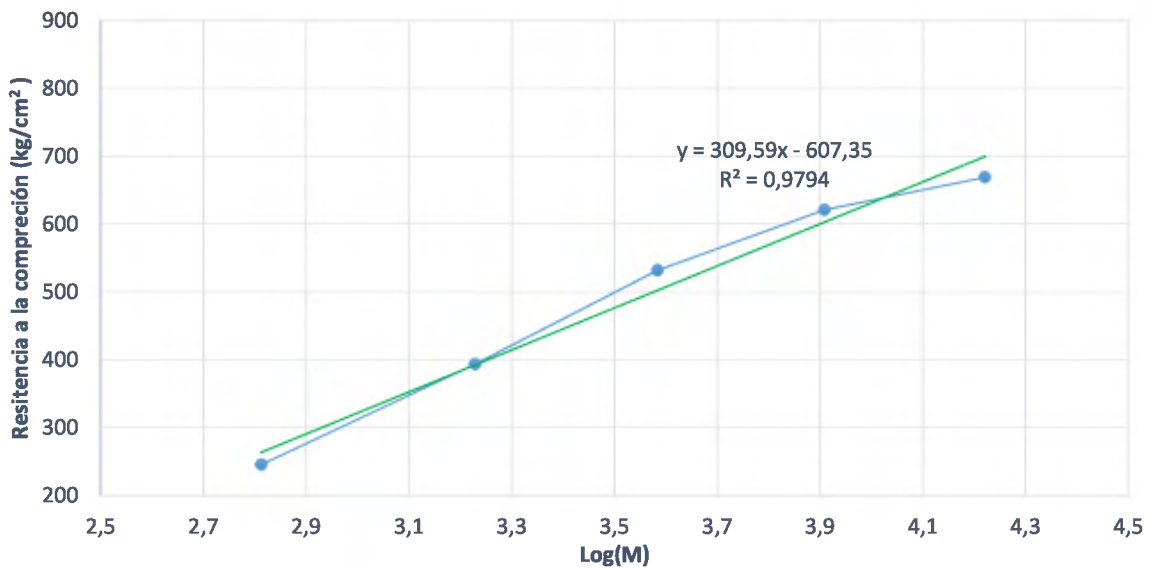
**Figura 4.18 Grafica de tendencia lineal de la resistencia de los cilindros con respecto al logaritmo de la madurez para cilindros curados en patio de la mezcla SCC 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



**Figura 4.19 Grafica de resultados de temperatura y madurez con respecto al tiempo para cilindros curados en patio de la mezcla CAD 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



**Figura 4.20 Grafica de tendencia lineal de la resistencia de los cilindros con respecto al logaritmo de la madurez para cilindros curados en patio de la mezcla CAD 700.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

Con la tendencia lineal en el comportamiento logarítmico de la madurez las gráficas de las Figuras 4.6, 4.8, 4.10 y 4.12 y se crean los siguientes modelos para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto por medio de madurez:

Curva calibrada para SCC 700 Laboratorio

$$\sigma = 316,70 \log(M) - 555,30 \quad (6)$$

Curva calibrada para CAD 700 Laboratorio

$$\sigma = 337,78 \log(M) - 689,25 \quad (7)$$

Curva calibrada para SCC 700 Patio

$$\sigma = 288,26 \log(M) - 457,73 \quad (8)$$

Curva calibrada para CAD 700 Patio

$$\sigma = 309,59 \log(M) - 607,35 \quad (9)$$

## **4.5 Comparación entre distintos métodos de obtención de resistencia**

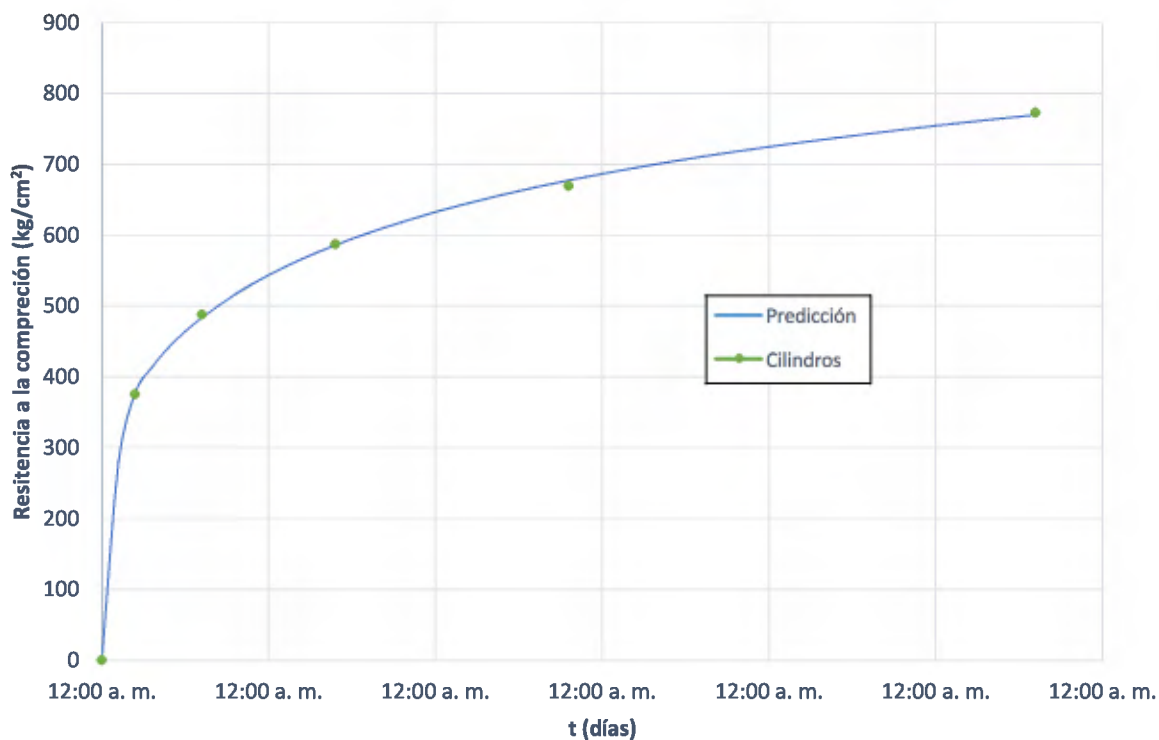
### **4.5.1 Comparación con respecto a los cilindros**

Utilizando los modelos planteados en la sección anterior, a continuación, se presentará tanto un cuadro, como un gráfico de las predicciones de las resistencias de los cilindros con los datos de temperatura y tiempo de los dispositivos que se colocaron dentro de los cilindros y se comparan con sus respectivos resultados de las resistencias reales de las pruebas a compresión presentados en la sección 4.1. En las gráficas se muestra en Azul la predicción del modelo y en verde los resultados de las pruebas de compresión de los cilindros.

*Nota: Por naturaleza del método de madurez cada modelo se calibra para un diseño de mezcla por lo que no es válido para otras mezclas de concreto. Por esto los modelos obtenidos en este proyecto de graduación, no deben ser utilizados para predecir resistencia de concreto en otro proyecto. Para cada proyecto se debe calibra el modelo en donde su calibración tome en cuenta, tanto los tiempos importantes a los cuales se ocuparán la resistencia y con su respectiva mezcla.*

**Cuadro 4.4 Comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Laboratorio.**

Días	Madurez M	log(M)	Cilindros	Calculada	Diferencia
1	882,765	2,946	375,372	377,649	0,61%
3	1905,353	3,280	487,954	483,468	0,92%
7	4012,433	3,603	587,603	585,899	0,29%
14	7803,045	3,892	669,794	677,380	1,13%
28	15234,428	4,183	773,106	769,401	0,48%



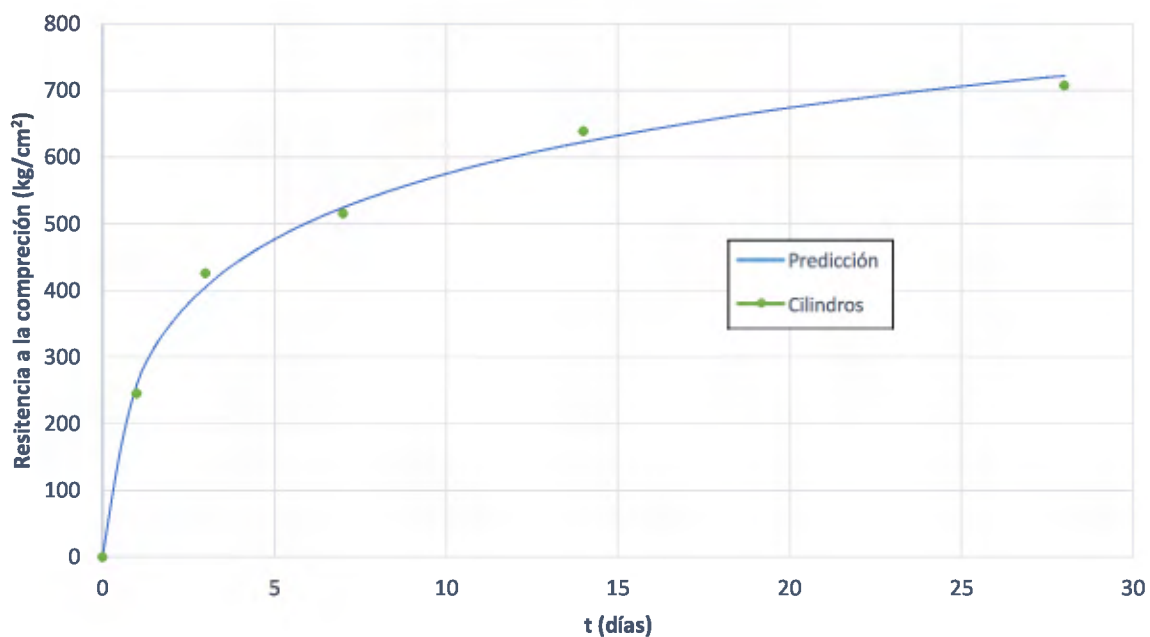
**Figura 4.21 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Laboratorio.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



**Cuadro 4.5 Comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Laboratorio.**

Días	Madurez M	log(M)	Cilindros	Calculada	Diferencia
1	642,715	2,808	245,374	259,242	5,65%
3	1735,229	3,239	425,694	404,940	4,88%
7	3916,624	3,593	515,464	524,364	1,73%
14	7654,486	3,884	638,912	622,659	2,54%
28	15054,092	4,178	707,723	721,878	2,00%

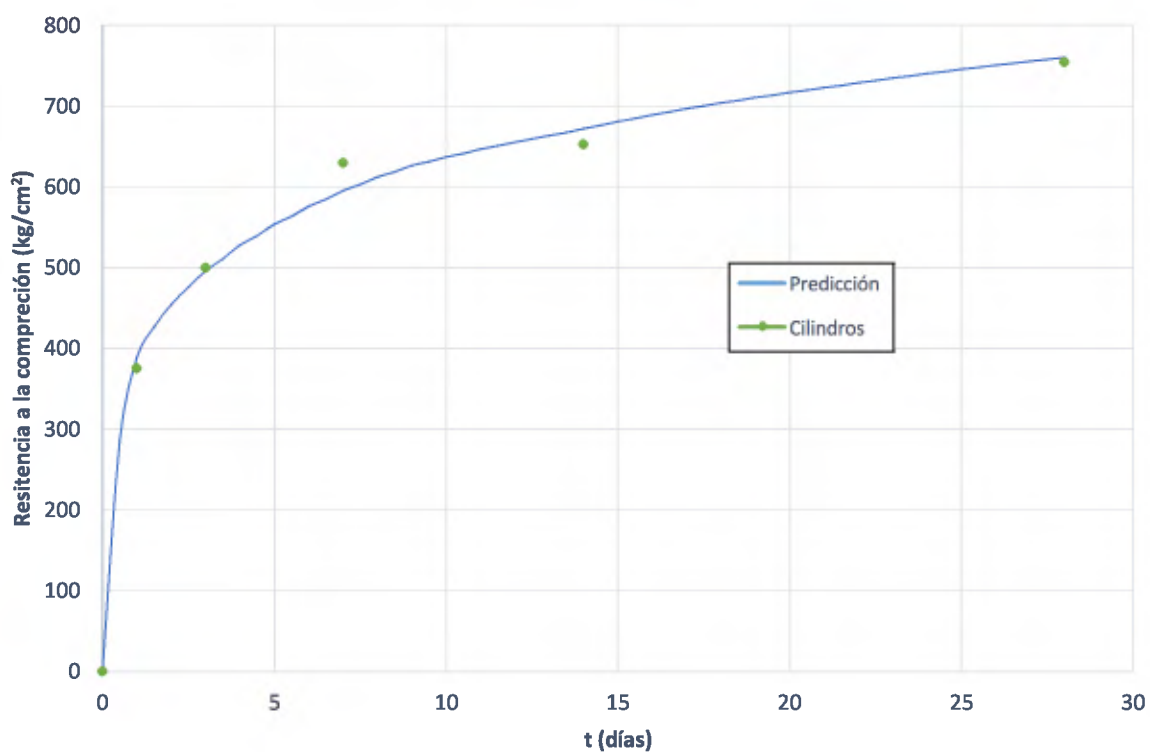


**Figura 4.22 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Laboratorio.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

**Cuadro 4.6 Comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Patio.**

Días	Madurez M	$\log(M)$	Cilindros	Calculada	Diferencia
1	864,685	2,937	375,372	388,809	3,58%
3	2034,371	3,308	499,957	495,918	0,81%
7	4502,851	3,653	629,748	595,384	5,46%
14	8308,570	3,920	652,673	672,073	2,97%
28	16751,554	4,224	754,449	760,309	0,78%

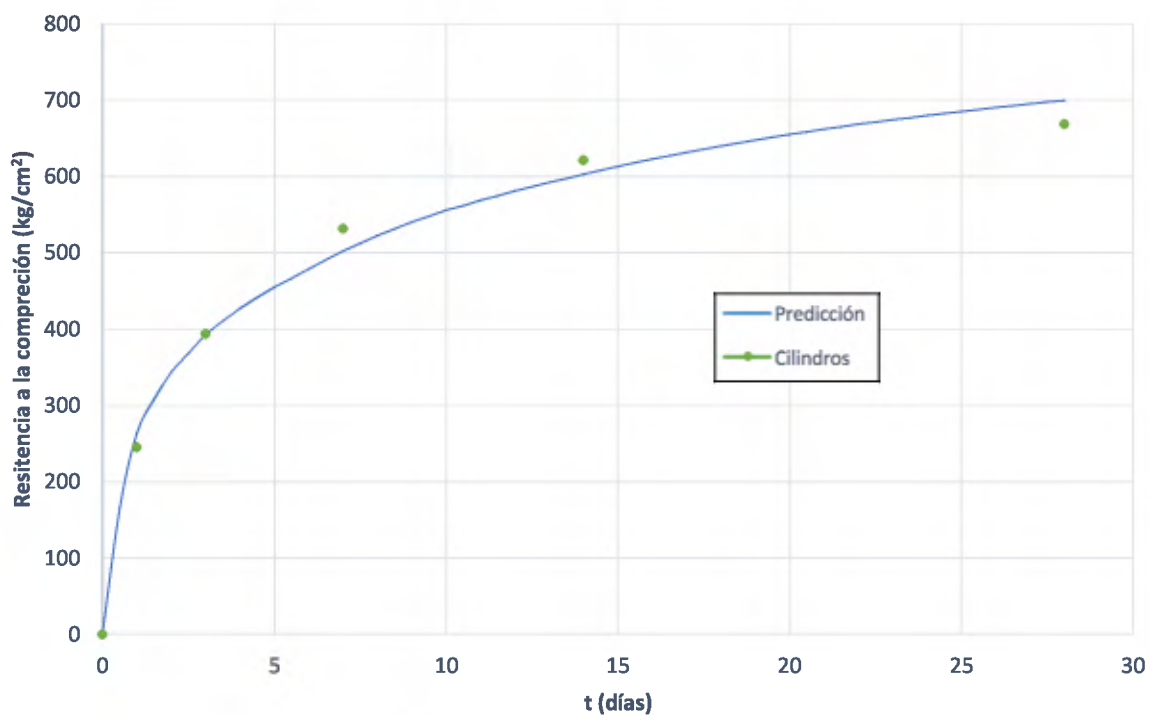


**Figura 4.23 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Patio.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

**Cuadro 4.7 Comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Patio.**

Días	Madurez M	log(M)	Cilindros	Calculada	Diferencia
1	650,344	2,813	245,374	263,571	7,42%
3	1696,488	3,230	393,581	392,487	0,28%
7	3839,364	3,584	531,768	502,301	5,54%
14	8113,095	3,909	621,165	602,895	2,94%
28	16652,493	4,221	668,846	699,578	4,59%



**Figura 4.24 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Patio.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

### 4.5.2 Comparación con respecto a los núcleos

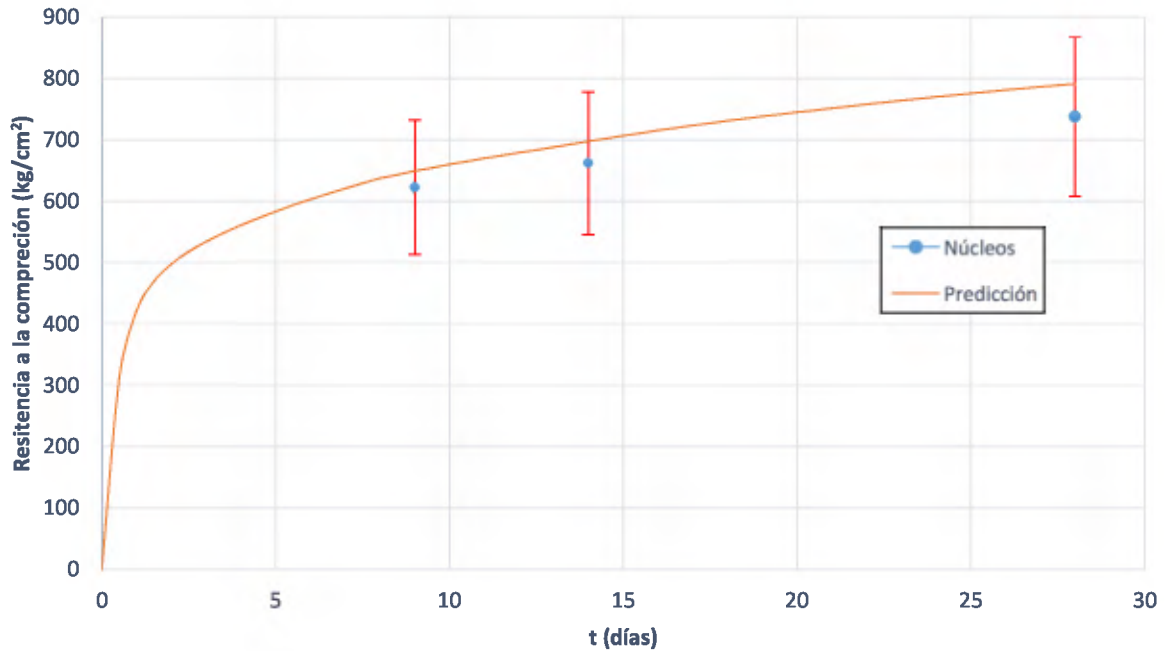
Para hacer una comparación entre los resultados obtenidos de los núcleos y los que predeciría el método de madurez, se aplicaron los modelos respectivos de madurez a los datos de temperatura y tiempo de los dispositivos que se colocaron en las vigas y se comparan con sus respectivos resultados de las resistencias reales de las pruebas a compresión de los núcleos extraídos presentados en la sección 4.1.

Dado a que la norma ASTM C42 pide que se los núcleos permanezcan en una bolsa plástica por al menos 5 días y además para sacar los núcleos el concreto tiene que haber obtenido suficiente resistencia las primeras fallas de núcleos fueron a los 7 días para la viga chorreada con CAD 700 y a los 9 días para la viga choreada con SCC 700. La demora de dos días más para SCC 700 fue gracias a problemas técnicos de la bomba de vacío a la hora de sacar los núcleos, dado a que el método de madurez puede hacer predicciones de resistencia a cualquier edad dentro de los 1 a 28 días, no hay ningún problema en obtener la resistencia a los 9 días.

A continuación, se presentan en las siguientes figuras y cuadros la comparación comentada anteriormente. En las gráficas se muestra en anaranjado la predicción del modelo y en azul los resultados de las pruebas de compresión de los núcleos.

**Cuadro 4.8 Comparación de resultados de ensayos de núcleos con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Laboratorio.**

Días	Madurez $M$	$\log(M)$	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )		Diferencia
			Núcleos	Predicción	
9	6371,030	3,804	622,56	649,49	4,33%
14	9061,199	3,957	662,03	697,94	5,42%
28	17866,346	4,252	737,65	791,32	7,27%

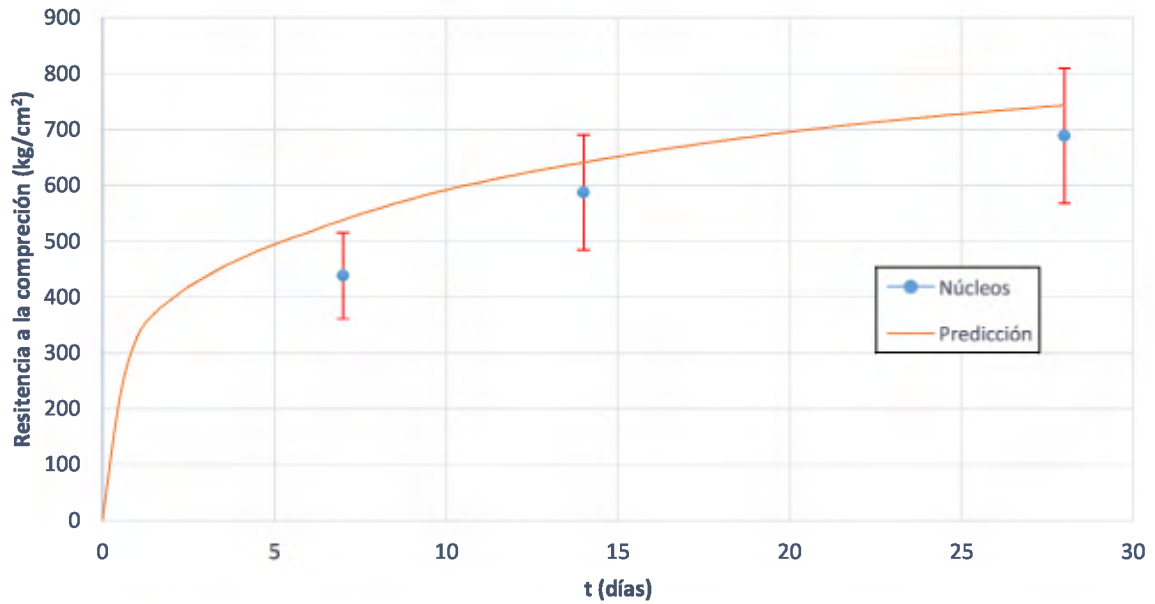


**Figura 4.25** Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Laboratorio.

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

**Cuadro 4.9** Comparación de resultados de ensayos de núcleos con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Laboratorio.

Días	Madurez M	log(M)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )		Diferencia
			Núcleos	Predicción	
7	4300,891	3,634	438,29	538,09	22,77%
14	8667,539	3,938	587,58	640,89	9,07%
28	17428,153	4,241	688,88	743,36	7,91%

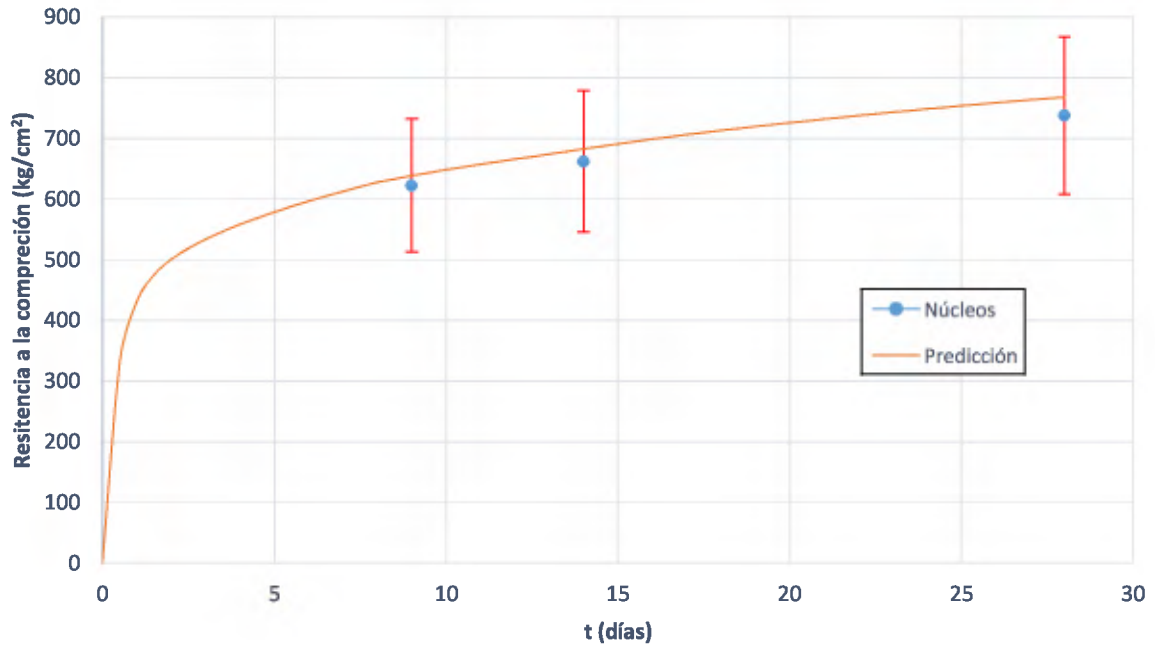


**Figura 4.26** Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Laboratorio.

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

**Cuadro 4.10** Comparación de resultados de ensayos de núcleos con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Patio.

Días	Madurez M	log(M)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )		Diferencia
			Núcleos	Predicción	
9	6371,030	3,804	622,563	638,831	2,61%
14	9061,199	3,957	662,031	682,928	3,16%
28	17866,346	4,252	737,659	767,922	4,10%

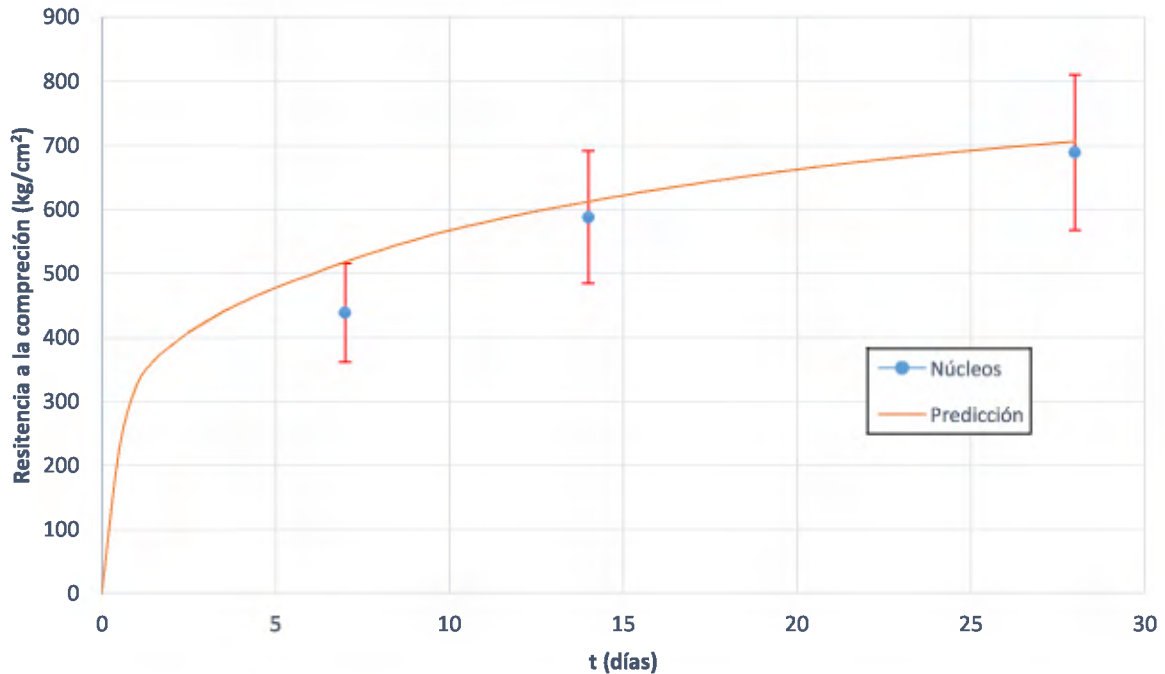


**Figura 4.27** Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de SCC 700 curados en el Patio.

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

**Cuadro 4.11** Comparación de resultados de ensayos de núcleos con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Patio.

Días	Madurez M	log(M)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )		Diferencia
			Núcleos	Predicción	
7	4300,891	3,634	438,295	517,563	18,09%
14	8667,539	3,938	587,589	611,783	4,12%
28	17428,153	4,241	688,886	705,699	2,44%

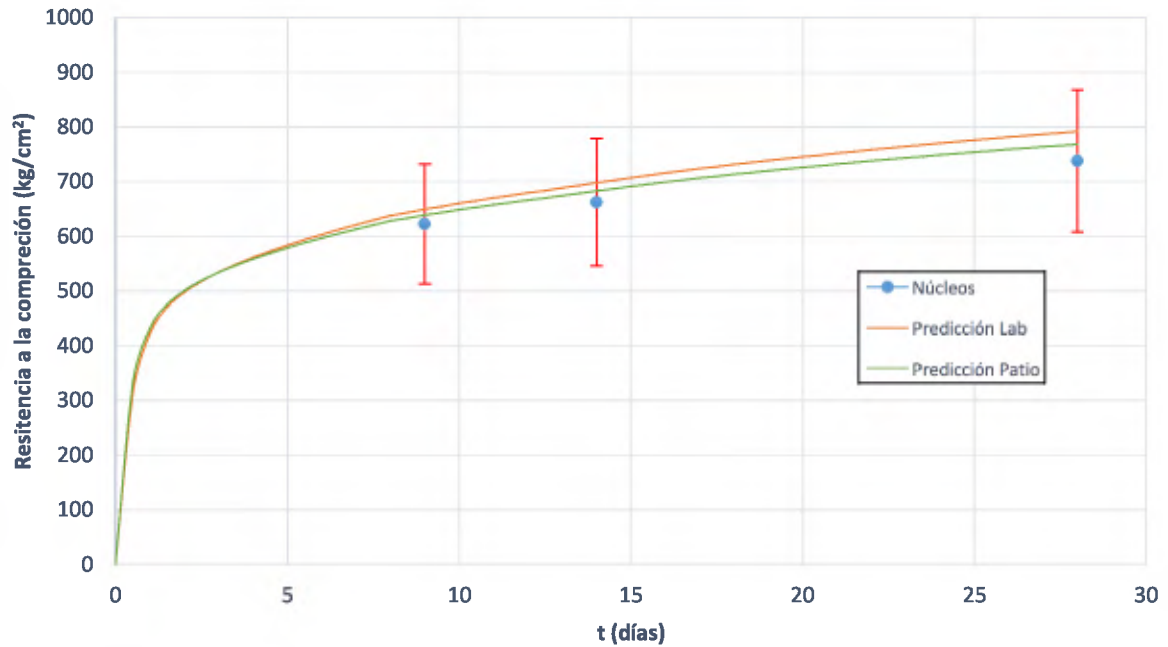


**Figura 4.28 Grafica de comparación de resultados de ensayos de compresión de concreto con respecto a la predicción del modelo de madurez para los datos de CAD 700 curados en el Patio.**

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

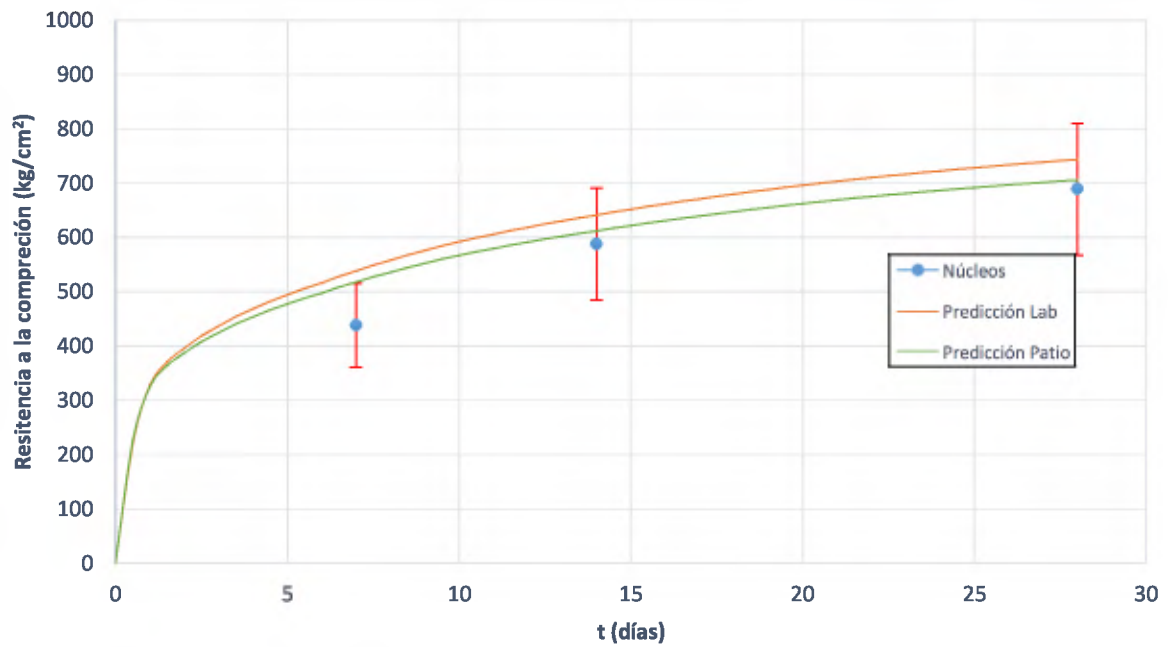
Compilando la información de los resultados anteriores se grafican las curvas de resistencias a la compresión del concreto de las vigas dadas por ambos modelos, el modelo calibrado con los cilindros en patio y el modelo calibrado con los cilindros de laboratorio. En las siguientes graficas se muestra en anaranjado los resultados de predicción de la resistencia del modelo calibrado con los datos de laboratorio y en verde los resultados de predicción de la resistencia del modelo de los cilindros curados con la viga. Finalmente se ve en azul los resultados de resistencia de los núcleos extraídos de la viga.





**Figura 4.29** Grafica de comparación entre ambos modelos de predicción y resultados de ensayos de núcleos para SCC 700.

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018



**Figura 4.30** Grafica de comparación entre ambos modelos de predicción y resultados de ensayos de núcleos para CAD 700.

Elaborado por: Andrés Carranza, 2018

### 4.5.3 Comparación entre modelos

Utilizando los mismos datos de temperatura y tiempo de los dispositivos embebidos en la viga de concreto, se calcula la diferencia entre las resistencias predichas de cada uno de los métodos de madurez, con ambas calibraciones. Dado a que el método de madurez utilizado pronostica resistencia del concreto cada 30 minutos, se buscara el punto con mayor diferencia entre ambos resultados, en ellos intervalo de tiempo calibrado, de 1 a 28 días. Además, de manera representativa se presentarán las diferencias en los puntos de tomas de dato que se puede llegar a comparar con otros los otros métodos, los cuales brindan resultados de manera discretizada. Por lo que en las siguientes tablas se mostrarán los resultados y desherencia de 1, 3, 7, 14 y 28 días. Ya que no se sabe cuál de los dos métodos brinda las predicciones más cercanas a la realidad, para convertir la diferencia en porcentual se utilizó como base el promedio de los resultados.

**Cuadro 4.12 Comparación entre las predicciones del modelo calibrado con cilindros curados en patio y cilindros curados en laboratorio, para SCC700.**

Días	Predicción de Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )		Diferencia
	Laboratorio	Patio	
1	421,8	431,6	2,3%
2	497,6	500,6	0,6%
7	620,8	612,7	1,3%
14	697,9	682,9	2,2%
28	791,6	768,2	3,0%
Max			3,0%

**Cuadro 4.13 Comparación entre las predicciones del modelo calibrado con cilindros curados en patio y cilindros curados en laboratorio, para CAD700.**

Días	Predicción de Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )		Diferencia
	Laboratorio	Patio	
1	327,9	324,9	0,9%
2	395,8	387,1	2,2%
7	538,1	517,6	3,9%
14	640,9	611,8	4,6%
28	743,4	705,7	5,2%
Max			5,2%

#### 4.5.4 Comparación general

Finalmente se comparará que tanto difieren entre si los distintos métodos de obtención de resistencia. Para esto se usó la edad con la mayor discrepancia entre los resultados de cada uno de los métodos.

**Cuadro 4.14 Matriz comparativa de la diferencia entre los distintos métodos utilizados para obtener la resistencia a la compresión del concreto para SCC 700.**

A B	Cilindros Lab.	Cilindros Patio	Núcleos	Madurez Lab.	Madurez Patio
Cilindros Lab.	$\frac{A - B}{A}$	6,7%	5,6%	1,1%	-
Cilindros Patio	7,2%	-	2,3%	-	3,5%
Núcleos	5,9%	2,2%	-	6,8%	3,9%
Madurez Lab.	1,1%	-	7,3%	-	3,0%
Madurez Patio	-	5,5%	4,1%	3,0%	-

**Cuadro 4.15 Matriz comparativa de la diferencia entre los distintos métodos utilizados para obtener la resistencia a la compresión del concreto para CAD 700.**

A B	Cilindros Lab.	Cilindros Patio	Núcleos	Madurez Lab.	Madurez Patio
Cilindros Lab.	$\frac{A - B}{A}$	8,2%	8,7%	5,4%	-
Cilindros Patio	7,5%	-	5,7%	-	6,9%
Núcleos	8,0%	5,4%	-	7,4%	3,5%
Madurez Lab.	5,7%	-	9,1%	-	5,2%
Madurez Patio	-	7,4%	4,1%	5,2%	-

*Nota: Se excluyen los resultados de núcleos a edades tempranas como lo recomienda el ACI*

## **4.6 Estudio de per-factibilidad del método en un entorno de producción de elementos prefabricados.**

Como parte del estudio se analizará si el método es viable para predecir la resistencia del concreto en un entorno de producción de elementos prefabricados. Se estudiará en este entorno en específico ya que, como mencionado anteriormente, sus procesos dependen en gran medida del conocer la resistencia del concreto. Para esto se utilizará los procesos y requisitos, facilitados por PC, de una línea de producción de su planta de vigas prefabricadas, lo cual brinda un caso real a estudiar. En este estudio se analizarán los aspectos técnicos y económicos en comparación con el método utilizado actualmente de falla de cilindros de concreto.

### **4.6.1 Aspecto técnico**

En general el método de madurez está respaldado por normas y reglamentos internacionales como ASTM y CBD 187, las cuales validan su uso en situaciones con ciertas características. Una de estas es que el proyecto debe tener las condiciones para dosificar las mezclas con gran precisión para asegurarse de la homogeneidad a lo largo del tiempo de las mezclas. También, se debe procurar que los cementos, agregados, agua y aditivos deben tener siempre las mismas características, cualquier cambio de estos, se deberá recalibrar el modelo. Finalmente, se debe mantener un curado adecuado en los elementos como lo estipula la norma ASTM C1074 y se debe contar con personal técnico calificado para efectuar las calibraciones y verificaciones, del modelo utilizado para hacer las predicciones de resistencia a la compresión del concreto.

Más adelante en el apartado de análisis y conclusiones se elaborará sobre este tema contemplando los resultados que se obtuvieron en el proyecto de graduación con respecto al método de madurez.

### **4.6.2 Costo anual del método de cilindros**

Para obtener el costo de utilizar el método destructivo de cilindros para obtener la resistencia, se debe primero encontrar la cantidad de cilindros que se deben de fallar. Como se comentó en el marco teórico, en general depende de cada proyecto específico la determinación de la cantidad de edades necesarias a muestrear, no obstante, en circunstancias normales se acostumbra a obtener la resistencia a 28 días y 2 o 3 otras edades más, las cuales varían según

los requerimientos del proyecto. Esto quiere decir que se requieren datos de resistencia de al menos 3 edades. Ya que la cantidad de cilindros requeridos depende de cada proyecto, el estudio de pre-factibilidad se basará en un caso real de producción de elementos prefabricados, en donde se utilizarán los datos de una línea de producción de vigas pretensadas producidas en planta de Prefabricado Pesado de PC, específicamente el estudio utilizará la cantidad de pruebas que realiza la compañía.

PC para las vigas pretensadas realiza un muestreo por cada 40m<sup>3</sup> a 7, 14 y 28 días y un muestreo por cada correa o línea de producción, la cual es de 4 m<sup>3</sup> en promedio, donde se requieren edades de 18 y 24 horas para el desencofrado. La producción diaria de elementos, con alguna cualquiera de estas mezclas, no es constante, pero tiene un promedio de alrededor de 130m<sup>3</sup> de concreto y como máximo de 260m<sup>3</sup> en su producción diaria. Por lo que se requieren 4 muestreos de edades 7, 14 y 28 por su volumen, y 33 muestreos de 18 y 24 horas, por línea de producción, diarios.

Tomando en cuenta PC acostumbra a hacer muestreos con cilindros de diámetro de 100mm debe de fallar 3 cilindros para 28 días según el ACI y las otras edades PC falla 2 cilindros para obtener promedio entre ambos resultados. Tomando esto en cuenta y la cantidad de muestreos, PC hace en promedio 160 cilindros diarios.

Para hacer cálculo del costo de los cilindros de concreto y sus fallas se utilizarán costos de contratar a una empresa especializada en fallar cilindros, dado a que este es un costo directo que se le puede aplicar a este método, sin tener que cuantificar costos indirectos, mantenimiento, costos parciales de mano de obra, espacio, equipo con varios usos, entre otros factores que le generan costos a la compañía en caso de que la falla de cilindros no fuera contratada. Es importante mencionar que este es solo un punto de comparación ya que hay factores que pueden hacer que los costos "reales" se vean afectados, tales como que los costos considerados son los precio de mercado, precio que incluye las ganancias de las empresas que realizan dichos trabajos, así que si dichas fallas fueran realizadas por PC, u otra compañía que ensaye sus propios cilindros, dichos costos pueden variar, pero al mismo tiempo hay otros factores tales como que PC no se especializa en fallar cilindros, por lo cual sus costos "reales" pueden ser mayores en comparación a lo de laboratorios especializados.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, el costo de estas fallas ronda alrededor de los ¢ 6.000 para cada cilindro en proyectos de bajo volumen de producción y alrededor de

€3.000 para proyectos que requieren gran cantidad de pruebas, esto sin tomar en cuenta el costo de transporte el cual para un proyecto que falla los cilindros en el sitio del proyecto no tendría estos costos. Con la cantidad de cilindros diarios calculados anteriormente, esto equivaldría a €640.000,00 diarios, tomando un costo intermedio de €4.000 por cilindro. Ya que este costo fue calculado por día de producción, se puede aproximar la producción anual con respecto a los días hábiles anuales, los cuales son alrededor de 260 días hábiles al año. Lo que llevaría a un costo aproximado de €166.400.000,00 anuales, utilizando el método de cilindros de concreto, con los procedimientos utilizados actualmente, en la producción de vigas pretensadas en planta de Prefabricado Pesado de PC.

#### **4.6.3 Costo anual del método de madurez**

Dado a que el método de madurez requiere de varios cilindros para su calibración y para su verificación mensual, el cálculo del costo de usar este método debe incluir todos estos distintos costos a través del año además de los costos de los dispositivos que se utilizan diariamente. Para esto se utilizará lo estipulado en el Anexo C en donde establece un procedimiento recomendado, contemplando algunas normas, recomendaciones del fabricante y la breve experiencia con los dispositivos utilizado en este proyecto de graduación.

Por recomendación de los técnicos de Giatec se debe hacer una calibración semestral mínima, una calibración en cada cambio de diseño de mezcla y una verificación mensual. Además, dentro de esta guía se recomienda que igual se sigan haciendo los cilindros a cada 40m<sup>3</sup>. Finalmente, la cantidad de dispositivos utilizados por línea de producción recomendada por el fabricante es de una, pero dado a que en el proyecto de graduación se tuvo algunos dispositivos que fallaron se recomienda agregar dos para tener redundancia por si alguno falla. Dado que esta última recomendación no solo dobla la cantidad de dispositivos a utilizar en el proyecto, y además con experiencia con los dispositivos se puede reducir la cantidad de fallas, se estudiarán ambos casos. Contemplando el primer caso en donde se utiliza un dispositivo en el último elemento choreado se utilizarían 33 dispositivos diarios y el otro caso donde se utiliza uno en el primer elemento choreado y otro en el último elemento choreado de cada línea de producción se utilizarían 66 dispositivos diarios.

Para el cálculo de costos se utilizará la modalidad SmartPrecast de la compañía Giatec, el cual es el mismo dispositivo que se realizaron las pruebas, con la diferencia que la caja con la batería, memoria y transmitir se puede reutilizar. Este dispositivo viene con 3 termómetros

extra por lo que se puede utilizar 4 veces por cada uno. El costo que brinda Giatec es de \$120 o alrededor de ₡68 400,00 cada uno al tipo de cambio ₡570 por cada \$1.

**Cuadro 4.16 Costo diario con el método de madurez para el primer caso.**

	Costo/und	Cantidad	Costo
SmartPrecast	CRC 68 400,00	8,25	CRC 564 300,00
Cilindros cada 40m3	CRC 4 000,00	28	CRC 122 000,00
		<b>Total:</b>	<b>CRC 676 300,00</b>

**Cuadro 4.17 Costo diario con el método de madurez para el primer caso.**

	Costo/und	Cantidad	Costo
SmartPrecast	CRC 68 400,00	16,5	CRC 1 128 600,00
Cilindros cada 40m3	CRC 4 000,00	28	CRC 122 000,00
		<b>Total:</b>	<b>CRC 1 240 600,00</b>

Para cada calibración de mezcla, el método de madurez requiere el uso de 18 cilindros de concreto, curados en laboratorio siguiendo la norma ASTM C192/C192M y ASTM C511. De los cuales 3 deben de diámetro de 150mm y deben tener el sensor el cual debe ser colocado como recomienda su fabricante, los restantes 15 se harán con cilindros de 100mm de diámetro. Estos se fallarán de 3 en 3 cilindros para cada edad, a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, cumpliendo con las especificaciones C39/C39M. (ASTM International, 2017)

Por lo que cada calibración requiere de al menos 15 cilindros de 100mm, 3 cilindros de 150mm y 3 dispositivos inalámbricos SmartRock2 para la medición de temperatura y tiempo. Mientras que, para la verificación del modelo, los técnicos de Giatec recomiendan que se fallen 6 cilindros de 100mm y un cilindro de 150mm con dispositivo embebido para la medición de temperatura y tiempo.

**Cuadro 4.18 Costo de calibración para método de madurez.**

	Costo/und	Cantidad	Costo
Dispositivos	CRC 17 100,00	3	CRC 51 300,00
Falla de cilindros	CRC 4 000,00	18	CRC 72 000,00
<b>Total:</b>			<b>CRC 123 300,00</b>

**Cuadro 4.19 Costo de verificación para método de madurez.**

	Costo/und	Cantidad	Costo
Dispositivos	CRC 17 100,00	1	CRC 17 100,00
Falla de cilindros	CRC 4 000,00	6	CRC 24 000,00
<b>Total:</b>			<b>CRC 41 100,00</b>

Si se toma el caso ideal donde no se varia el diseño de mezcla, y se logra mantener los estándares deseados de homogeneidad, se debe hacer por lo menos 2 calibraciones, 10 verificaciones anuales por mezcla y 260 días de producción anuales se obtiene que el costo anual del método para la opción de utilizar un solo dispositivo por línea de producción es de alrededor de ₡170,1 millones anuales, para el segundo caso de utilizar dos dispositivos por línea de producción el costo es de ₡322,8 millones anuales.

#### 4.6.4 Comparación entre costos

Tomando en cuenta los solo costos contabilizados en la sección anterior, se comparan los costos de obtener la resistencia de cilindros mediante el método convencional de falla de cilindros de concreto con los costos de utilizar el método de madurez, se obtienen la siguiente tabla.

**Cuadro 4.20 Diferencia entre los costos esperados de utilizar ambos métodos.**

Método	Costo	Diferencia
Actual de Cilindros	₡166 400 000,00	-
Madurez Caso 1	₡176 085 011,00	5,8%
Madurez Caso 2	₡322 803 011,00	94,0%



## **CAPITULO 5 ANÁLISIS Y RESULTADOS**

## **5.1 Análisis de recolección de datos**

### **5.1.1 Calibración**

#### **5.1.1.1 Falla de cilindros**

Las resistencias obtenidas de los cilindros de concreto muestran la tendencia esperada del historial de endurecimiento del concreto. Como se aprecia en el Anexo B la incertidumbre de resistencia a la compresión de los cilindros de concreto, es lo cual concuerda con lo calculado en la certificación de calibración de falla de la máquina de ensayos, otorgado por LANNAME, la cual se puede ver en el Anexo B. Dado a que el equipo utilizado este certificado y se siguieron los procedimientos de sus respectivas normas, se puede afirmar que los resultados obtenidos son representativos a la resistencia del concreto de la tanda de mezclado respectiva.

Ya que los datos de resistencia obtenidos de los cilindros fallados para el proyecto de graduación son confiables se compararán con los datos brindados por PC en la sección 4.1.3 de su análisis de planta trimestral, para verificar si son representativos al concreto mezclado en PC. Haciendo esta comparación se obtienen los resultados de las Figuras 4.1 y 4.2. En donde se puede ver que los resultados de tanto los cilindros curados en patio, los curados el laboratorio y los núcleos de ambas mezclas están por debajo de los rangos promedio. Esto concuerda con la baja resistencia del cemento reportada por los proveedores de cemento de PC. Pero podemos ver que, aunque la resistencia fue menor al promedio de ese mes, en ambas mezclas los resultados de resistencia a 28 días si cumplen con el  $f'c$  esperado de 700 kg/cm<sup>2</sup>. También es importante mencionar que resistencias tales como los de 28 días para los cilindros de CAD700 curado en patio, si brindaron resistencias menores al  $f'c$ .

Algo primordial a considerar es que, aunque los  $f'c$  se cumplieran, sigue habiendo un cambio de resistencia de alrededor de un 15% entre los promedios de resistencia trimestrales y una medición aislada. Contemplando que el único cambio que sufrió la mezcla fue un cemento con menor resistencia, esto denota lo susceptible a cambio de resistencia, en cambio de algún material en la mezcla. Esto demuestra que si hay variación no deseada en los materiales del diseño de mezcla. Por lo que cambios así, serían la causa de que las predicciones utilizando el método de madurez no sean precisas. Esta situación demuestra es importante investigar sobre la variancia en los elementos que componen la mezcla y ver estos como afectan las mediciones de madurez, y de esta manera deliberar si se puede restringir estos cambios en los insumos

de la mezcla del concreto a rangos aceptables, para obtener la confianza necesaria del método de madurez.

#### 5.1.1.2 Sensor de madurez

Los resultados obtenidos por los sensores SmartRock2 embebido en los cilindros, mostrados en la sección 4.2, muestran los resultados del historial de temperatura de los 28 días de monitoreo la tendencia interesante. Primero, como esperado se puede notar un cambio de temperatura cíclico diario el cual se da por el cambio de temperatura ambiental durante el día, y de la misma manera vemos como para ambas mezclas las curvas de los cilindros curados en patio son afectadas más por el ambiente, ya que presenta temperaturas más altas durante el día que los cilindros en curados sumergidos en agua y bajo la sombra. Esta diferencia en temperatura entre si conlleva a que se manifieste un cambio en la madurez calculada. Dado a que la madurez es el área debajo de la curva de temperatura-tiempo y los cilindros curados en patio manifiestan temperaturas más altas, la pendiente de la curva de madurez debería ser más pronunciada para los cilindros curados en patio que los sumergidos, lo cual es lo observado en las figuras 4.11 y 4.12. Esto lleva a contemplar que puede haber una diferencia significativa si se calibra el método utilizando cilindros sumergidos como lo pide ASTM 1074 o si se sigue la recomendación de los fabricantes de SmartRock2 donde recomiendan tener los cilindros en la misma situación de curado que el elemento a predecir la resistencia.

También es interesante comparar las temperaturas iniciales, ya que en las primeras 24 horas, antes de que los cilindros fuesen desencofrados, ambos grupos de cilindros se curaron bajo las mismas condiciones. Además, en este rango de tiempo es donde el concreto presenta su mayor pico en temperatura dado por la reacción exotérmica inicial. Considerando estos dos factores, los resultados de los cilindros con SCC700 muestran la tendencia esperada, en donde la temperatura aumenta drásticamente de menos de 30C° a más de 45C°. Es de importancia mencionar que el pico de temperatura se dio a altas horas de la noche en donde la temperatura ambiente está en uno de sus puntos más bajos, lo que demuestra que este cambio de temperatura es independiente de su ambiente, por lo que más bien consecuencia a la temperatura de hidratación. Por el otro lado, los resultados obtenidos de los dispositivos para el CAD700 no muestran esta tendencia de manera tan clara. Estos datos de temperatura inicial, aunque si ocurren llega a temperaturas alrededor de 30C° los cuales, si se compara con los cambios de temperatura sufrido por los cilindros en patio a edades en donde está expuesto al

sol entre otros factores ambientales, diariamente presenta picos de temperatura mayores a 35°C. Otro indicador, de baja temperatura de reacción temprana se puede observar claramente el punto a las 24 horas donde se desencofran los cilindros, en este momento los datos de temperatura, de los cilindros de patio, aumentan considerablemente y los datos de temperatura, de los cilindros que se sumergen, bajan. A diferencia de lo comentado del SCC700, los datos del CAD700 si muestra que estas temperaturas iniciales si fueron afectadas principalmente por su entorno y no tanto por su temperatura de hidratación inicial. Esto posiblemente es una manifestación de la baja resistencia del cemento pronosticada por los proveedores de cemento a Productos de Concreto, el cual por alguna razón tuvo mayor efecto en la mezcla para el CAD700. De la misma manera también concuerda que las resistencias de CAD700 fueron los resultados más bajos en comparación los esperados. Con estos resultados lleva a especular que el elemento de CAD700 no se desoyó su madurez adecuadamente.

### **5.1.2 Viga de concreto**

#### **5.1.2.1 Falla de núcleos**

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión obtenida de los núcleos mantienen la misma tendencia que los resultados de los ensayos de cilindros, ya que dan resultados menores al promedio, pero dentro de lo esperado. Es de esperar que los ensayos de núcleos den resultados menores, ya que el procedimiento para obtener los núcleos crea micro fracturas, las cuales debilitan el espécimen, esto es reconocido por el ACI214.4R-03 en donde contempla que si los ensayos de núcleos exceden con 0.85f<sub>c</sub> están cumpliendo con la resistencia necesaria. (Comité ACI 214, 2003) Por lo que las resistencias a 28 días de los núcleos cumplen con lo normado ya todos los resultados exceden 0.85f<sub>c</sub> el cual en este caso sería 595kg/cm<sup>2</sup>. Esta norma no contempla factores de reducción de la resistencia a otras edades que no sean a 28 días, pero si se usa el mismo criterio podemos ver que en general los resultados de resistencias de los núcleos son similares a los resultados de resistencia de los cilindros. Cabe a resaltar que el primer ensayo a 9 días para CAD700, obtuvo resultados considerablemente bajos ya que fueron menores al 85% de su contraparte en los cilindros de concreto, lo cual es de esperar ya que en esta misma norma no recomienda usar el método de núcleos a edades menores de 14 días ya que el concreto puede no tener las propiedades necesarias para resistir el proceso de extracción de núcleo, por lo que sus resultados pueden dar más bajos de los esperados.

### 5.1.2.2 Sensor de madurez

Los resultados obtenidos por los sensores SmartRock2 embebido en las vigas, mostrados en la sección 4.2 muestran en el historial de temperatura de los 28 días de monitoreo una tendencia similar a lo comentado en la sección 5.1.1.2 con ciertas diferencias. Primero, como esperado se puede notar que se tiene el mismo cambio de temperatura cíclico diario causado por el cambio de temperatura ambiental durante el día. Si se compara con los datos de temperatura de los cilindros, en ambos casos se puede distinguir que los picos de temperatura diarios no son tan grandes como los curados en patio, pero son más grandes que los datos de los cilindros sumergidos. Esto se da ya que las vigas al estar expuestas a la intemperie al igual que los cilindros curados en patio, pero al ser elementos masivos el efecto en su temperatura es menor.

En términos de temperatura inicial, es claro que se dan temperaturas mucho más altas que las temperaturas iniciales de los cilindros. Esto se da porque la temperatura de hidratación inicial creada por la reacción exotérmica del concreto tiene una relación área/volumen mucho menor, en otras palabras, por ser más masivo la pérdida de calor es mucho más lenta que la de un cilindro. De igual manera se debe resaltar que las temperaturas de hidratación inicial muestran la misma tendencia que en los cilindros, en términos de que la temperatura máxima medida por el CAD700 es menor a la temperatura máxima medida del SCC700. Esta diferencia de temperatura refuerza los comentado anteriormente, donde se comentó que la baja resistencia del cemento pronosticada por los proveedores de cemento a Productos de Concreto tuvo un gran impacto en resistencias de la mezcla final de CAD700, los cuales efectivamente dieron resistencias más bajas, en los cilindros, en comparación las esperadas.

Es de importancia comentar que hubo pérdida de información por 10 horas en uno de los dispositivos de la viga de SSC, dado a que en todas las mediciones contaban con redundancia se utilizaron los datos del otro sensor para completar la información. Este error se dio por el mal manejo del equipo, en donde fue desconectado por uno de los operarios, mientras acomodaba los cables para sacar los núcleos. Este acontecimiento más que todo revela que para el uso de estos dispositivos se debe invertir en entrenar al personal para el uso de este nuevo método y así reducir errores. Lo cual puede llegar a significar tener o no tener que colocar dos dispositivos por redundancia.

## **5.2 Análisis de resultados de calibración**

### **5.2.1 Modelo**

Los cuatro modelos obtenidos en la sección 4.4 muestran una tendencia lineal a la resistencia a la compresión con respecto al logaritmo de la madurez. Esta tendencia en el caso de ambos modelos para el SCC700 tiene una tendencia casi perfecta mayor a  $R^2=0,99$ , el cual demuestra que este modelo representa muy bien los datos muestreados. De la misma manera los modelos para CAD700 también muestran que sus tendencias lineales tienen resultados con  $R^2$  alto, con ambos valores siendo de 0,979.

Si se comparan los resultados de los modelos calibrados con los cilindros curados en el patio junto la viga y los resultados con los cilindros curados sumergidos en agua y en sombra, se puede notar que, en ambos casos, aunque las predicciones de resistencia son parecidas, la resistencia predicha por el modelo curado en patio es menor. Además, en la sección 4.5.2 se denota que los modelos calibrados con los datos de los cilindros en patio tienen porcentajes de error menores con respecto a los resultados obtenidos de los núcleos. Esto concuerda con lo recomendado por los técnicos de Giatec, en donde recomiendan hacer la calibración con los cilindros curados de la misma manera en la cual el elemento luego va a ser curado. (Giatec Scientific, 2017) Lo cual, ya que la madurez depende de la temperatura interna y cambios climáticos tienen efecto sobre la temperatura interna, es un punto importante por considerar. De igual manera, es importante recordar lo mencionado en el marco teórico, que la norma ASTM C1074 que regula el método de madurez para estimar resistencia del concreto, en su procedimiento específicamente menciona que el curado debe ser sumergido, o en cámara húmeda como estipulado en la norma C511.

### **5.2.2 Limitaciones del modelo**

Aunque los resultados de curva de calibración de resistencias y sus tendencias lineales tengan  $R^2$  muy cercanos a 1, los resultados tienen ciertas limitaciones. Una de estas restricciones es que los modelos se limitan a obtener valores dentro del rango del tiempo usados en su calibración, para los modelos planteados en este proyecto entre 24 horas a 28 días. Otra limitante, nace del uso de logaritmo para encontrar la tendencia lineal. Uno de los problemas de utilizar la ecuación (3)  $S = A + B \log(M(t,T))$  es que a edades muy tempranas donde la madurez es menor a 1 se obtienen valores negativos, lo cual es un resultado ilógico. También,

la naturaleza de la curva de resistencia del concreto con respecto al tiempo es que a edades muy altas el concreto llega a un estado asintótico donde la resistencia deja de crecer, por lo que el uso de logaritmo, aunque bien reduce su crecimiento a lo largo del tiempo no tiene este comportamiento asintótico. Esto causa que en el caso de los modelos calibrados en este proyecto valores de resistencia para edades mayores a 28 días continúan creciendo a tasas más rápidas de las esperadas.

Por naturaleza del método de madurez cada modelo se calibra para un diseño de mezcla por lo que no es válido para otras mezclas de concreto. Por esto y lo mencionado anteriormente los modelos obtenidos en este proyecto de graduación, no deben ser utilizados para predecir resistencia de concreto en otro proyecto. Para cada proyecto se debe calibrar el modelo en donde su calibración tome en cuenta, tanto los tiempos de importancia a los cuales se ocuparán la resistencia y utilizar su respectiva mezcla en todo su proceso.

## **5.3 Comparación entre los distintos métodos de obtención de la resistencia**

### **5.3.1 Comparación con respecto a los cilindros**

En primera instancia es importante comentar que, dado a que el método utiliza los cilindros de concreto como punto de calibración, su precisión está fuertemente ligada con la precisión del método de cilindros para obtener la resistencia del concreto. Con la pequeña diferencia que al tomar los datos de temperatura directamente del elemento, el método de madurez si es susceptible a detectar discrepancias, tales como problemas en el curado, segregación, contaminación del concreto entre otros problemas, mientras que los cilindros de concreto al ser un elemento separado del elemento en cuestión, no hay forma que este manifieste los mismos problemas que se pueden dar después del mezclado por lo que finalmente el método de cilindros es un método de obtención de la resistencia del cilindro y no de los elementos de real interés. De manera que el método de madurez brinda mediciones directas, individuales y dirigidas hacia al elemento específico.

Además, se debe contemplar el mayor beneficio del método de madurez no viene de ser el método más preciso, sino su uso para optimizar los procesos ligados a conocer la resistencia del concreto. Muchas de sus ventajas nacen de su naturaleza para poder predecir la resistencia del concreto, en cualquier momento y poder revisar este dato todas las veces que se desee

con resistencias actualizándose cada 30 minutos (en el caso de SmartRock2). Por lo que brinda la información necesaria para desencofrar, tensar o desapuntalar antes, ahorrando tiempo en su producción. En comparación si se quisiera tener la misma función utilizando cilindros de concreto, se ocuparía realizar una cantidad exorbitante de cilindros para poder hacer un ensayo cada media hora, lo cual tendría costos muy elevados y se desperdiciaría mucha cantidad del concreto solo en ensayos. Otro aspecto importante por tomar en cuenta es que el dispositivo de medición se puede colocar prácticamente en cualquier lugar de la pieza, esto quiere decir que se puede colocar en puntos críticos para ser todavía más rigurosos de que se está obteniendo la resistencia deseada. Estos beneficios que brinda el método de madurez se convierten en términos de ahorro de tiempo, mano de obra, maquinaria, espacio entre otros costos factores atribuidos al optimizar un proceso.

### **5.3.2 Comparación con respecto a los núcleos**

La utilización de núcleos de concreto para obtener la resistencia es un método que tiene la ventaja de que al ser parte del elemento al cual se está obteniendo la resistencia este contempla todo el proceso de curado entre otros factores que pueden afectar la resistencia. De igual manera el método tiene el problema que el proceso de obtención de los núcleos crea microfisuras que debilita el concreto de la muestra, alejándose de la resistencia que tiene el elemento sin estas perturbaciones. También, se debe considerar que al extraer los núcleos se está debilitando estructuralmente el elemento, lo cual conlleva a generar problemas de resistencia global, por lo que muchas veces se debe hacer un proceso de reparación del elemento. Estos dos inconvenientes no son problemas que presenta el método de madurez. Además, igualmente que los cilindros, tiene la limitación que se tendría que tener una cantidad muy grande de cilindros y ensayos para replicar los resultados cada media hora del método de madurez.

En términos de la comparación entre los resultados obtenidos se puede notar que el método de madurez tiene resultados muy similares con una tendencia a que los núcleos tienen resistencias menores. Lo cual es de esperar que los ensayos de núcleos den resultados menores, por lo mencionado anteriormente que el proceso de extracción debilita los especímenes. Contemplando esto, el ACI214.4R-03 reconoce que la resistencia a los 28 días puede tener desviaciones de  $0,85f_c$  están. Esta norma no contempla factores de reducción de la resistencia a otras edades que no sean a 28 días, pero si se usa el mismo criterio podemos



ver que en general los resultados de resistencias de los núcleos son similares a los resultados de resistencia de los predichos por el método de madurez. Como mencionado anteriormente, hubo un ensayo a 9 días para CAD700, el cual dio resultados considerablemente bajos ya que fueron tuvieron una discrepancia de más de 20% con respecto la predicción de madurez, lo cual es de esperar ya que el ACI214.4R-03 no recomienda usar el método de núcleos a edades menores de 14 días ya que el concreto puede no tener las propiedades necesarias para resistir el proceso de extracción de núcleo, por lo que sus resultados pueden dar más bajos de los esperados. También se puede denotar, que en ambos casos la predicción de la resistencia utilizando el método de madurez calibrado con los cilindros curados en patio se acerca más a las resistencias obtenidas de los núcleos.

### **5.3.3 Comparación con entre curado en laboratorio y curado en patio**

Como se comento anteriormente en la sección 5.1.1, en términos de los historiales de temperatura se tiene una tendencia similar cíclica dada por el cambio de temperatura ambiental, pero los cilindros curados en patio son afectados mucho más por el cambio de temperatura ambiental. Esto conlleva a diferencias en las curvas de madurez, las cuales se manifiestan como pendientes más pronunciadas en las curvas de los cilindros de patio. Esto lleva a que después de calibrar el modelo, las predicciones de resistencia con los cilindros de patio son menores a las predicciones de resistencia con los cilindros curados sumergidos. Como demostrado en los cuadros 4.12 y 4.13, en donde la diferencia máxima, entre las predicciones ambos modelos, es de 3,0% para los modelos de SCC700 y 5,2% para los modelos de CAD700. Dado a que las resistencias obtenidas en los ensayos de núcleos dieron más bajas, en comparación las predicciones hechas por el modelo calibrado con los cilindros curados en patio se asemejan más a los núcleos. Lo cual se puede observar tanto en las figuras 4.29 y 4.30.

Es importante reconocer que, aunque los resultados del modelo calibrado con cilindros de patio se asemejen más a los datos obtenidos de los núcleos, esto no quiere decir que sea el modelo que se asemeje más a la resistencia real del elemento, ya que es normal los resultados de los ensayos de núcleos den menores a la resistencia real del elemento. Por lo, aunque se sabe que el método genera buenas predicciones de resistencia, hace falta investigación para identificar cuál de los dos o que curado crea modelos con mayor grado de predicciones.

## **5.4 Guía para el uso del método de madurez para predecir resistencia del concreto a tiempo real.**

En el Anexo C se propone una guía para el uso del método de madurez para predecir las resistencias del concreto a tiempo real. Esta sección busca hacer un compendio pequeño de métodos recomendados para el uso de este sistema, acompañado por recomendaciones personales por los resultados obtenidos en la investigación para el uso del método de madurez de un diseño de mezcla.

Uno de los temas importantes que se mencionados es las edades recomendadas para la calibración de los modelos. Donde contempla que, aunque las edades recomendadas por ASTM son unas, estas edades si pueden cambiar y deben cambiar según el proyecto, ya que el rango de edades en la calibración son el rango de edades a las que el método puede hacer predicciones. (Giatec Scientific, 2017) Por ejemplo, en PC requieren conocer resistencias a edades tempranas como a las 18 horas para el desencofrado de las piezas pretensadas, la calibración debe incluir este rango de edades. Se debería muestrear 18 horas y 28 días con otros 3 muestreos, como mínimo, a edades intermedias cercanas a edades importantes. Pero además hay que tomar en cuenta que si se quiere optimizar los procesos y se tiene previsto que en algunos casos podría desarrollarse la resistencia necesaria antes de las 18 horas, se debe contemplar esto por lo que la calibración debería tener un punto a una edad más temprana, ya que osino los resultados antes de las 18 horas no sean válidos y no se podrá hacer un desencofrado temprano, y así poder tener ahorro de tiempo. Por lo que se recomienda el caso de PC hacer la calibración con edades cercanas a 12 horas, 18 horas, 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días. Agregando una edad previa al desencofrado normal para tener la opción de desencofrar a edades tempranas si ya se alcanzó la resistencia deseada.

Con respecto a las ecuaciones utilizadas para el cálculo de madurez se recomienda utilizar las ecuaciones de Nurse-Saul ya que fue la utilizada en el proyecto, pero sus importante reconocer que la ecuación de Arrhenius también esta validado por ASTM C174 para la obtención de la madurez en el instante en cuestión. También la guía recomienda, el uso de una tendencia lineal en el comportamiento logarítmico de la madurez y así encontrar los coeficientes A y B de la ecuación (3) mostrada en el Marco Teórico, por la precisión de la tendencia lineal obtenida en los modelos del proyecto.

En términos de colocación de los dispositivos, se recomendó que se debe seguir las recomendaciones del fabricante, agregando que se debe de tener alguna protección extra al cable y caja para que no estén expuestos y evitar problemas. Es importante que los dispositivos sean debidamente clasificados, y probados de antemano que son detectados por la señal Bluetooth y emparejados con el dispositivo de recolección de datos. Finalmente, se recomienda el método reusable por reducción de costos.

Con respecto a la frecuencia de colado se recomendó que, por el momento, hasta que se haga más investigación, que se utilicen dos dispositivos de línea de producción. Eventualmente se podría utilizar solo un dispositivo por línea de producción, pero se tendría que verificar la confianza en los dispositivos, para no tener que contar con la redundancia.

Para continuar usando el método de madurez se recomienda recalibrar la mezcla si se efectúan cambios en el diseño de mezcla, ya sea cambio en las cantidades o en las propiedades físicas de agregados, aditivos, cementos o agua. Cada mes después de haber calibrado se debe de hacer una verificación, si la verificación da satisfactoria no se tiene que recalibrar, de lo contrario se recalibra ese mes. Esta verificación recomienda Giatec que sea con un cilindro con sensor de madurez y 6 cilindros que se fallen en parejas a edades críticas para el proyecto. De igual manera se recomienda que después de 6 meses de haber calibrado se debe recalibrar el método de madurez.

La guía también comenta que no todo proyecto tiene las características necesarias para el uso del método de madurez para estimar la resistencia del concreto. Una de estas es que el proyecto debe tener las condiciones para dosificar las mezclas con gran precisión para asegurarse de la homogeneidad a lo largo del tiempo de las mezclas. También, se debe procurar que los cementos, agregados, agua y aditivos deben tener siempre las mismas características, cualquier cambio de estos, se deberá recalibrar el modelo. Finalmente, se debe mantener un curado adecuado en los elementos como lo estipula la norma ASTM C1074 y se debe contar con personal técnico calificado para efectuar las calibraciones y verificaciones del modelo utilizado para predecir de resistencia a lo compresión del concreto.

Finalmente se recomienda que antes que se utilice el método de madurez se debe investigar cual es efecto en la variación de los insumos en la mezcla con respecto a la confiabilidad del método de madurez. Se debe calcular los rangos de variación permitida de la variación de las características de los insumos.

## **5.5 Estudio de prefactibilidad del método para un elemento prefabricado por Productos de Concreto S.A.**

Como parte del estudio de prefactibilidad se contemplaron algunos factores que atribuyen al costo del uso del método de madurez. Estos mostraron que el costo entre el método de madurez y el costo del utilizar el método actual de cilindros de concreto para la obtención de la resistencia del concreto, tienen costos muy similares, con el costo de madurez siendo alrededor de 5,8% más caro. Contemplando que se utilizaron aproximaciones para muchos de los cálculos de estos costos, un 5,8% muestra un costo casi idéntico. Es importante mencionar que para que el costo del método de madurez sea competitivo y tenga costos similares al de los cilindros de concreto, el dispositivo debe brindar la confianza necesaria para utilizar un solo dispositivo por muestreo. De lo contrario, si se debe tener redundancia en la recolección de datos, esto llevaría a que los costos sean de alrededor de 94% mayores a los de utilizar cilindros de concreto. Por lo que es importante asegurar que se tenga la confianza necesaria para utilizar un solo dispositivo.

Es de gran importancia mencionar que el costo, de los dispositivos de medición de temperatura y tiempo para el método de madurez, utilizado en el análisis, fue obtenido de cotizaciones por compras pequeñas, por limitaciones del proveedor en cuanto a los requerimientos técnicos específicos de la muestra para el estudio; a diferencia del costo de los cilindros donde sí se buscó un precio considerando el gran volumen de fallas. Por lo que hay que considerar que, en una situación de compras a un mayor volumen, por medio de negociaciones u otros proveedores, se pueden llegar a reducir significativamente los precios de los dispositivos por la economía en escala del mercado. Dado a que el costo de los dispositivos es la mayor parte del costo del uso del método, esto llevaría a reducir los costos generales considerablemente.

En términos de factibilidad técnica de uso del método de madurez para la predicción de la resistencia del concreto, se debe considerar que este es un método altamente normado e investigado que se utiliza alrededor del mundo por su confianza. De igual manera se debe recordar que el método utiliza los cilindros de concreto como punto de calibración, por lo que su precisión está fuertemente ligada con la precisión del método cilindros para obtener la resistencia de concreto. Pero también hay que rescatar que el método de madurez, por su naturaleza, brinda mediciones directas, individuales y dirigidas hacia al elemento específico. De igual manera se debe tomar en cuenta que el atentado más grande de la confiabilidad del

método de madurez nace de no poder asegurar una homogeneidad a lo largo del tiempo de las mezclas de concreto. Tomando en cuenta esto entre otras recomendaciones estipuladas en la guía el método de madurez brinda excelentes predicciones de resistencia a la compresión del concreto.

Finalmente, se debe contemplar que este estudio de prefactibilidad realizado en este proyecto de graduación no cuantifico muchos otros aspectos y beneficios que conlleva utilizar el método de madurez. Algunos de estos beneficios son difíciles de cuantificar, como lo es el ahorro de tiempo, mano de obra, maquinaria, espacio entre otros costos factores atribuidos al optimizar los procesos ligados a conocer la resistencia del concreto a tiempo real. Mientras que otros beneficios, como la comodidad de poder realizar las mediciones de resistencia con el celular, computadora por medio de Bluetooth o automatizar ciertos procesos, son casi imposibles de cuantificar monetariamente.

## **CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 6.1 Conclusiones

- El método de madurez es una solución técnicamente viable. Ya que predijo la resistencia del concreto con gran precisión, teniendo una desviación máxima de 9.1% con respecto a los núcleos, lo cual es menor a las desviaciones esperadas entre núcleos y el elemento.
- El método de madurez es una solución económicamente viable. Ya que en el caso analizado de la producción vigas pretensadas de concreto, el método de madurez presentó costos similares a los del método de cilindros de concreto, si se utiliza un solo dispositivo por línea de producción. Con un costo aproximado 5,8% mayor que el de utilización de cilindros de concreto en las predicciones de resistencia. Pero si se utilizan dos dispositivos por línea de producción, el costo de utilizar el método de madurez, aumentaría a alrededor de 94% mayor al costo utilizado de cilindros, por lo que se tendría que contemplar si los beneficios brindados por el método de madurez, valen el costo extra.
- La utilización de la ecuación lineal con el logaritmo de la madurez, propuesta en el marco teórico, mostro una muy buena tendencia para modelar la resistencia de los cilindros de concreto, con líneas de tendencia con  $R^2$  mayores al 98% y una desviación máxima en las resistencias de 7.4% entre el modelo y los cilindros.
- Las curvas de los resultados, de resistencia con respecto a la edad, tanto de los cilindros como de los modelos presentaron el comportamiento de evolución de la resistencia esperado según la teoría del endurecimiento del concreto.
- El Código Sísmico de Costa Rica, en el inciso 8.1.1a), establece que se debe cumplir con lo reglamento en las especiaciones del comité 318 del ACI. El cual regula la frecuencia de los muestreos y permiten el uso otros métodos para la obtención de la resistencia del concreto, exceptuando la confirmación del  $f'_c$ , el cual debe ser confirmado utilizando cilindros de concreto y fallando únicamente a 28 días.
- Ambos los cilindros curados en el patio junto a la pieza, como los cilindros curados en laboratorio sumergidos en un tanque de agua, brindaron modelos muy similares con desviaciones máximas de 5% para CAD700 y 3% para SCC700 entre sí, con el modelo de los cilindros curados en patio prediciendo resistencias menores. Por lo que no hay

una diferencia significativa para preferir el uso uno u otro de los curados para calibrar el método.

- El SCC700 mostro la tendencia de temperaturas esperadas, con temperaturas de hidratación iniciales altas durante el primer día y después mostrando un comportamiento cíclico creado por el cambio en temperatura ambiental.
- El CAD700 aunque no tuvo temperaturas de hidratación iniciales tan prominentes como las esperadas, de igual manera el modelo logro predecir satisfactoriamente la resistencia del concreto.

## **6.2 Recomendaciones**

- Los proyectos que quieran utilizar el método de madurez deben cumplir como mínimo con las siguientes características:
  - Debe tener las condiciones para dosificar las mezclas con gran precisión para asegúrese de la homogeneidad a lo largo del tiempo de las mezclas;
  - Debe conocer la varianza de sus insumos para la mezcla y procurar que esta varianza sea lo menor posible, ya que, si ocurre cualquier cambio de estos, se deberá recalibrar el modelo;
  - Debe mantener un curado adecuado en los elementos como lo estipula la norma ASTM C1074 y;
  - Debe contar con personal técnico calificado para efectuar las calibraciones y verificaciones del modelo utilizado para predecir de resistencia a lo compresión del concreto, para cumplir con el ACI y las normas ASTM.
- Se debe profundizar la investigación sobre cómo afecta el cambio de los insumos en la mezcla de concreto en la precisión del método de madurez para predecir la resistencia del concreto. Además, se deben crear unos rangos aceptables en donde cambios de granulometría, relación  $a/c$ , resistencia del cemento, finura del cemento, rugosidades del agregado, entre otros factores del diseño de mezcla, para crear rangos aceptables de variación en los insumos.



- El modelo no puede ser utilizado para predecir resistencias afuera del rango de edades utilizadas en su calibración. Por lo que, en cada proyecto debe calibrar el modelo tomando en cuenta las edades de importancia, en todo su proceso, a las cuales se ocuparán la resistencia.
- Dado que se tuvo problemas de pérdidas de información, lo cual equivale a un 12.5% de falla de los dispositivos utilizados, es importante comprobar estos dispositivos sean confiables.
- Se recomienda utilizar un método mixto de madurez y cilindros de concreto, en donde se utilice el método de madurez para las mediciones a edades tempranas ya que el método de madurez brinda información tiempo real, pero de igual manera es necesario confirmar el  $f'c$  del concreto con la falla de cilindros a los 28 días el cual se debe hacer por lo menos una muestra por cada tanda diaria si son menos de 5 tandas al día y si son más de 5 tandas al menos una muestra cada 110m<sup>3</sup> con 5 muestreos como mínimo.
- Para tomar la decisión del uso del método de madurez es importante tomar en cuenta los beneficios económicos que puede traer la optimización de procesos que puede generar tener resultados de resistencia cada 30 minutos.
- Es necesario investigación futura sobre mediciones a edades tempranas, alrededor de 12 a 24 horas, ya que esta es el tiempo de desencofrado en muchos elementos.
- Se debe elaborar un proyecto donde se investigue cual curado de los cilindros de calibración, brinda el modelo con el comportamiento más cercano a la realidad. Para esto se debe utilizar algún método de obtención de resistencia del elemento, que ofrezca mayor precisión que los núcleos, ya que estos tienden a perder resistencia en el proceso de extracción.

## **CAPITULO 7 BIBLIOGRAFÍA**

## 7.1 Bibliografía

- ASTM International. (2017). C1074 Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken, PA. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM International. (2017). C192/C192M Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken, PA. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM International. (2017). C31/C31M Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. West Conshohocken, PA. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM International. (2017). C39/C39M Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM International. (2017). C42/C42M Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of. West Conshohocken, PA. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)
- Ballim, Y. (2003). *Magazine of Concrete Research, A maturity approach to the rate of heat evolution in concrete*. Johannesburg: Institution of Civil Engineers.
- Bravo, A. (22 de Septiembre de 2018). (A. Carranza, Entrevistador)
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica*. Cartago: Editorial Tecnológico de Costa Rica.
- Comité ACI 214. (2003). *Guide fot Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results ACI 214.4R-03*. Technical Documents.
- Comité ACI 318. (2014). *Requisitos de Reglamentos para Concreto Estructural (ACI 318S-14)*. Michigan: Farmington Hills.
- CSA. (2014). *A23.1-14/A23.2-14 - Concrete materials and methods of concrete construction / Test methods and standard practices for concrete*. Canada: CSA Goup.
- Giatec Scientific. (2017). *Guide to Ditermine Early-age Strength of Concrete using MATURITY METHOD*.
- Giatec Scientific. (2017). *What is the maturity method?* Obtenido de Giatec Scientific: <https://www.giatecscientific.com/concrete-sensors/smartrock2/resources/what-is-the-maturity-method/>

- Hughes, I., & Hase, T. (2010). *Measurements and their Uncertainties*. Oxford:: Oxford University Press.
- INVU. (2018). *Reglamento de Construcciones*. San Jose: La Gaceta.
- Mehta, P. K. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. Chicago: Mc Graw Hill Education.
- Naik, T. R. (1992). *Maturity of Concrete: Its Applications and Limitations*. Wisconsin: Advances in Concrete Technology CANMET.
- Neville, A. (2000). *Properties of Concrete*. London: Pearson Education.
- Neville, A. (2006). *Neville on Concrete*. Londres: BOOKSURGE LLC.
- NRCC. (1977). *CBD-187. Non-Destructive Testing of Concrete*. Ontario: National Research Council Canada.
- Plowman, J. (1956). *Magazine of Concrete Research, Maturity and the strength of concrete*. Telford, Scotland: Institution of Civil Engineers.
- Reyes, A. (16 de Marzo de 2018). (A. Carranza, Entrevistador)
- Rodríguez, E. R. (2004). *Relación entre la resistencia del concreto y la temperatura utilizando el método de madurez*. San José, Costa Rica: UCR.
- Schellhammer, J. (2013). Another Look at the Collapse of Skyline Plaza at. *CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING FACULTY PUBLICATIONS*.

## **CAPITULO 8 ANEXOS**

## **A. Búsqueda de dispositivos inalámbricos en el mercado**

Todos los datos obtenidos en esta sección se obtuvieron de especificaciones técnicas encontradas en sus respectivas páginas web o facilitadas por la compañía. De igual manera los precios presentados en estos anexos son precios base tomados a inicio del 2018 de valores que las compañías facilitaban en sus respectivas páginas web o cotizaciones con las mismas, si no se encontraba la información.

### **A.1 SmartRock2**

#### **A.1.1 Descripción**

SmartRock2 es un sensor de temperatura del concreto el cual es totalmente inalámbrico fabricado por la compañía Giatec en Canadá. El sensor debe estar embebido 5 cm en el concreto, en donde toma las medidas de temperatura cada 30 minutos. Esta información es almacenada por el dispositivo y puede ser descargada en cualquier momento por medio de Bluetooth. Giatec facilita un App para dispositivos móviles en donde calcula la resistencia del concreto utilizando el procedimiento normado en ASTM 1074 utilizando los datos de temperatura transmitidos por el sensor.

#### **A.1.2 Ventajas**

- Es un sistema muy simple en donde el sensor también almacena la información y la transmite por lo que reduce la cantidad de equipo lo cual simplifica el sistema.
- Brinda un sistema operativo muy completo el cual utiliza el procedimiento de la norma ASTM 1074 en donde calcula directamente la madurez con los datos transmitidos por el dispositivo, por lo que agiliza el proceso de cálculo de la resistencia a la compresión del concreto.
- El sistema es totalmente inalámbrico por lo que evita problemas y desgaste de los cables que salen del concreto.
- No tiene costos iniciales altos de equipo ya que todo lo que se necesita es el sensor y el App el cual es gratuito.



**Figura 8.1. Guía de uso de SmartRock2**

Fuente: Giatec Scientific

### A.1.3 Desventajas

- El costo de los sensores es relativamente alto ya que ninguna parte del sistema es reusable ya que todo el sistema se encuentra embebido en el concreto. (En otros sistemas se tiene el componente que almacena la información y el componente que la transmite como un dispositivo aparte, por lo que se puede reusar)

### A.1.4 Costos

- Costo de dispositivo: \$85
- Costo de inversión inicial: \$0
- Costo para estimado para el proyecto de madurez: \$1,050

## **A.2 Concremate**

### **A.2.1 Descripción**

Concremate es un sistema de medición de la madurez del concreto el cual consiste en un dispositivo de 18,5 cm de diámetro que se coloca sobre el concreto fresco. Este dispositivo tiene una "aguja" la cual penetra el concreto y toma las medidas de temperatura del concreto. El dispositivo almacena la información la cual puede ser descargada en cualquier momento por medio de Bluetooth. El sistema cuenta también con una caja de calibración la cual utiliza cubos estandarizados de 15cmx15cmx15cm.



**Figura 8.2. Imagen de sensor Concremate**

Fuente: DOKA

### **A.2.2 Ventajas**

- Es un sistema en donde los dispositivos son completamente reusable.
- El sistema es totalmente inalámbrico por lo que evita problemas y desgaste de los cables que salen del concreto.

### **A.2.3 Desventajas**

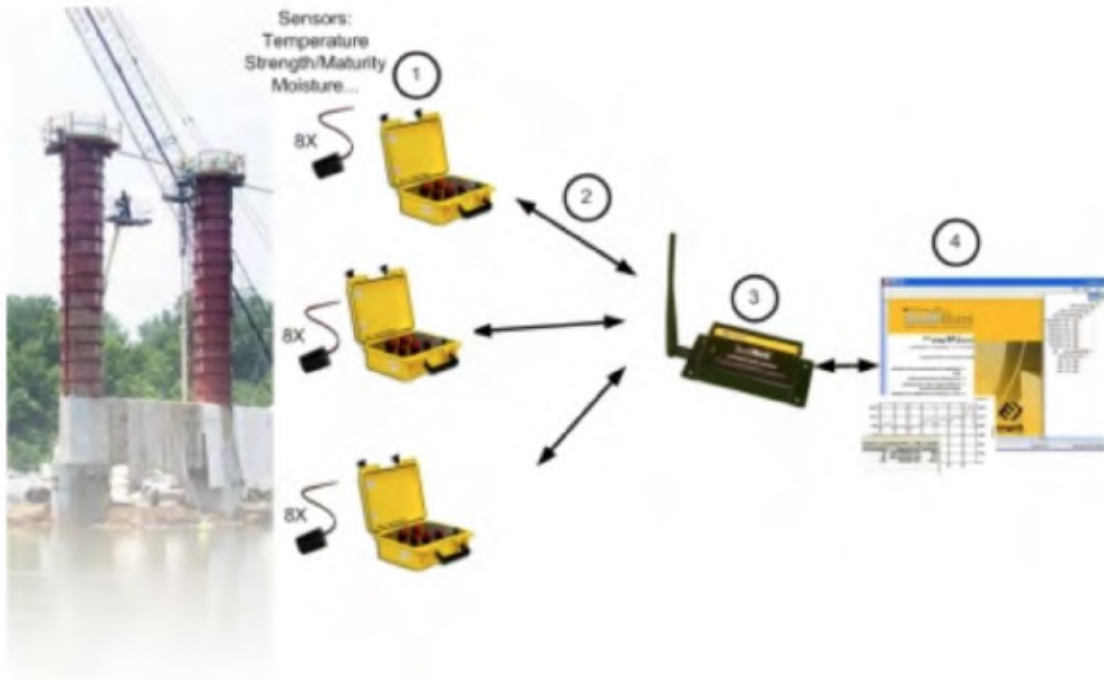
- Costo de los equipos es alto ya que el sistema es completamente reusable.
- Sus dimensiones de diámetro 18,5cm y altura 15,5 cm pueden ser un limitante con respecto a la geometría de los distintos elementos prefabricados en la planta.
- Para su calibración utiliza cubos estandarizados de 15cmx15cmx15cm los cuales no son los normados en ASTM 1074.
- No hay representante en Centro América, por lo que no se tiene costos de sus servicios.



## A.3 Intellirock II

### A.3.1 Descripción

Intellirock II es un sistema semi-inalámbrico fabricado por la compañía FLIR. Este sistema tiene un sensor embebido en el concreto que toma las medidas de temperatura continuamente a lo largo del tiempo y está conectado a un receptor en donde almacena la información y luego la transmite inalámbricamente a la nube o a una computadora. Un solo receptor se puede conectar y almacenar la información de 8 sensores de temperatura.



**Figura 8.3. Sistema de Intellirock Wierless**

Fuente: FLIR Instruments

### A.3.2 Ventajas

- Al tener el componente que almacena la información y el componente que la transmite como un dispositivo aparte se puede reusar parte del sistema, reduciendo costos a largo plazo.
- El sistema almacena por si solo la información a la nube, sin la necesidad de que alguien se acerque al dispositivo a extraerla.

### A.3.3 Desventajas

- El sistema tiene componentes que todavía usan cables por lo que puede presentar problemas y desgaste de los cables que salen del concreto y con esto perder la información.
- Aunque el dispositivo para el almacenamiento de información sea capaz de recibir 8 sensores, por la distribución del espacio y los especímenes en la planta de producción sería difícil e incómodo utilizar 8 sensores por dispositivo almacenador.
- La compañía brinda poca información sobre su uso, desempeño, mantenimiento y calibración del sistema.

### A.3.4 Costos

- Costo de sensor: \$40
- Costo de dispositivo de almacenamiento: \$1,400
- Costo de repetidor de señal: \$600
- Costo para estimado para el proyecto de madurez: \$2,800 (separando las pruebas en dos tractos)

## **A.4 Command Center y IDrop**

### A.4.1 Descripción

Los sistemas para la obtención de la resistencia del concreto por medio del método de madurez de la compañía Command Center y Non-Cure tienen un enfoque muy similar. Ambos sistemas son semi-inalámbrico Similares al Intellirock II, con la diferencia de que el almacenador de información es más pequeño y solo tiene capacidad para recibir dos sensores. Además, el sistema cuenta con una interfaz móvil con un programa para calibración y obtención de la resistencia.



**Figura 8.4. Trimble Nomad, sensor y repetidor del sistema Idrop.**

Fuente: Non-Cure Concrete material solutos

#### A.4.2 Ventajas

- Al tener el componente que almacena la información y el componente que la transmite como un dispositivo aparte se puede reusar esta parte del sistema.
- El sistema almacena por si solo la información a la nube, sin la necesidad de que alguien se acerque al dispositivo a extraerla.

#### A.4.3 Desventajas

- El sistema tiene componentes que todavía usan cables por lo que puede presentar problemas y desgaste de los cables que salen del concreto y con esto perder la información.
- La compañía brinda poca información sobre su uso, desempeño, mantenimiento y calibración del sistema.

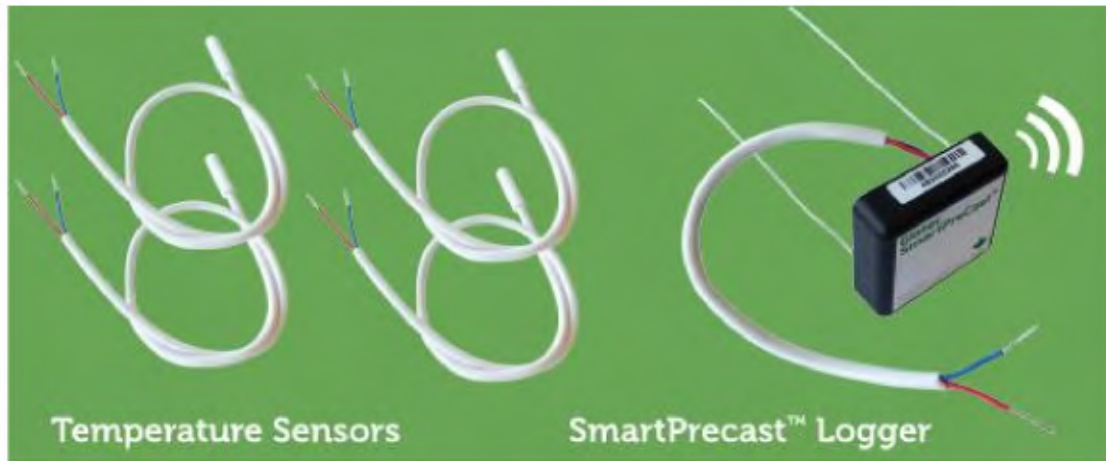
#### A.4.4 Costos (mismos precios en ambos sistemas)

- Costo de sensor: \$35
- Costo de dispositivo de almacenamiento: \$100 (2 entradas)
- Costo Trimble Nomad: \$1500
- Costo para estimado para el proyecto (Starter kit): \$3,000 (separando las pruebas en dos tractos)

## A.5 SmartPrecast

### A.5.1 Descripción

SmartPrecast es un dispositivo totalmente inalámbrico fabricado por la compañía Giatec, igual al SmartRock2, con la diferencia que este se puede reusar 3 veces. El sensor debe estar embebido 5 cm en el concreto, en donde toma las medidas de temperatura cada 30 minutos. Esta información es almacenada por el dispositivo y puede ser descargada en cualquier momento por medio de Bluetooth. Giatec facilita un App para dispositivos móviles en donde calcula la resistencia del concreto utilizando el procedimiento normado en ASTM 1074 utilizando los datos de temperatura transmitidos por el sensor.



**Figura 8.5. Guía de uso de SmartRock2**

Fuente: Giatec Scientific

### A.5.2 Ventajas

- Es un sistema muy simple en donde el sensor también almacena la información y la transmite por lo que reduce la cantidad de equipo lo cual simplifica el sistema.
- Brinda un sistema operativo muy completo el cual utiliza el procedimiento de la norma ASTM 1074 en donde calcula directamente la madurez con los datos transmitidos por el dispositivo, por lo que agiliza el proceso de cálculo de la resistencia a la compresión del concreto.
- El sistema es totalmente inalámbrico por lo que evita problemas y desgaste de los cables que salen del concreto.

- No tiene costos iniciales altos de equipo ya que todo lo que se necesita es el sensor y el App el cual es gratuito.
- El sistema se le puede dar 4 usos por lo que esto reduce significativamente el costo.

### A.5.3 Desventajas

- A diferencia del SmartRock2 que está protegido dentro del concreto, el sensor no queda completamente embebido en el concreto, ya que la parte reusable queda por afuera, esto deja parte del sistema expuesto a golpes, desgaste y otros agentes externos que pueden dañar el dispositivo.

### A.5.4 Costos

- Costo de dispositivo: \$120 (4 usos)
- Costo por uso: \$30
- Costo de inversión inicial: \$0
- Costo para estimado para el proyecto de madurez: \$2,400

## A.6 Resumen de dispositivos

A continuación, se muestra un cuadro resumen de los precios de los dispositivos investigados, y el costo aproximado si se fuese a utilizar estos dispositivos en el proyecto de graduación. Es importante considerar que, en una situación de compras a un mayor volumen, por medio de negociaciones u otros proveedores, se pueden llegar a reducir significativamente los precios de los dispositivos, lo cual no fue considerado en esta etapa del proyecto.

**Cuadro 8.1 Comparación de precios y costo de utilizar los distintos dispositivos, para la medición de madurez, que ofrece el mercado.**

Producto	Compañía	Precio	Inversión inicial para proyecto de graduación	Reusable	Costo para proyecto de graduación
SmartRock2	<i>Giatec scientific</i>	<i>\$85</i>	<i>0</i>	<i>no</i>	<i>\$ 1 050,00</i>
Concremote	<i>Doka</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>si</i>	<i>\$ -</i>
IntelliRock	<i>PCTE</i>	<i>\$40</i>	<i>\$ 3 000,00 (8 entradas)</i>	<i>parcial</i>	<i>\$ 6 560,00</i>
Command Center	<i>Command Center</i>	<i>\$35</i>	<i>\$ 1 500,00 (+100 wifi 2 entradas)</i>	<i>parcial</i>	<i>\$ 2 690,00</i>
IDrop	<i>Non-Cure</i>	<i>\$35</i>	<i>\$ 1 500,00 (+100 wifi 2 entradas)</i>	<i>parcial</i>	<i>\$ 2 690,00</i>
SmartPrecast	<i>Giatec scientific</i>	<i>\$120</i>	<i>0</i>	<i>Parcial</i>	<i>\$ 2 400,00</i>

## **B. Incertidumbres y datos descartados**

### **B.1 Equipos utilizados**

En el siguiente aparatado se enlistarán los equipos de medición utilizados en el proyecto de y se brindarán datos sobre su uso en el proyecto, su precisión, entre otros aspectos.

#### **B.1.1 Máquina de ensayos**

La máquina de ensayos se fue utilizada para fallar los cilindros y núcleos de concreto y obtener la resistencia de estos elementos. El equipo cuenta con su debida calibración proporcionada por LANNAME. Este equipo tiene una incertidumbre de 0,1 kN asociado a su medición de fuerza aplicada sobre el cilindro o núcleo.

Nombre: PILOT

Modelo: C65C04

Fabricante: Controles



**Figura 8.6. Foto de máquina de ensayos.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018

## Certificado de calibración

Nombre del cliente: Productos de Concreto  
Domicilio: San Rafael de Alajuela

N° de certificado: I-0225-17

Fecha de calibración: 07 de marzo de 2017

Instrumento: Máquina de ensayos  
Marca: Controls  
Modelo: C56C04  
Serie: 13007705  
Otra referencia del equipo: No aplica  
Alcance de la calibración: 3 000,0 kN  
Capacidad máxima : 3 000,0 kN  
Modo de calibración: Compresión

Procedimiento utilizado: Comparación directa IT-LF-01\*, equivalente a la norma UNE-EN ISO 7500-1. (\*Procedimiento acreditado)

Calibró: Jonathan González



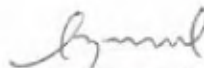
(1) Las aclaraciones indicadas al reverso de esta hoja forman parte de este certificado

Responsable de la calibración:



Ing. Humberto Tiofi Mora, M.Sc.  
Jefe Laboratorio de Fuerza

Aprobó:



Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.  
Director LanammeUCR



**Figura 8.7. Extracto de certificado de calibración de máquina de ensayos.**

Fuente: LANNAME, 2017  
Modificado por: Andrés Carranza, 2018

### B.1.2 Sensores de madurez

El Dispositivo SmartRock2 que el sensor utilizado para la recolección de todos los datos de temperatura y tiempo para el uso de la madurez. Este equipo tiene una incertidumbre de 1°C asociado a su medición de temperatura interna. Además, la medición de tiempo la hace el celular al conectarse al dispositivo, este tiene una incertidumbre insignificante.

Nombre: SmartRock2

Fabricante: Giatec Scientific



**Figura 8.8. Extracto de ficha técnica de SmartRock2.**

Fuente: Giatec Scientific, 2018  
Modificado por: Andrés Carranza, 2018

TECHNICAL SPECIFICATIONS	
Reading Range	-30 to 80 °C (-22 to +176 °F)
Accuracy	± 1°C
Measurement Frequency	Once every 30mins for 1 month
Wireless Signal Range <sup>1</sup>	Up to 6-8 meters (20-26 feet)
Dimensions	38 x 38 x 12 mm (1.5 x 1.5 x 0.5 inches)
Temperature Cable Length	40cm (16 inches) 3m (10 feet)
Battery Life	Up to 4 months after installation

**Figura 8.9. Extracto de ficha técnica de SmartRock2.**

Fuente: Giatec Scientific, 2018  
Modificado por: Andrés Carranza, 2018



### B.1.3 Vernier

Este equipo se utilizó para medir las dimensiones de los cilindros y núcleos. Este tiene una incertidumbre de 0,01cm asociado a su medición de distancia.

Nombre: Metric Digital Caliper

Fabricante: Insize



**Figura 8.10. Foto de Vernier, INSIZE Metric Digital Caliper.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018

### B.1.4 Resumen de incertidumbres de los equipos

**Cuadro 8.2 Cuadro de incertidumbres asociadas a las mediciones**

Mediciones	Variable	Incertidumbre ( $\pm\delta$ )	unidades
Tiempo	$t$	0,001	segundos
Temperatura	$T$	1	C°
Distancia	$d$	0,01	cm
Fuerza	$F$	0,1	kN

## B.2 Incertidumbre

Utilizando las incertidumbres asociadas a las mediciones presentadas anteriormente se utilizó el método de propagación de un enfoque funcional. Este enfoque propuesto lo que pretende es arrastrar el error en cada uno de los cálculos, por lo que por cada cálculo que se hace se hacen otros dos cálculos, uno aplicándole la incertidumbre positiva a la mediana y otro aplicando la incertidumbre negativa, con esto obteniendo los resultados máximos y mínimos. Este método se utiliza a lo largo de todos los cálculos del proyecto, de manera que se obtienen 3 resultados finales, uno contemplando las incertidumbres que aumentan el valor del resultado, otro con los valores sin incertidumbre, y finalmente uno contemplando las incertidumbres que disminuyen el valor del resultado. A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo de incertidumbre asociada a la resistencia de los cilindros de concreto.

**Cuadro 8.3 Ejemplo de cálculo de propagación de incertidumbre**

Ecuación	$f(x)$	$f(x) + \delta$	$f(x) - \delta$
$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ (cm)}$	$\frac{102,67 + 102,42}{2} = 102,545$	$\frac{102,68 + 102,43}{2} = 102,555$	$\frac{102,66 + 102,41}{2} = 102,535$
$A_c = \frac{d^2 \pi}{4} \text{ (cm}^2\text{)}$	$102,545^2 \pi / 4 = 8258,84$	$102,555^2 \pi / 4 = 8260,45$	$102,545^2 \pi / 4 = 8257,23$

En donde:

Área =  $A_c$

Diámetro promedio =  $d$

Diámetro #1 =  $d_1$

Diámetro #2 =  $d_2$

Incertidumbre =  $\delta$

Datos a 24 horas : SCC799																				
Dia de falla <u>18/4/2018</u>											Hora de falla <u>02:15</u>									
Datos de cilindros curados en laboratorio:																				
Cilindro	D1 (cm)	D1+6 (cm)	D1-6 (cm)	D2 (cm)	D2+6 (cm)	D2-6 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	A+6 (cm <sup>2</sup> )	A-6 (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia								Tipo de Falla	
											F+6 (kN)	F-6 (kN)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	σ+6 (kg/cm <sup>2</sup> )	σ-6 (kg/cm <sup>2</sup> )	+6 (kg/cm <sup>2</sup> )	-6 (kg/cm <sup>2</sup> )		
AC-CL01	102,67	102,680	102,660	102,42	102,430	102,410	8258,84	8260,447	8257,226	296,7	296,80	296,60	35,93	366,3	366,53	366,14	0,19	-0,19	1	
AC-CL02	101,98	101,990	101,970	102,63	102,640	102,620	8220,22	8221,830	8218,616	307,1	307,20	307,00	37,36	381,0	381,14	380,76	0,20	-0,20	1	
AC-CL03	102,34	102,350	102,330	102,11	102,120	102,100	8207,37	8208,978	8205,766	304,9	305,00	304,80	37,15	378,8	379,02	378,62	0,20	-0,20	1	
											Promedio: 375,37±0,2 kg/cm <sup>2</sup>								0,20	-0,20
Observaciones: _____																				
Datos de cilindros curados en patio																				
Cilindro	D1 (cm)	D1+6 (cm)	D1-6 (cm)	D2 (cm)	D2+6 (cm)	D2-6 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	A+6 (cm <sup>2</sup> )	A-6 (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia								Tipo de Falla	
											F+6 (kN)	F-6 (kN)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	σ+6 (kg/cm <sup>2</sup> )	σ-6 (kg/cm <sup>2</sup> )	+6 (kg/cm <sup>2</sup> )	-6 (kg/cm <sup>2</sup> )		
AC-CL01	102,67	102,680	102,660	102,42	102,430	102,410	8258,84	8260,447	8257,226	296,7	296,80	296,60	35,93	366,3	366,53	366,14	0,19	-0,19	1	
AC-CL02	101,98	101,990	101,970	102,63	102,640	102,620	8220,22	8221,830	8218,616	307,1	307,20	307,00	37,36	381,0	381,14	380,76	0,20	-0,20	1	
AC-CL03	102,34	102,350	102,330	102,11	102,120	102,100	8207,37	8208,978	8205,766	304,9	305,00	304,80	37,15	378,8	379,02	378,62	0,20	-0,20	1	
											Promedio: 375,37±0,2 kg/cm <sup>2</sup>								0,20	-0,20
Observaciones: _____																				
Datos a 3 días:																				
Dia de falla <u>4/12/2018</u>											Hora de falla <u>04:05</u>									
Datos de cilindros curados en laboratorio:																				
Cilindro	D1 (cm)	D1+6 (cm)	D1-6 (cm)	D2 (cm)	D2+6 (cm)	D2-6 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	A+6 (cm <sup>2</sup> )	A-6 (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia								Tipo de Falla	
											F+6 (kN)	F-6 (kN)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	σ+6 (kg/cm <sup>2</sup> )	σ-6 (kg/cm <sup>2</sup> )	+6 (kg/cm <sup>2</sup> )	-6 (kg/cm <sup>2</sup> )		
AC-CL04	102,30	102,310	102,290	103,02	103,030	103,010	8277,37	8278,983	8275,758	392,4	392,50	392,30	47,41	483,4	483,63	483,19	0,22	-0,22	2	
AC-CL05	103,03	103,040	103,020	102,92	102,930	102,910	8328,24	8329,862	8326,627	412,1	412,20	412,00	49,48	504,6	504,80	504,36	0,22	-0,22	4	
AC-CL06	101,65	101,660	101,640	102,53	102,540	102,520	8185,71	8187,312	8184,105	382,0	382,10	381,90	46,67	475,9	476,09	475,65	0,22	-0,22	4	
											Promedio: 487,95±0,22 kg/cm <sup>2</sup>								0,22	-0,22
Observaciones: _____																				
Datos de cilindros curados en patio:																				
Cilindro	D1 (cm)	D1+6 (cm)	D1-6 (cm)	D2 (cm)	D2+6 (cm)	D2-6 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	A+6 (cm <sup>2</sup> )	A-6 (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia								Tipo de Falla	
											F+6 (kN)	F-6 (kN)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	σ+6 (kg/cm <sup>2</sup> )	σ-6 (kg/cm <sup>2</sup> )	+6 (kg/cm <sup>2</sup> )	-6 (kg/cm <sup>2</sup> )		
AC-CP04	102,68	102,690	102,670	102,32	102,330	102,310	8251,59	8253,200	8249,979	403,2	403,30	403,10	48,86	498,3	498,43	498,05	0,22	-0,22	2	
AC-CP05	102,75	102,760	102,740	102,25	102,260	102,240	8251,59	8253,200	8249,979	408,4	408,50	408,30	49,49	504,7	504,92	504,47	0,22	-0,22	4	
AC-CP06	102,29	102,300	102,280	101,97	101,980	101,960	8192,12	8193,729	8190,520	399,2	399,30	399,10	48,73	496,9	497,13	496,69	0,22	-0,22	4	
											Promedio: 499,96±0,22 kg/cm <sup>2</sup>								0,22	-0,22
Observaciones: _____																				

**Figura 8.11 Ejemplo de cálculo de incertidumbre para Resistencia de los cilindros curados en patio de SCC700.**

Elaborado por: Andrés Carranza

### **B.3 Error**

Es de esperar que los ensayos de núcleos den resultados menores, ya que el procedimiento para obtener los núcleos crea microfracturas, las cuales debilitan el espécimen, esto es reconocido por el ACI214.4R-03 en donde contempla que, si los ensayos de núcleos exceden con  $0,85f'c$  están cumpliendo con la resistencia necesaria. (Comité ACI 214, 2003)

Por lo que el valor mínimo aceptado de la resistencia del núcleo es,

$$\sigma = 0,85f'c$$

Entonces, eso quiere decir que el valor de resistencia de cilindros puede ser  $0,15 f'c$  menor, lo cual con respecto a si mismo,

$$\frac{0,15f'c}{0,85f'c} \times 100 = 17,6\%$$

Por lo que lo propuesto por el ACI214.4R-03 contempla que es aceptable que los datos de los núcleos tengan un error de 17,6% con respecto a si mismo.

Esta norma no contempla factores de reducción de la resistencia a otras edades que no sean a 28 días, pero ya que a edades más tempranas el concreto es más débil y más proceso a daños en su extracción, utilizar los mismos 17,6% de error aceptable es un buen punto de comparación. Además, es importante recordar que en esta misma norma no recomienda usar el método de núcleos a edades menores de 14 días ya que el concreto puede no tener las propiedades necesarias para resistir el proceso de extracción de núcleo, por lo que sus resultados pueden dar más bajos de los esperados.

### **B.4 Datos descartados**

Uno de los problemas enfrentados fue la pérdida de información parcial de 3 dispositivos Smart Rock. Ya que se estaba usando un dispositivo al cual ninguno de los participantes de proyecto tenía experiencia en su uso, se tomó la decisión desde tener redundancia en todas las mediciones, por lo cual en todos los casos de pérdida de información se tenía otros dispositivos respaldándola. La primera pérdida de información se dio cuando uno el dispositivo en uno de los cilindros de la mezcla CAD700 curado en patio, después de un par de días de hacer mediciones y funcionando correctamente dejo de funcionar. En este caso no se supo cuál fue la razón de falla ya que el dispositivo en el exterior no se veía golpeado, cortado o dañado de alguna manera. De la misma manera se dio una pérdida de información sin ninguna causa

visible, en el día 27, ósea el último día de medición, para uno de los dispositivos de la mezcla SCC700 en uno de los cilindros curados en patio. También hubo otra pérdida de alrededor de 10 horas de información en uno de los dos dispositivos colocados en la viga de SCC700, está perdida se dio por un mal majeo del elemento, por un operario de PC, cuando la viga fue transportada ya que, al manipular el elemento, se desconectó el dispositivo. En los casos de las pérdidas momentáneas de información se utilizó los datos de los otros dispositivos para complementar la información y en el caso donde el dispositivo solo funciono los primeros días y dejo de funcionar por completo, se decidió no contemplar sus mediciones del todo.

En la ocasión que se perdió la información por mal manejo del elemento, denota que, para utilizar este método, es necesario capacitar a los operarios que manipulen estos dispositivos, para evitar estos problemas. Además, sería bueno utilizar algún sistema, como una caja de seguridad, para proteger los cables y los otros componentes que quedan expuestos.

Ocurrió otro problema en dos mediciones de resistencia de los cilindros de CAD700 ya que hubo dos mediciones de los cilindros curados en laboratorio, una a 14 días (AC-CL011) y el otro a 28 días (AC-CL013). Estos dos cilindros tuvieron fallas en una de las esquinas como se muestra en las siguientes figuras. Estos datos se decidieron descartar ya que se determinó que la falla con una desviación a los otros cilindros de 28% y 37% respectivamente ocasionada por una falla local no son representativas de la resistencia del cilindro.



**Figura 8.12 Foto de falla defectuosa a 14 días AC-CL011.**

Tomada por: Andrés Carranza



**Figura 8.13 Foto de falla defectuosa a 14 días AC-CL013.**

Tomada por: Andrés Carranza

Otro problema ocurrió el primer día de extracción de núcleos de la viga de CAD700. Ya que se quería fallar los núcleos a 7 días, para cumplir con los 5 días de reposo que debe tener los núcleos en una bolsa plástica se tenían que sacar los núcleos al segundo día de haberse colado. Pero hubo un problema técnico a la hora preparar el equipo para sacar núcleos, esto resulto en un atraso de dos días por lo cual la falla de estos núcleos fue a los 9 días y no a los 7. Este problema tuvo una solución simple, ya que el método de madurez brinda perdicion de madurez cada media hora, no hubo problema de usar estos resultados a 9 días para hacer las comparaciones deseadas. Este problema muestra la versatilidad y una de las ventajas de utilizar el método de madures para predecir la resistencia.

## **C. Guía para el uso del método de madurez para predecir resistencia del concreto a tiempo real.**

Esta sección busca hacer un compendio pequeño de métodos recomendados para el uso de este sistema, acompañado por recomendaciones personales por los resultados obtenidos en la investigación para el uso del método de madurez de un diseño de mezcla.

### **C.1 Metodología para la calibración**

#### **C.1.1 Fabricación y curado de los cilindros**

- Se crea una mezcla igual a la que se va a utilizar en los elementos estructurales.
- De la mezcla se crea; 18 cilindros de concreto, curados en laboratorio siguiendo la norma ASTM C192/C192M y ASTM C511. De cada tanda de 18 cilindros 3 se les coloca el sensor en un cilindro de 150mm de diámetro, se recomienda calibrar con 3 sensores, por problemas de funcionamiento del chip, ya que la norma requiere de 2 sensores mínimo, los restantes 15 cilindros se cuelean en cilindros de 100mm de diámetro.
- En el caso de SmartRock2 se recomienda que la punta del termómetro se encuentre embebido en el concreto por lo menos 5cm a todos lados. (Giatec Scientific, 2017)
- Para el curado de todos los cilindros se cumple con la especificación ASTM C511.

#### **C.1.2 Obtención de resistencia cilindros**

- Se fallan 3 cilindros curados el laboratorio, cumpliendo con las especificaciones C39/C39M a un mínimo de 5 edades.
- Las edades recomendadas por ASTM de 1, 3, 7, 14 y 28 días. (ASTM International, 2017)
- Estas edades si pueden cambiar y deben cambiar según el proyecto, ya que el rango de edades en la calibración son el rango de edades a las que el método puede hacer predicciones. (Giatec Scientific, 2017)
- Por ejemplo, en PC requieren conocer resistencias a edades tempranas como a las 18 horas para el desencofrado de las piezas pretensadas, la calibración debe incluir este

rango de edades. Se debería muestrear 18 horas y 28 días con otros 3 muestreos, como mínimo, a edades intermedias cercanas a edades importantes.

- Hay que tomar en cuenta que si se quiere optimizar los procesos y se tiene previsto que en algunos casos podría desarrollarse la resistencia necesaria antes de las 18 horas, se debe tener esto previsto y la calibración debería tener un punto a una edad más temprana, ya que sino los resultados antes de las 18 horas no sean válidos y no se podrá hacer un desencofrado temprano, y habrá ahorro de tiempo.
- Se recomienda el caso de PC hacer la calibración con edades cercanas a 12 horas, 18 horas, 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días. Agregando una edad previa al desencofrado normal para tener la opción de desencofrar a edades tempranas si ya se alcanzó la resistencia deseada.

### C.1.3 Obtención de curva de madurez

Se recolectan los datos de temperatura a lo largo del tiempo de los cilindros que contienen los dispositivos. Con estos datos y los resultados de la resistencia de las pruebas de los cilindros curados en laboratorio se calibra la curva madurez utilizando las ecuaciones de Nurse-Saul o Arrhenius. (ASTM International, 2017)

### C.1.4 Búsqueda de relación entre madurez y resistencia

Con los resultados de madurez se busca un modelo para encontrar una relación entre la madurez y la resistencia y para ser utilizada para hacer predicciones de resistencia para elementos conformados por esta mezcla. Se recomienda una tendencia lineal en el comportamiento logarítmico de la madurez y así encontrar los coeficientes A y B de la ecuación (3) mostrada en el Marco Teórico.

## C.2 Obtención de la resistencia de elementos

### C.2.1 Colocación de dispositivos en elementos

- Los dispositivos deben ser debidamente clasificados probados que son detectados por la señal Bluetooth y emparejados con el dispositivo de recolección de datos.
- Si se utiliza SmartRock2 con el sensor embebido, este debe de estar a cercano al centro del elemento, y la caja de memoria y transmisión de señal debe de estar menos de 5cm dentro del concreto.



- Si se utiliza SmartPrecast, este el sensor también se encuentra cercano al centro del elemento, pero la caja de memoria y transmisión de señal se deja afuera del concreto. Se recomienda que se proteja de alguna manera el cable y caja para que no quede expuesta.
- Después del uso del producto de SmartPrecast, este se puede cortar y la caja se puede reutilizar, con otro termómetro.
- Se recomienda el método reusable por reducción de costos.

### C.2.2 Frecuencia de colocación

- Se debe colocar al menos un dispositivo cada línea de colado.
- Aunque se podría utilizar solo uno, para empezar, se recomienda utilizar dos dispositivos para tener redundancia, para prevenir problemas que se pueden crear por el uso de un método nuevo para los operarios.
- De igual manera se recomienda continuar haciendo muestreos de cilindros a los 40m<sup>3</sup> para tener un respaldo.

### C.2.3 Predicción de resistencia

- Utilizando los datos de temperatura y tiempo recolectados de cada sensor embebido en el concreto se utiliza las ecuaciones de Nurse-Saul o Arrhenius para obtener la madurez en el instante en cuestión.
- Con la madurez del concreto, se utilizan los modelos calibrados de la ecuación (3) para obtener la resistencia del elemento en el instante medido.

## C.3 Recalibración y validación

Se debe recalibrar la mezcla si se efectúan cambios en el diseño de mezcla, ya sea cambio en las cantidades o en las propiedades físicas de agregados, aditivos, cementos o agua. Cada mes después de haber calibrado se debe de hacer una verificación, si la verificación da satisfactoria no se tiene que recalibrar, de lo contrario se recalibra ese mes. Esta verificación recomienda Giatec que sea con un cilindro con sensor de madurez y 6 cilindros que se fallen en parejas a edades críticas para el proyecto. De igual manera se recomienda que después de 6 meses de haber calibrado se debe recalibrar el método de madurez.

## **C.4 Procedimiento recomendado para la validación**

### **C.4.1 Fabricación y curado de los cilindros**

- Se crea una mezcla igual a la que se va a utilizar en los elementos estructurales.
- De la mezcla se crea; 7 cilindros de concreto, curados en laboratorio siguiendo la norma ASTM C192/C192M y ASTM C511. De cada tanda de 7 cilindros 1 se le coloca el sensor en un cilindro de 150mm de diámetro, se recomienda calibrar con 3 sensores, por problemas de funcionamiento del chip, ya que la norma requiere de 2 sensores mínimo, los restantes 6 cilindros se cuelean en cilindros de 100mm de diámetro.
- En el caso de SmartRock2 se recomienda que la punta del termómetro se encuentre embebido en el concreto por lo menos 5cm a todos lados. (Giatec Scientific, 2017)
- Para el curado de todos los cilindros se cumple con la especificación ASTM C511.

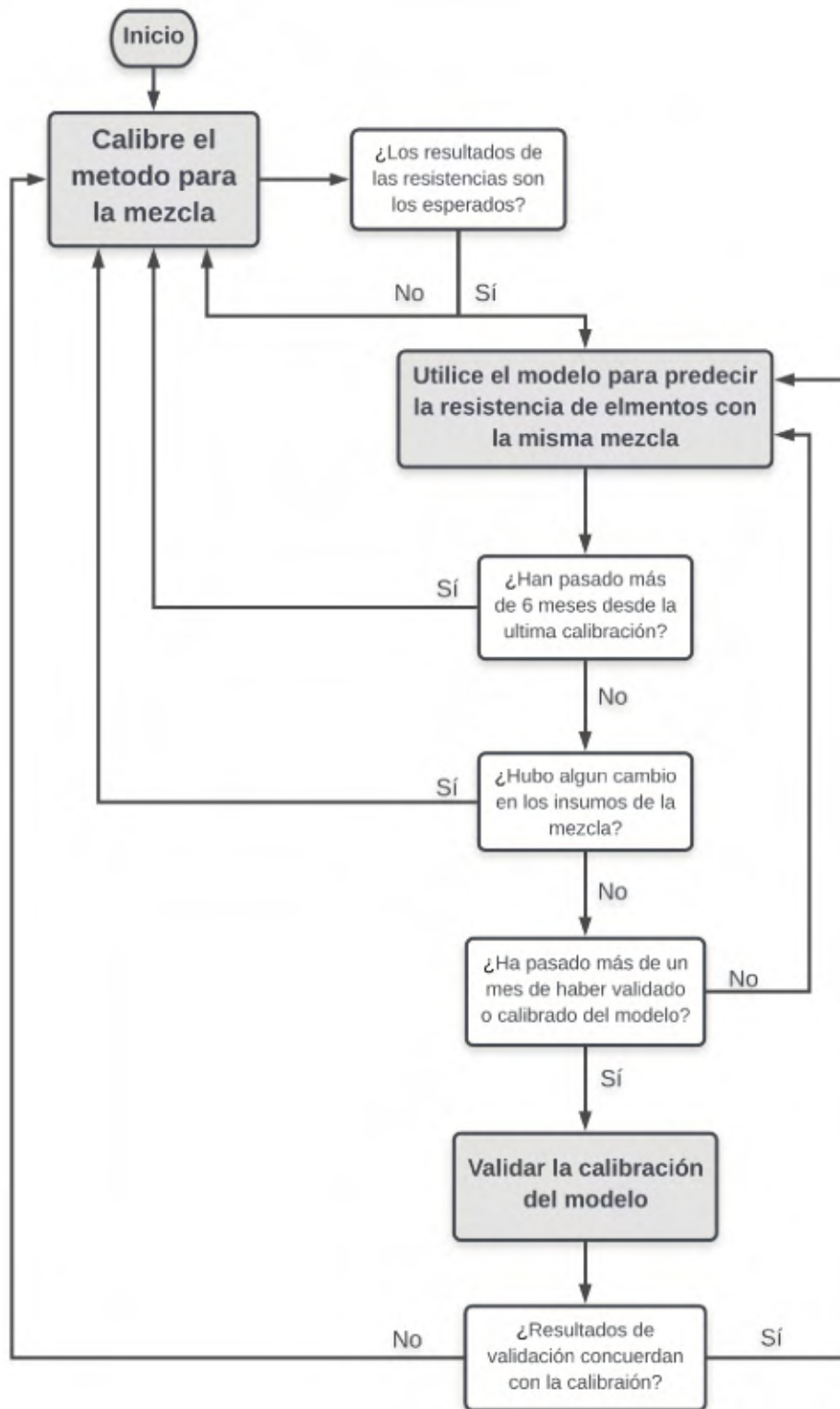
### **C.4.2 Obtención de resistencia cilindros**

- Se fallan 2 cilindros curados el laboratorio, cumpliendo con las especificaciones C39/C39M a 2 edades relevantes al proyecto y una a 28 días.
- Se recomienda el caso de PC hacer la validación con edades cercanas a 12 horas, 18 horas, 24 horas y 28 días.

## **C.5 Características del proyecto para el uso de madurez**

No todo proyecto tiene las características necesarias para el uso del método de madurez para estimar la resistencia del concreto. Una de estas es que el proyecto debe tener las condiciones para dosificar las mezclas con gran precisión para asegurarse de la homogeneidad a lo largo del tiempo de las mezclas. También, se debe procurar que los cementos, agregados, agua y aditivos deben tener siempre las mismas características, cualquier cambio de estos, se deberá recalibrar el modelo. Finalmente, se debe mantener un curado adecuado en los elementos como lo estipula la norma ASTM C1074 y se debe contar con personal técnico calificado para efectuar las calibraciones y verificaciones del modelo utilizado para predecir de resistencia a lo compresión del concreto.

*Nota: Hace falta información en el área del efecto en la variación de los insumos en la mezcla con respecto a la confiabilidad del método de madurez. Se debe calcular los rangos de variación permitida de la variación de las características de los insumos.*



**Figura 8.14. Diagrama de interacción entre actividades de guía para el uso del método de madurez.**

Elaborado por: Andrés Carranza  
Fuente: Lucid Charts

## D. Montaje

A continuación, se muestran algunas imágenes del montaje de los dispositivos de medición de madurez, fabricación de los cilindros, fabricación de las vigas, extracción de núcleos y ensayos de cilindros y núcleos.



**Figura 8.15. Colocación de dispositivo de madurez en cilindro 150mm antes de chorea.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.16. Dispositivo de madurez colocado después de chorea.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.17. Colocación de dispositivo de madurez en viga antes de chorea.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.18. Colocación del sensor de temperatura en viga antes de chorea.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.19. Viga choreada con sensor con concreto líquido.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.20. Viga choreada con sensor con concreto endurecido.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.21. Viga curada en patio.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.22. Cilindros curados junto a viga en patio.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.23. Cilindros curados en laboratorio sumergidos en agua.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018





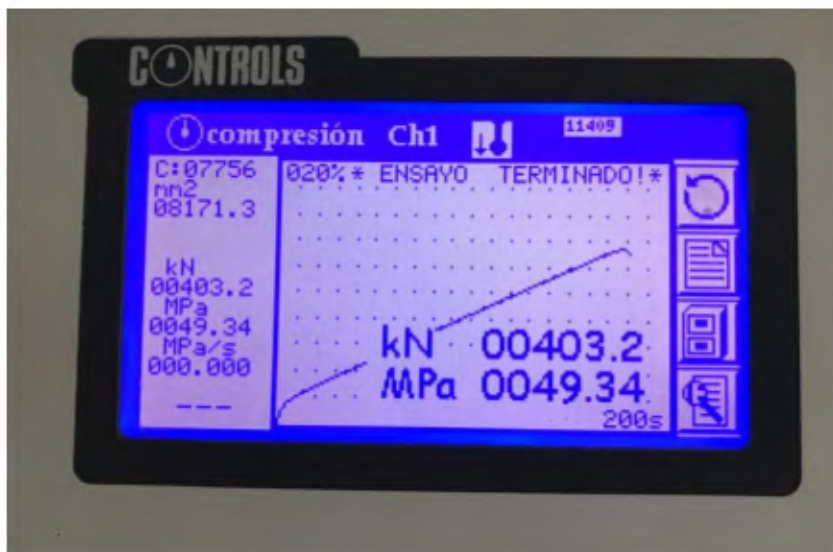
**Figura 8.24. Falla de cilindros de concreto**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.25. Falla de cilindros.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.26. Ejemplo de resultado de maquina ensayos.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



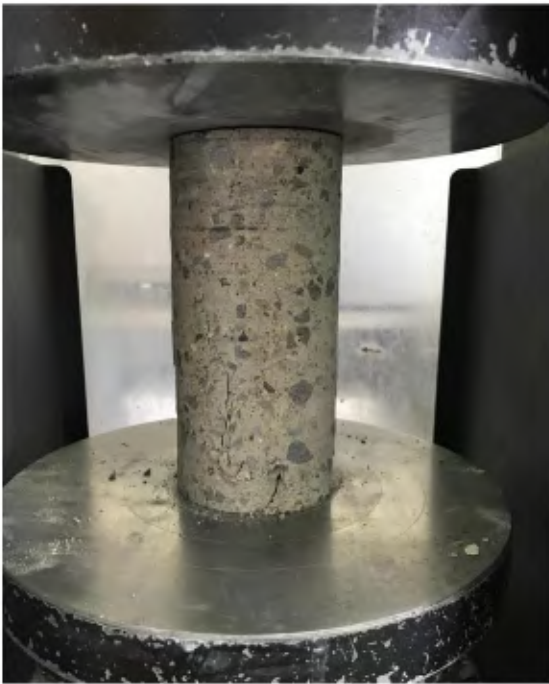
**Figura 8.27. Extracción de núcleo.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.29. Medición de peso para densidad.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.28. Falla de núcleo.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018



**Figura 8.30. Tipo de falla de núcleo.**

Fuente: Andrés Carranza, 2018

## E. Datos Ensayo de resistencia

Hoja de Recolecion de Datos:																			
Proyecto: <u>Trabajo de Graduación Andrés Carranza</u>																			
Mezcla: <u>CAD 700</u>		Numero de ficha: <u>C1804-170427</u>																	
Día de chorea: <u>17/4/2018</u>		Hora de chorea: <u>02:35</u>																	
Propiedades de la mezcla																			
Tipo de cemento: <u>UG-AR RTCR3B3</u>				<b>Aditivo</b>															
Cantidad: <u>364 kg</u>		Acentamiento meta: <u>20 mm</u>		Flujo meta: <u>- cm</u>		Agua de diseño: <u>116,0 L</u>													
Agua de ajuste: <u>7,0 L</u>		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Tipo</th> <th>Dosis (mL)</th> <th>Ajuste (mL)</th> <th>Total (mL)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plastoi 5000</td> <td>2,755</td> <td>0,060</td> <td>2,815</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>						Tipo	Dosis (mL)	Ajuste (mL)	Total (mL)	Plastoi 5000	2,755	0,060	2,815				
Tipo	Dosis (mL)	Ajuste (mL)	Total (mL)																
Plastoi 5000	2,755	0,060	2,815																
Datos día de chorea:																			
<b>Datos de concreto Fresco</b>				<b>Datos ambientales</b>															
Temperatura inicial: <u>30 C</u>		Acentamiento: <u>20 mm</u>		Flujo: <u>- cm</u>		Temperatura de ambiente: <u>24,1 C</u>													
Contenido de aire: <u>- %</u>		Volumen: <u>0,65 m3</u>		<b>Cilindros</b>															
Cantidad (15x30): <u>6</u>				Cantidad (10x20): <u>30</u>															
Datos a 24 horas:																			
Día de falla <u>18/4/2018</u>		Hora de falla <u>02:15</u>																	
<b>Datos de cilindros curados en laboratorio:</b>																			
				<b>Resistencia</b>															
Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de Falla												
AC-CL01	102,48	102,24	8229,06	200,6	24,38	248,6													
AC-CL02	100,99	101,48	8049,17	192,6	23,93	244,0													
AC-CL03	100,63	102,71	8118,50	193,9	23,88	243,5													
						Promedio: 245,4±0,17 kg/cm <sup>2</sup>													
Observaciones: _____																			
<b>Datos de cilindros curados en patio</b>																			
				<b>Resistencia</b>															
Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de Falla												
AC-CL01	102,48	102,24	8229,06	200,6	24,38	248,6													
AC-CL02	100,99	101,48	8049,17	192,6	23,93	244,0													
AC-CL03	100,63	102,71	8118,50	193,9	23,88	243,5													
						Promedio: 245,4±0,17 kg/cm <sup>2</sup>													
Observaciones: _____																			
Datos a 3 días:																			
Día de falla <u>20/4/2018</u>		Hora de falla <u>01:15</u>																	
<b>Datos de cilindros curados en laboratorio:</b>																			
				<b>Resistencia</b>															
Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de Falla												
AC-CL04	103,19	102,25	8287,05	362,5	43,74	446,1	4												

AC-CL05	103,32	102,69	8333,10	337,4	40,49	412,9	2
AC-CL06	103,22	101,82	8254,81	338,5	41,01	418,2	3
					Promedio:		425,7±0,21 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: \_\_\_\_\_

**Datos de cilindros curados en patio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CP04	103,85	103,30	8425,58	319,1	37,87	386,2	3
AC-CP05	101,36	102,71	8176,89	317,6	38,84	396,1	3
AC-CP06	100,63	100,86	7971,44	311,5	39,08	398,5	4
					Promedio:		393,58±0,2 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: \_\_\_\_\_

**Datos a 7 días:**

Día de falla 24/4/2018

Hora de falla 02:30

**Datos de cilindros curados en laboratorio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CL07	102,32	102,48	8235,50	385,2	46,77	476,96	4
AC-CL08	101,13	100,41	7975,40	399,3	50,07	510,54	3
AC-CL09	101,46	101,59	8095,35	443,7	54,81	558,90	4
					Promedio:		515,46±0,23 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: \_\_\_\_\_

**Datos de cilindros curados en patio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CP07	101,71	102,41	8180,90	431,5	52,74	537,85	4
AC-CP08	98,3	101,51	7839,07	371,4	47,38	483,12	1
AC-CP09	101,28	101,38	8064,29	454,2	56,32	574,33	4
					Promedio:		531,77±0,23 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: \_\_\_\_\_

**Datos a 14 días:**

Día de falla 5/1/2018

Hora de falla \_\_\_\_\_

**Datos de cilindros curados en laboratorio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CL010	103,83	104,02	8482,62	512,1	60,37	615,61	3
AC-CL011	101,98	102,68	8224,24	369,7	44,95	458,39	5
AC-CL012	102,55	102,82	8281,40	537,8	64,94	662,21	4
					Promedio:		638,91±0,25 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: AC-CL011 fallo en la corona superior dando una falla menor

**Datos de cilindros curados en patio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CP010	101,21	102,13	8118,50	472,7	58,23	593,73	4
AC-CP011	102,88	103,03	8325,01	534,4	64,19	654,58	
AC-CP012	101,25	101,97	8108,92	489,2	60,33	615,18	
					Promedio:		621,17±0,25 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: \_\_\_\_\_

**Datos a 28 días:**

Día de falla 15/5/2018

Hora de falla \_\_\_\_\_

**Datos de cilindros curados en laboratorio:**

Resistencia

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de Falla
AC-CL013	102,24	101,98	8188,92	357,8	43,69	445,55	
AC-CL014	104,32	104,18	8535,76	594,9	69,70	710,69	
AC-CL015	103,01	102,19	8267,70	571,4	69,11	704,75	
						Promedio:	707,72±0,26 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: AC-CL013 fallo en la corona superior dando una falla menor

**Datos de cilindros curados en patio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CP013	101,79	101,78	8136,87	534,3	65,66	669,59	
AC-CP014	102,18	100,87	8095,35	531,9	65,70	670,00	
AC-CP015	100,62	101,03	7984,11	522,2	65,40	666,95	
						Promedio:	668,85±0,26 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: fallas muy plasticas

## Hoja de Recolecion de Datos:

Proyecto: Trabajo de Graduación Andrés Carranza

Mezcla: SCC 700

Numero de ficha: C1804-09068

Dia de chorea: 4/9/2018

Hora de chorea: 04:40

### Propiedades de la mezcla

Tipo de cemento: UG-AR RTCR383

#### Aditivo

Cantidad: 364 kg

Tipo	Dosis (mL)	Ajuste (mL)	Total (mL)
Plastol 5000	5,003	0,076	5,079

Acentamiento meta: - mm

Flujo meta: 75 cm

Agua de diseño: 126,0 L

Agua de ajuste 0,0 L

### Datos día de chorea:

#### Datos de concreto Fresco

#### Datos ambientales

Temperatura inicial: 32,4 C

Temperatura de ambiente: 24,1 C

Acentamiento: - mm

#### Cilindros

Flujo: 71 cm

Cantidad (15x30): 6

Contenido de aire: - %

Cantidad (10x20): 30

Volumen: 0,65 m3

### Datos a 24 horas:

Dia de falla 18/4/2018

Hora de falla 02:15

#### Datos de cilindros curados en laboratorio:

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CL01	102,67	102,42	8258,84	296,7	35,93	366,3	1
AC-CL02	101,98	102,63	8220,22	307,1	37,36	381,0	1
AC-CL03	102,34	102,11	8207,37	304,9	37,15	378,8	1
					Promedio: 375,37±0,2 kg/cm <sup>2</sup>		

Obcervaciones: \_\_\_\_\_

#### Datos de cilindros curados en patio

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CL01	102,67	102,42	8258,84	296,7	35,93	366,3	1
AC-CL02	101,98	102,63	8220,22	307,1	37,36	381,0	1
AC-CL03	102,34	102,11	8207,37	304,9	37,15	378,8	1
					Promedio: 375,37±0,2 kg/cm <sup>2</sup>		

Obcervaciones: \_\_\_\_\_

### Datos a 3 días:

Dia de falla 4/12/2018

Hora de falla 04:05

#### Datos de cilindros curados en laboratorio:

Resistencia

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de Falla
AC-CL04	102,30	103,02	8277,37	392,4	47,41	483,4	2
AC-CL05	103,03	102,92	8328,24	412,1	49,48	504,6	4
AC-CL06	101,65	102,53	8185,71	382,0	46,67	475,9	4
						Promedio: 487,95±0,22 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Datos de cilindros curados en patio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CP04	102,68	102,32	8251,59	403,2	48,86	498,3	2
AC-CP05	102,75	102,25	8251,59	408,4	49,49	504,7	4
AC-CP06	102,29	101,97	8192,12	399,2	48,73	496,9	4
						Promedio: 499,96±0,22 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Datos a 7 días:**

Día de falla 16/4/2018 Hora de falla 03:30

**Datos de cilindros curados en laboratorio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CL07	101,33	102,11	8126,48	447,7	55,09	561,78	2
AC-CL08	104,39	104,20	8543,13	509,5	59,64	608,15	1
AC-CL09	101,08	100,98	8016,61	466,1	58,14	592,88	4
						Promedio: 587,6±0,24 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Datos de cilindros curados en patio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CP07	102,42	102,97	8283,02	501,0	60,49	616,78	4
AC-CP08	102,37	103,49	8320,97	507,7	61,01	622,18	4
AC-CP09	103,48	103,07	8376,84	534,2	63,77	650,29	3
						Promedio: 629,75±0,24 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Datos a 14 días:**

Día de falla 23/4/2018 Hora de falla 03:15

**Datos de cilindros curados en laboratorio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CL010	102,72	103,71	8367,11	538,5	64,36	656,28	1
AC-CL011	100,13	99,5	7824,95	503,5	64,35	656,14	4
AC-CL012	101,52	101,42	8086,59	552,7	68,35	696,96	4
						Promedio: 669,79±0,26 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Datos de cilindros curados en patio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CP010	99,30	102,00	7956,42	530,2	66,64	679,52	4
AC-CP011	101,52	102,39	8164,07	523,7	64,15	654,12	4
AC-CP012	100,61	101,17	7994,40	489,5	61,23	624,38	3
						Promedio: 652,67±0,26 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: CP-L14-3 falla muy baja  
 \_\_\_\_\_

**Datos a 28 días:**

Día de falla 5/7/2018

Hora de falla 02:30

**Datos de cilindros curados en laboratorio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CL013	104,24	103,8	8498,13	646,0	76,02	775,16	4
AC-CL014	101,57	102,32	8162,47	606,7	74,33	757,94	4
AC-CL015	100,98	101,88	8080,21	623,0	77,10	786,22	1
						Promedio:	773,11±0,28 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Datos de cilindros curados en patio:**

Cilindro	D1 (cm)	D2 (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia		Tipo de Falla
					(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	
AC-CP013	102,32	102,58	8243,54	633,8	76,88	784,01	4
AC-CP014	101,36	102,21	8136,87	572,2	70,32	717,09	4
AC-CP015	102,66	100,97	8141,67	608,6	74,75	762,25	4
						Promedio:	754,45±0,27 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: fallas muy plasticas  
\_\_\_\_\_



## F. Cotización de SmartPrecast



### Quote

**Shipping & Insurance Terms:** FOB Origin  
**Payment Terms:** Full Payment in Advance  
**Account Information:**  
 RBC Royal Bank  
 90 Sparks St. 2nd Floor, Ottawa, ON, K1P5T6  
 Bank Code: 003  
 Swift Code: ROYCCAT2  
 Transit #: 00006  
 Account #: 4001673

Account Manager Carlos Ilingworth  
 Phone (613) 240-7451  
 Fax (613) 280-1544

Created Date 24/01/2018  
 Expiration Date 24/02/2018  
 Quote Number D18-A133

#### Customer Information

Customer Name Andres Carranza      Quote To Name Productos de Concreto S.A.  
 Customer ID PRO01  
 Email acarranza@iecainternacional.com  
 Phone 50688987755

Product Code	Product	Product description	Quantity	Sales Price USD	Total Price USD
900118	SmartPrecast™-L Sensor	Wireless concrete temperature/maturity logger with 4 x 3-m (10') temperature sensors	10.00	\$140.00	\$1,400.00
900117	SmartPrecast™-S Sensor	Wireless concrete temperature/maturity logger with 4 x 40-cm (16") temperature sensors	20.00	\$120.00	\$2,400.00

Subtotal \$3,800.00  
 Grand Total USD \$3,800.00

#### Additional Information

- Delivery will be from stock and made within 1-2 weeks.
- Shipping and handling costs are not included in this quote.
- Please reference our quote number on your purchase order.
- The product is covered under Giatec's warranty for 1 year from the date of purchase.
- All transactions associated with this document are subject to Giatec's current active standard terms and conditions of sale at the time of quotation, please see <http://www.giatecscientific.com/terms-and-conditions/>

#### Contact Information

Giatec Scientific Inc.  
 245 Menten Place, Suite 300  
 Ottawa, ON, K2H 9E8, Canada  
 Email: sales@giatecscientific.com  
 Tel: (613) 240-7451  
 Fax: (613) 280-1544  
 Web: www.giatec.ca