



**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A EDADES  
TEMPRANAS DEL CONCRETO EN PLACAS MACIZAS USANDO EL  
ACONDICIONAMIENTO DE TEMPERATURA**

**Presentado por:**

**EDICSON GABRIEL GARCÍA MATEUS**

**Trabajo de grado presentado a la**

Maestría de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Pontificia Universidad Javeriana

Bogotá, Colombia, Mayo 2018

## **Aprobación**

El Trabajo de grado de maestría con título Metodología para determinar la resistencia a edades tempranas del concreto en placas macizas usando el acondicionamiento de temperatura, desarrollado por el estudiante Edicson Gabriel García Mateus, en cumplimiento de uno de los requisitos dispuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de Magister en ingeniería Civil, fue aprobado por:

**I.C. M.Sc. Ph.D. Yezid Alexander Alvarado Vargas**  
Director  
Departamento de Ingeniería Civil  
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Jurado 1

**I.C. M.Sc. Luis Ernesto Erazo**  
Universidad Nacional de Colombia

Jurado 2

**I.C. M.Sc. Ph.D. Fabián Augusto Lamus Báez**  
Departamento de Ingeniería Civil  
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Aprobado en Bogotá, Mayo de 2018

## Dedicatoria

La vida siempre te dará lo que tú necesites, solo tienes que trabajar para ello, con disciplina y orden, así como lo he hecho yo en cada esfuerzo impuesto en esta investigación, en cada letra y cada pensamiento. Todo esto es dedicado a ti hijo, ojalá nazcas pronto y crezcas lento para poder disfrutarte

A la mujer que ha sido mi fortaleza, a ti esposa mía

## Resumen

En el presente trabajo se determinó el nivel de exactitud de la metodología de acondicionamiento de temperatura con relación a la evolución de resistencias del concreto a edades tempranas en placas macizas. Para esto se verificó el comportamiento y desarrollo de las temperaturas del concreto y se determinó la evolución de la resistencia a 1, 2, 3 y 7 días en especímenes de concreto curados con el acondicionamiento de temperatura, finalmente se compararon los resultados de resistencia de estos, con el ensayo de núcleos extraídos en las placas de espesores de 0.10, 0.12 y 0.15 metros. El nivel de exactitud de la metodología arrojó que la estimación de la resistencia está por encima del 90%, habiendo realizado la comparación entre núcleos extraídos y los cilindros curados con acondicionamiento. A partir de esta metodología se pudo establecer una alternativa para determinar la resistencia del concreto en placas macizas in situ para sistemas de construcción industrializada.

## Palabras clave

Resistencia a compresión  
Desarrollo de temperatura  
Temperatura de curado  
Acondicionamiento de temperatura de curado  
Desarrollo de resistencia in situ  
Placas de concreto

## **Abstract**

In this research thesis, the level of accuracy of methodology of temperature conditioning was determined in relation to strength evolution in slabs concrete at early ages. For this purpose, the behavior and development of concrete temperatures were verified, and the strength evolution in cured concrete samples, at 1, 2, 3 and 7 days with temperature match curing, was determined. Finally, these strength results were compared with extracted cores in slabs with thicknesses of 0.1, 0.12 and 0.15 meters. The level of methodology's accuracy showed that the estimation of strength is above 90% when doing the comparison between cores and cured concrete samples with temperature match curing. Based on this methodology, an alternative is established to determine the strength of concrete in slabs in situ for industrialized construction systems.

## **Keywords**

Compressive strength  
Temperature Development  
Curing temperatura  
Temperature match curing  
In situ strength development  
Concrete slabs

# Índice general

	Pág.
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>13</b>
1.1. Objetivo general .....	18
1.2. Objetivos específicos.....	18
1.3. Contenido del trabajo.....	19
<b>Capítulo 2. Antecedentes y revisión bibliográfica .....</b>	<b>21</b>
2.1. Exactitud .....	22
2.2. Control térmico del concreto o calorimetría.....	22
2.3. Curado con acondicionamiento de temperatura .....	22
2.4. Resistencia a la compresión del concreto .....	23
2.5. Temperatura e hidratación del cemento .....	24
2.6. Propiedades térmicas del concreto .....	24
2.7. Madurez del concreto .....	25
2.8. Temperatura y curado del concreto.....	26
2.9. Sistemas industrializados de construcción en concreto .....	29
2.10. Concreto para sistemas industrializados .....	30
<b>Capítulo 3. Materiales y métodos.....</b>	<b>33</b>
3.1. Materiales.....	33
3.1.1. Diseño de mezcla.....	34
3.1.1.1. Concreto tipo industrializado 28 MPa .....	34
3.1.2. Planta de fabricación de concreto .....	35
3.1.3. Sensor de temperatura - Termocuplas .....	36
3.1.4. Software y equipo de adquisición de datos .....	37
3.1.5. Estación meteorológica doméstica inalámbrica .....	38
3.1.6. Sistema de perforación para concreto – extractor de núcleos .....	39
3.1.7. Máquina de ensayos de compresión .....	40
3.1.8. Cámara para ensayo de acondicionamiento de temperatura.....	40
3.2. Metodología de trabajo.....	41
3.2.1. Etapa inicial: Conceptualización y definición de parámetros .....	44
3.2.1.1. Sistema TMC Temperature Match Curing .....	44
3.2.1.2. Cantidad, tamaño y espesor de placas.....	47

3.2.1.3. Tiempo de medición de temperaturas .....	48
3.2.2. Etapa Experimental.....	50
3.2.2.1. Construcción de placas .....	51
3.2.2.2. Medición de temperaturas y humedad relativa .....	53
3.2.2.3. Extracción de núcleos .....	55
3.2.2.4. Resistencia a la compresión de núcleos y muestras cilíndricas.....	57
3.2.2.5. Acondicionamiento de temperatura de curado de muestras cilíndricas	59
3.2.3. Etapa de Análisis .....	60
<b>Capítulo 4. Resultados, análisis y discusión .....</b>	<b>61</b>
4.1. Desarrollo de temperaturas y humedad relativa .....	61
4.2. Desarrollo de resistencia a la compresión.....	68
4.3. Ajuste de resistencia de núcleos.....	71
4.4. Curado con acondicionamiento de temperatura .....	72
4.4.1. Estimación de resistencias y curva óptima por madurez.....	73
4.5. Resistencia de muestras curadas con acondicionamiento de temperatura .....	78
4.6. Exactitud y comparación de resultados de resistencia.....	79
<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>	<b>87</b>
<b>Capítulo 6. Trabajo futuro de investigación .....</b>	<b>91</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>93</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>99</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>101</b>

## Índice de figuras

	Pág.
Fig. 1. Sistema TMC. Fuente (Sofi, Mendis y Baweja 2012).....	23
Fig. 2. Desarrollo de resistencia a la compresión bajo diferentes temperaturas de curado. Fuente (Yania y Jawad 2006).....	26
Fig. 3. Desarrollo de temperaturas en diferentes alturas de una placa maciza de concreto. Fuente (Sofi, Mendis y Baweja 2012) .....	27
Fig. 4. Formaleta para sistema industrializado mano portable. Fuente (Forsa 2017) .....	30
Fig. 5. Ensayo para determinar el asentamiento del concreto según ASTM C143-90 .....	35
Fig. 6. Planta de concreto Altron AM-25 / 2017.....	36
Fig. 7 Termocupla Omega Serie 5SRTC .....	37
Fig. 8. Equipo Ingemoduler e interfaz de medición gráfica del software .....	38
Fig. 9. Estación meteorológica domestica inalámbrica.....	38
Fig. 10. Sistema de perforación para concreto con columna DD 150-U.....	39
Fig. 11. Máquina de ensayos a compresión Automax.....	40
Fig. 12. Cámara climática para el curado con acondicionamiento de temperatura .	41
Fig. 13. Esquema del desarrollo metodológico .....	43
Fig. 14 Sistema TMC con tanque de curado. Fuente (Soutsos, Hatzitheodorou y Kwasny 2016).....	45
Fig. 15 Esquema de montaje para sistema TMC utilizado .....	46
Fig. 16 Desarrollo de resistencia a compresión in situ para los proyectos II, III y IV .....	50
Fig. 17. Proceso de construcción de placas de concreto .....	52
Fig. 18. Elemento para instalación de termocuplas .....	53
Fig. 19. Instalación de termocuplas en placas .....	54
Fig. 20. Instrumentación de cilindro .....	55

Fig. 21. Extracción de núcleos .....	55
Fig. 22. Núcleo refrentado y con acondicionamiento de humedad listo para ensayo	56
Fig. 23. Fabricación de cilindros de 50 mm x 100 mm .....	57
Fig. 24. Curado de muestras cilíndricas, (a) isotérmico (b) in situ .....	58
Fig. 25. Ensayo a compresión de muestra cilíndrica y núcleo.....	58
Fig. 26. Cilindro refrentado listo para ensayo .....	59
Fig. 27. Curado de muestras cilíndricas en cámara climática .....	59
Fig. 28. Desarrollo de temperaturas y humedades relativas en la placa de 0.10 m	64
Fig. 29. Desarrollo de temperaturas y humedades relativas en la placa de 0.12 m	65
Fig. 30. Desarrollo de temperaturas y humedades relativas en la placa de 0,15 m	66
Fig. 31. Evolución de resistencias de núcleos en el punto PCB y estimación por madurez – placa 0.10m .....	76
Fig. 32. Evolución de resistencias de núcleos en el punto PCB y estimación por madurez – placa 0.12m .....	76
Fig. 33. Evolución de resistencias de núcleos en el punto PCB y estimación por madurez – placa 0.15m .....	77
Fig. 34. Curvas de temperatura escogida para el acondicionamiento de temperatura .....	78
Fig. 35. Desarrollo de resistencias placa 0.10 m.....	82
Fig. 36. Desarrollo de resistencias placa 0.12 m.....	82
Fig. 37. Desarrollo de resistencias placa 0.15 m.....	83

## Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas del concreto para sistemas industrializados (Diaz , y otros 2003) .....	31
Tabla 2. Diseño de mezcla para un concreto tipo industrializado de 28 MPa .....	34
Tabla 3. Nomenclatura de puntos de instrumentación .....	47
Tabla 4. Características de proyectos constructivos revisados .....	48
Tabla 5. Histórico de resistencia a compresión para el concreto tipo industrializado de 28 MPa .....	49
Tabla 6. Proceso de construcción de placas de concreto .....	51
Tabla 7. Distancias de ubicación de termocuplas en espesor .....	54
Tabla 8. Logística de extracción de núcleos .....	56
Tabla 9. Temperaturas máximas y mínimas en placas de concreto .....	62
Tabla 10. Resistencia en MPa a compresión de cilindros y núcleos – placa 0.10 m..	68
Tabla 11. Resistencia en MPa a compresión de cilindros y núcleos – placa 0.12 m..	68
Tabla 12. Resistencia en MPa a compresión de cilindros y núcleos – placa 0.15 m..	69
Tabla 13. Factores de corrección para ajuste de resistencia de núcleos .....	71
Tabla 14. Resistencia corregida de núcleos – placa 0.10 m.....	72
Tabla 15. Resistencia corregida de núcleos – placa 0.12 m.....	72
Tabla 16. Resistencia corregida de núcleos – placa 0.15 m.....	72
Tabla 17. Resistencias en MPa a compresión estimadas por madurez y errores relativos .....	75
Tabla 18. Resistencia a compresión en MPa de cilindros curados con acondicionamiento de temperatura .....	79
Tabla 19. Estimación de errores relativos con relación a núcleos – placa 0.10 m.....	80
Tabla 20. Estimación de errores relativos con relación a núcleos – placa 0.12 m.....	81
Tabla 21. Estimación de errores relativos con relación a núcleos – placa 0.15 m....	81

Tabla 22. Niveles de exactitud de las resistencias del concreto con respecto a los núcleos ..... 84

Tabla 23. Nivel de exactitud promedio con respecto a los núcleos..... 84



## Capítulo 1. Introducción

La oferta de vivienda en Colombia durante los últimos 6 años se ha incrementado de manera significativa. Según la Cámara Colombiana de la Construcción (Camacol) para el año 2010 las unidades de vivienda ofertadas fueron de 54.101 unidades y para el año 2016 el stock estaba sobre las 108.000 unidades. Esto es el reflejo de cómo la construcción, desde el punto de vista de uno solo de sus componentes, se convierte en referente al valor agregado de la economía, destacándose para el año 2016 con un crecimiento de 5,8% (DANE 2016).

Dados los parámetros anteriores, en los cuales se demuestra dentro de un entorno general la importancia de la construcción para el desarrollo económico de Colombia, se debe deducir cómo el hormigón o concreto hace parte fundamental de las actividades diarias de la construcción, puesto que es uno de los insumos más importantes para el sector de la construcción (DANE 2016). Durante los últimos cinco años, la producción de este insumo en Colombia ha generado alrededor de 38,5 millones de m<sup>3</sup> de concreto y tan solo para el año 2016 el volumen fue de 7,7 millones de m<sup>3</sup>. La importancia de este insumo dentro de la construcción de vivienda, edificaciones e infraestructura, es vital pues su consumo lo convierte en una de las operaciones críticas dentro de la construcción de elementos estructurales de gran magnitud, que requieren un control de calidad eficaz y continuo.

En las obras donde se construyen placas in situ en pisos sucesivos, la aceleración de los tiempos de construcción y la reducción de los costos por m<sup>2</sup> basados en la reutilización, tan pronto como sea posible, de la totalidad o la mayor parte de los componentes utilizados en el proceso (Gasch, Alvarado, & Calderón, 2012) es fundamental para la puesta en servicio de las placas, puesto que el tiempo que pueda reducirse en mantener formaleta atrapada significa una reducción de costos importante; en la ciudad de Bogotá se construyeron 7'618.730 millones de m<sup>2</sup> de placas de entrepiso en la última década (DANE 2017), por lo cual es importante recuperar

en el menor tiempo posible la formaleta, puntales y cimbras en placas, dependiendo del sistema constructivo; todo lo anterior evidencia la importancia de conocer en términos mecánicos la calidad del concreto, teniendo en cuenta las características particulares de la estructura, tipo de concreto, cargas de diseño y condiciones ambientales como temperatura y humedad (Alvarado et al., 2009).

El desarrollo y la utilización de diferentes tipos de sistemas constructivos para la concepción y ejecución de proyectos de construcción que utilicen el concreto como insumo principal, requieren que el conocimiento de la regularidad de fabricación y los componentes de este, para la determinación de las propiedades sea efectiva y la estimación precisa de las mismas. De acuerdo con Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010, NSR-10, la resistencia a la compresión del concreto es la propiedad sobre la cual se evalúa y se define la aceptación en términos de calidad del mismo; los componentes, las condiciones de fabricación, exposición al ambiente y la capacidad de resistir cargas bajo la evolución de la madurez de las mezclas de concreto son el factor fundamental que enmarca la importancia de la utilización de este producto, en términos estructurales.

La determinación experimental de las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión y la aplicación de coeficientes de seguridad a los materiales son proporcionados por las normas actuales para obtener la aceptación (Vázquez-Herrero, Martínez-Lage, & Sánchez-Tembleque, 2012), estos son métodos convencionales utilizados para la determinación o estimación de la resistencia y la obtención de seguridad en la estructura durante la construcción en términos de cargas calculadas y reales.

La resistencia del concreto se determina bajo procedimientos normalizados, que pueden ser destructivos pero en gran mayoría “no destructivos”, este término se da a todas las pruebas que no dañan ni afectan el comportamiento estructural de los elementos en condiciones aceptables (Benaicha, Burtschell, & Alaoui, 2016), lo cual reduce costos en términos de reparación y evaluación de las estructuras. En la actualidad, la determinación de la resistencia del concreto a edades tempranas es esencial en la construcción, puesto que el retiro o la eliminación de cimbras, formaletas o encofrados en un tiempo mínimo establecido, respetando las condiciones estructurales calculadas (resistencia mínima), constituyen una de las operaciones críticas en la construcción (Benaicha et al., 2016).

Por otro lado, los métodos “no destructivos” pueden ser ejecutados in situ o en laboratorio y la estimación de las resistencias por métodos convencionales debe usarse con reservas, pues no son exactas, ya que no tienen en cuenta el desarrollo de las propiedades térmicas del concreto. De acuerdo con la literatura, el desarrollo de la

resistencia del concreto depende en gran medida de la historia de la temperatura durante el tiempo una vez es vaciado el elemento y además de la temperatura de curado (Yikici & Chen, 2015). De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana, NTC-550, (Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra), el curado de los especímenes de concreto elaborados para la caracterización de la colocación de concreto de los elementos estructurales, debe realizarse en laboratorio a una temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , el (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010) NSR-10 establece que el concreto debe mantenerse a una temperatura por encima de los  $10^{\circ}\text{C}$  y en condiciones de humedad por lo menos durante los primeros 7 días después de la colocación. Las comparaciones, en general, revelan que las muestras curadas y ensayadas de acuerdo con los métodos estándar se pueden utilizar para estimar el desarrollo de la resistencia del concreto con algunas reservas (Sofi, Mendis, & Baweja, 2012).

Las reservas se dan porque las condiciones de curado de las estructuras no tienen el mismo control que los especímenes realizados en laboratorio, la ACI 318-02 afirma que los especímenes cilíndricos elaborados del mismo lote de concreto deben ser almacenados y curados en condiciones análogas a las del concreto in situ, para asegurar que las condiciones sean similares (Sofi et al., 2012), lo anterior lo describe también el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010, NSR-10, afirmando además, que los procedimientos para curar el concreto deben mejorarse cuando la resistencia de los especímenes curados en obra a la edad de ensayo establecida para determinar  $f_c$  sea inferior al 85% de la resistencia de los cilindros curados en laboratorio.

La importancia del curado y el desarrollo de temperaturas en el concreto, durante la determinación de la resistencia a compresión, confirman que el comportamiento estructural se puede afectar negativamente cuando, al interior o exterior de los elementos de concreto, la temperatura a edades tempranas ha sufrido cambios por encima de los  $70^{\circ}\text{C}$  y por debajo de los  $5^{\circ}\text{C}$ , o ha tenido variaciones fuertes superiores a  $20^{\circ}\text{C}$  (Vázquez-Herrero et al., 2012); las condiciones de certeza, de los valores determinados de resistencias en el concreto a edades tempranas, dados los cambios de temperatura y las variables térmicas en nuestro país, donde las temperaturas pueden fluctuar entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $39^{\circ}\text{C}$ , dependiendo de la zona, permiten establecer la importancia que existe en el correcto curado de las estructuras y por consiguiente el cálculo real de las resistencias, teniendo en cuenta la temperatura al interior y al exterior de la matriz de concreto y la edad del mismo.

En el concreto la hidratación de las partículas de cemento es un fenómeno complejo que depende de las características de desarrollo de la temperatura y la edad, los cambios significativos en la cinética de las reacciones entre estos dos componentes,

la porosidad y la microestructura se ven afectadas positiva o negativamente cuando los valores de temperatura aumentan o disminuyen. La temperatura de curado tiene un papel importante en el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto. El incremento de la temperatura aumenta el desarrollo de la resistencia a edades tempranas, pero genera un impacto negativo en la resistencia por encima de los 7 días (Boubekeur, Ezziane, & Kadri, 2014).

La determinación de la resistencia a compresión real, para placas o losas de concreto, se convierte en una de las actividades importantes en el desarrollo de la construcción de estructuras, teniendo en cuenta que se requiere un tiempo necesario mínimo (edad mínima o edad temprana) para que el concreto pueda soportar su propio peso (Santilli, Teixeira, & Puente, 2015). Los fallos como fisuras, grietas o colapso en las placas se pueden presentar si la determinación de las propiedades de resistencia del concreto a edades tempranas a fin de evaluar su comportamiento bajo carga no tiene en cuenta las condiciones ambientales (Sofi, Mendis, Baweja, & Mak, 2014). Los métodos para determinar la resistencia real del concreto en placas, métodos convencionales con el propósito de establecer tiempos necesarios mínimos y mantener la seguridad estructural, se desarrollan con el fin de conocer la edad mínima para la eliminación de las cimbras y más adelante para el retiro del apuntalamiento, así como para la transferencia de cargas, siempre teniendo en cuenta la temperatura y la duración del tiempo de curado (Vázquez-Herrero et al., 2012).

La resistencia del concreto determinada sin tener en cuenta la fluctuación de temperaturas no es real, puesto que a temprana edad en el momento de la aplicación de cargas sobre especímenes y sobre placas, la incertidumbre del clima y los cambios de temperatura influyen en el proceso de curado del concreto (Sofi et al., 2014), por lo tanto las propiedades de resistencia del concreto a edades tempranas en el momento de la aplicación de cargas están afectadas por los cambios de temperatura.

La temperatura de una placa de concreto está influenciada por factores tales como la temperatura del concreto fresco (temperatura inicial), el calor de hidratación (que depende del tipo y calidad de aglutinante), las condiciones ambientales, las propiedades geométricas y el encofrado o la formaleta (Sofi et al., 2014), por lo cual al realizar la determinación de la resistencia del concreto sin tener presente la importancia de lo anterior los datos obtenidos no son reales en términos de seguridad, puesto que en la mayoría de los casos se observa que los tiempos mínimos se establecen sobre la base de comparación de resistencias determinadas a través de la rotura de especímenes cilíndricos curados in situ o bajo condiciones normalizadas, lo cual es un enfoque conceptualmente incorrecto y estructuralmente inseguro (Vázquez-Herrero et al., 2012), pues la tendencia común en la tecnología del concreto es el uso de la resistencia a la compresión como una medida cuantitativa, sin tener en cuenta

los parámetros de otras propiedades como las térmicas (Abd elaty, Metwally abd allah, 2014) .

Por esta razón, el control real de la resistencia a edades tempranas en placas de concreto in situ es un elemento clave que podría afectar a la productividad y a la seguridad de la estructura (Galobardes, Cavalaro, Goodier, Austin, & Rueda, 2015). A edades posteriores el efecto de la temperatura en el concreto y la temperatura de curado en la resistencia a la compresión del concreto disminuye con el aumento de la edad (Boubekeur et al., 2014); convirtiendo la necesidad de establecer la resistencia a edades tempranas en un factor importante en la seguridad estructural, los costos de obra y los tiempos de ejecución, teniendo en cuenta los factores ambientales de temperatura y humedad en el concreto y en el curado del mismo.

La resistencia real in situ de placas de concreto, también puede determinarse por métodos destructivos, el más común es la extracción de núcleos en las placas; los resultados dependen de la geometría y los espesores de la placa pues la resistencia del concreto es más alta en las zonas inferiores internas de los elementos que en las zonas superiores (Yikici & Chen, 2015), encontrándose en la literatura que los resultados de resistencia a la compresión de núcleos tomados se encuentran dentro del +/- 15% de la resistencia determinada por la rotura de especímenes cilíndricos en condiciones de temperatura y humedad estables. La extracción de núcleos, aunque efectiva para determinar la resistencia real del concreto, se convierte en un sobre costo por las reparaciones y equipos que hay que utilizar y está además influenciada por la compactación por vibrado del concreto al momento de la colocación (Yikici & Chen, 2015).

Bajo la necesidad expuesta anteriormente, conocer la resistencia real del concreto, se presenta la oportunidad de usar temperature match curing (TMC) o acondicionamiento de temperatura de curado en especímenes cilíndricos, pues al existir el problema técnico en la industria de la construcción para la determinación de la resistencia in situ (Sofi et al., 2012), verificar el desarrollo de temperaturas reales dentro del concreto y repetirlas en los especímenes cilíndricos puede representar un dato más real de la resistencia in situ, al someter al concreto de prueba al desarrollo de temperaturas y condiciones de curado reales. Investigaciones recientes indican que la concordancia entre núcleos extraídos en elementos estructurales in situ y muestras curadas bajo un sistema TMC, tienen errores globales de menos del 1% (Sofi et al., 2012).

Teniendo en cuenta que se requiere la determinación precisa de la resistencia in situ antes de la aplicación de una carga, el retiro de cimbras, formaletas o apuntalamientos en una placa de concreto y en vista de la inexactitud o variación

presentada en los valores cuantitativos de resistencia determinados a través de métodos normalizados tradicionales destructivos y no destructivos, sustentada por la literatura reciente, se plantea la necesidad de determinar la resistencia de placas de concreto bajo la utilización de una metodología basada en los parámetros de la temperature match curing (TMC) o acondicionamiento de temperatura, en donde se tenga en cuenta la historia de temperaturas dentro de placas de concreto, planteando como pregunta de investigación si la utilización del acondicionamiento de temperatura dentro del concreto, puede determinar la resistencia a la compresión real del concreto, en placas macizas de concreto con diferentes espesores con un nivel de exactitud dado, de esta manera, ¿Con qué nivel de exactitud puede la metodología con acondicionamiento de temperatura representar el desarrollo de la resistencia in situ de placas de concreto macizas a edades tempranas?.

Por tanto, utilizando una metodología basada en temperature match curing o acondicionamiento de temperatura se puede determinar el desarrollo de la resistencia in situ de placas de concreto macizas a edades tempranas con exactitud y su uso puede servir para fines de seguridad estructural.

### **1.1. Objetivo general**

Determinar el nivel de exactitud de la metodología de acondicionamiento de temperatura con relación a la evolución de resistencias del concreto a edades tempranas en placas macizas.

### **1.2. Objetivos específicos**

Verificar el comportamiento y desarrollo de las temperaturas del concreto a edades tempranas en placas macizas.

Determinar la evolución de la resistencia de especímenes de concreto a edades tempranas curados con el acondicionamiento de temperatura.

Comparar los resultados de resistencia de especímenes curados con el acondicionamiento de temperatura, con núcleos extraídos de placas macizas.

### 1.3. Contenido del trabajo

El presente trabajo contiene 6 capítulos, los cuales se desarrollaron con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, el contenido en términos generales se describe a continuación:

- a. Capítulo 1. Introducción: contiene el preámbulo de la investigación, se desarrolla la formulación del problema, la justificación y los objetivos del trabajo, se da la importancia del desarrollo de las actividades para el cumplimiento de los objetivos.
- b. Capítulo 2. Estado del arte y antecedentes: en esta parte se describen los conceptos importantes sobre los que se fundamenta la investigación, además se resumen los antecedentes de investigaciones con conceptos similares y la relevancia en relación con los objetivos de la investigación.
- c. Capítulo 3. Materiales y métodos: se describen en este apartado los materiales que se utilizaron en la investigación y los equipos para el desarrollo de la metodología de trabajo, se detallan las actividades ejecutadas para el cumplimiento de los objetivos.
- d. Capítulo 4. Resultados, análisis y discusión: contiene el análisis y la discusión de los valores obtenidos en las actividades, mediciones y ensayos realizados, y la similitud o diferencias existentes con relación a los antecedentes descritos en el capítulo 2.
- e. Capítulo 5. Conclusiones: describen los hallazgos más relevantes en el desarrollo de la metodología y su pertinencia con los objetivos propuestos.
- f. Capítulo 6. Trabajo futuro de investigación: se describen las actividades futuras que ayudarían al mejoramiento de los sesgos encontrados durante la ejecución de las actividades y que no son cubiertos por otros autores.



## Capítulo 2. Antecedentes y revisión bibliográfica

En la última década, en la ciudad de Bogotá se han construido 34'266.346 millones de m<sup>2</sup> de placas de entrepiso (DANE 2017) para edificaciones con sistemas constructivos diferentes, tales como mampostería estructural y sistemas industrializados, para este último tipo de sistema, en el mismo rango de tiempo, se construyeron 7'618.730 millones de m<sup>2</sup> de placas de entrepiso.

Dado el planteamiento del problema, donde se justifica la importancia de conocer con certeza la resistencia a la compresión del concreto con el cual se fabrica este gran número de m<sup>2</sup> de placas y entendiendo este parámetro como la propiedad sobre la cual se evalúa y se define la aceptación en términos no solo de calidad del mismo sino también en términos de seguridad estructural.

Desde el punto de vista de la seguridad estructural y la calidad del concreto, la determinación experimental de la resistencia a la compresión y la aplicación de esta, a la definición de los tiempos de construcción bajo la utilización y entendimiento de parámetros, propiedades y métodos convencionales utilizados para tal fin, anexos al correcto aprovechamiento del concreto a edades tempranas, como lo son, la temperatura y la hidratación del cemento, las propiedades térmicas, la madurez del concreto, el control térmico y curado del concreto bajo el acondicionamiento de temperatura y la resistencia a la compresión, los cuales serán descritos a continuación.

## **2.1. Exactitud**

Según la ISO 5725-1, la exactitud de un método se refiere a la aceptación de un valor como verdadero y qué tan cerca o lejos se encuentra la medición realizada a este valor.

Por tanto la proximidad de los resultados medidos o estimados definirá la exactitud de la metodología, sin embargo, este término está ligado a los posibles errores o sesgos de las mediciones o a la precisión de los equipos utilizados.

## **2.2. Control térmico del concreto o calorimetría**

El monitoreo de las temperaturas dentro de la matriz del concreto desde uno o varios puntos determinados, para la verificación del desarrollo de las temperaturas dentro del elemento, se conoce como control térmico del concreto. En la ASTM C1074 y la NTC-3756 (Procedimiento para estimar la resistencia del concreto por el método de la madurez) este procedimiento se lleva a cabo con sistemas de monitoreo diseñados de acuerdo a las necesidades del proyecto, los dispositivos aceptados incluyen termocuplas (sensores de medición de temperatura) conectados a un ordenador para el registro digital de los datos

## **2.3. Curado con acondicionamiento de temperatura**

Existe un problema técnico importante en la industria de la construcción, en la cual no existen métodos estándar para la estimación de la resistencia in situ del concreto, (Sofi et al., 2012), el proceso o el sistema TMC consiste en el curado de especímenes cilíndricos de concreto en una cámara que se encuentra a la misma temperatura que el concreto, en un punto seleccionado. Este sistema puede construirse para que el desarrollo de las temperaturas dentro del concreto se traslade en tiempo real a los especímenes de concreto o se realice posteriormente (Mengxiao, Qiang, & Zhikai, 2015), en la Fig. 1 se describe el esquema general de un sistema TMC.

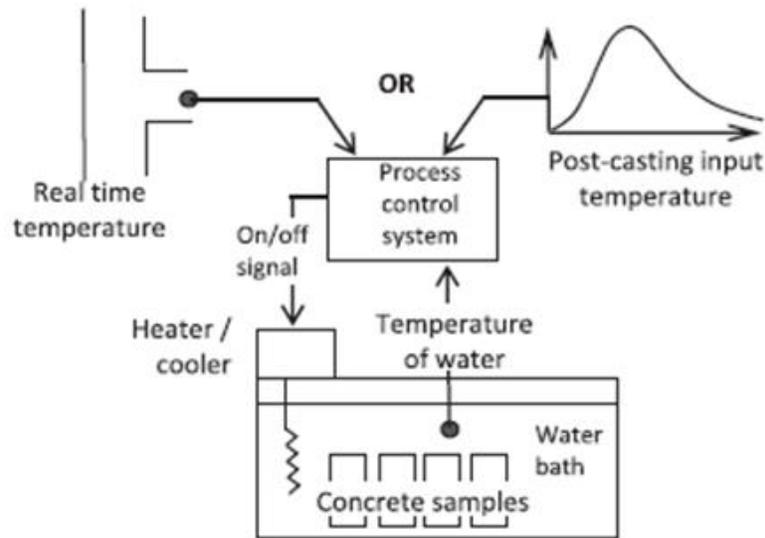


Fig. 1. Sistema TMC. Fuente (Sofi, Mendis y Baweja 2012)

#### 2.4. Resistencia a la compresión del concreto

De acuerdo con Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010, el concreto debe dosificarse para que proporcione una resistencia a la compresión requerida y satisfaga ciertos criterios de durabilidad. La resistencia a la compresión se caracteriza como la capacidad del concreto para soportar una carga axial por unidad de área y se expresa en términos de esfuerzo, en MPa, kg/cm<sup>2</sup> o psi. La resistencia a la compresión del concreto es la propiedad sobre la que se evalúa y se define la aceptación en términos de calidad del mismo. La calidad del concreto en términos de resistencia a la compresión depende a su vez de factores externos tales como la temperatura, la edad y el curado e internos como la cantidad y calidad de los materiales que lo conforman.

El desarrollo de placas macizas en secciones transversales variables, procura el contenido de altos contenidos de materiales aglutinantes, principalmente el cemento, e independiente de la resistencia bajo la cual fueron diseñadas las características mecánicas del concreto, la utilización de altos contenidos de cemento resultan en el desarrollo de altas temperaturas in situ (Mak & Torii, 1995), por tanto, las placas o cualquier tipo de estructuras de concreto masivo tienden a tener una alta elevación de la temperatura interna debido a la hidratación del cemento y a la lenta disipación del calor a edades tempranas (Mengxiao, Wang y Zhikai 2016). Lo anterior

proporciona las características teóricas iniciales a tener en cuenta en el desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto en placas macizas.

## **2.5. Temperatura e hidratación del cemento**

La hidratación de cemento o el proceso de hidratación, inicia cuando el cemento hace contacto con el agua, sus componentes (C3A, C3S, C2S, C4AF) en orden reaccionan a la hidratación generando o liberando calor de hidratación, una vez los estos son hidratados, el acompañamiento de calor provoca un aumento en la temperatura del concreto tal y como lo corroboran (Waller, d'Aloia, Cussigh, & Lecrux, 2004) y (Atiş, 2002); posterior a esto, la formación del producto principal de la hidratación es un hidrato de silicato cálcico, este es una materia no cristalina de composición variable, que forma partículas muy pequeñas, su denominación es C-S-H. La temperatura generada en la reacción, la temperatura de curado y la del ambiente afectan la estructura del C-S-H, modificando las propiedades, la estabilidad y la forma de estos productos de la hidratación (Zhao, Liu, & Jiang, 2015).

Resultados experimentales muestran que la temperatura en la hidratación del cemento afecta en la reducción del tamaño de las partículas y esto es debido a la formación del C-S-H, lo que significa que, tiene una influencia significativa sobre la microestructura del cemento y por tanto, sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto (Bahafid, Ghabezloo, Duc, Faure, & Sulem, 2017). Es importante tener en cuenta para las placas de concreto que la tasa de generación de calor en los componentes del cemento es mayor en las edades tempranas y se genera una gran cantidad de calor en los tres primeros días, con la mayor tasa de liberación de calor, normalmente ocurriendo a lo largo de las primeras 24 horas (Copeland, y otros 1960).

## **2.6. Propiedades térmicas del concreto**

El proceso de hidratación del cemento junto con la generación de calor de hidratación, influye en las propiedades térmicas del concreto y esto es esencial para estudiar el comportamiento del mismo (Schackow et al., 2016). La capacidad calorífica del concreto en concretos comunes varía de 840 a 1260 J / (kg K) (Schackow et al., 2016) y es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura en un grado. La expansión térmica es el cambio fraccional de tamaño por grado de temperatura, es decir, como cambia el tamaño del grano del concreto con el gradiente de temperatura,

esto indica que la resistencia cambia dependiendo de la profundidad o el espesor del elemento (Yikici & Chen, 2015), lo mismo es descrito por (Xu, Wu, Rößler, Wang, & Ludwig, 2017) pues la temperatura ejerce diferentes efectos sobre la estructura de poros.

La conductividad térmica está relacionada con la capacidad del concreto para conducir calor (Schackow et al., 2016), es decir que se puede medir como la velocidad a la que pasa el calor a través del material, esto se relaciona con la inercia térmica y la capacidad calorífica del concreto, pues el grado de lentitud con el que un cuerpo se aproxima a su entorno o al ambiente (Ng, Low, & Tioh, 2011) depende de la difusividad térmica, que es la propiedad que describe la rapidez con la que el concreto reacciona con el cambio de temperatura y la capacidad para difundir el calor en todas direcciones (Schackow et al., 2016).

## 2.7. Madurez del concreto

La madurez está basada en la ley de Arrhenius y hace posible predecir la evolución de la resistencia a la compresión del concreto sobre la base de una caracterización a 20°C (Waller et al., 2004); la ley de Arrhenius comprueba la dependencia de la cinética de una reacción química (hidratación del cemento) con relación a la temperatura a la que se lleva a cabo, por tanto, describe cómo la temperatura en el concreto influye de modo importante en el desarrollo de resistencia del mismo, existiendo, como se definió antes, una mayor influencia a edades tempranas, durante el proceso de curado si se eleva la temperatura, se acelera la hidratación y así, aumenta la resistencia inicial. Entonces el concepto de madurez utiliza como principio que la resistencia está relacionada con la edad y con el desarrollo de la temperatura del concreto.

El enfoque de madurez se utiliza para la predicción de la resistencia bajo condiciones de edad y temperatura (Boubekeur et al., 2014; Topçu & Toprak, 2005) y el enfoque de Saul-Nurse a este fue apropiado por la American Society for Testing and Materials (ASTM) en el estándar C 1074-11, donde se adoptó la practica normalizada del método de madurez para la estimación de la resistencia a la compresión (Abdel-Jawad, 2006), utilizando la ecuación (1) de Arrhenius:

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

Donde  $M(t)$  es el factor de temperatura-tiempo a la edad  $t$  en días u horas,  $\Delta t$  es un intervalo de tiempo, días u horas,  $T_a$  es la temperatura del concreto media durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  en  $^{\circ}\text{C}$ , y  $T_o$  es la temperatura de referencia en  $^{\circ}\text{C}$ .

Es importante tener en cuenta que el método de madurez no es objeto de estudio de esta investigación, pero realiza un acercamiento a los objetivos descritos, pues proporciona un enfoque relativamente sencillo para la evaluación de la resistencia in situ del concreto en placas macizas durante la construcción (Galobardes et al., 2015).

## 2.8. Temperatura y curado del concreto

El efecto de la temperatura sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión a temprana edad se puede observar en la Fig. 2, la importancia de la temperatura de curado en la resistencia a la compresión teniendo en cuenta las propiedades térmicas del concreto y el proceso de hidratación del cemento descrito anteriormente caracterizan el desarrollo de la resistencia del concreto, pues depende en gran medida de la historia de la temperatura durante el tiempo una vez es vaciado el elemento y además de la temperatura de curado (Yikici & Chen, 2015).

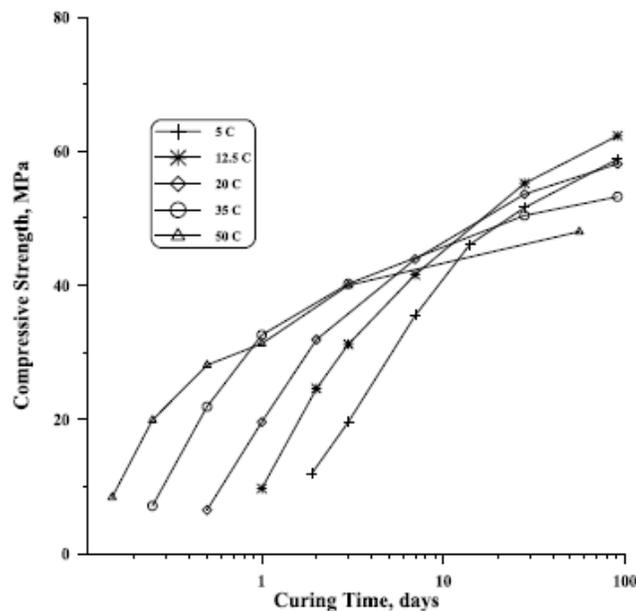


Fig. 2. Desarrollo de resistencia a la compresión bajo diferentes temperaturas de curado. Fuente (Yania y Jawad 2006)

El proceso de hidratación del cemento y la resistencia a la compresión es además influenciado por la temperatura ambiente y por las fluctuaciones de la misma afectando el proceso de curado de las estructuras de concreto (Sofi et al., 2014).

La hidratación de las partículas del cemento es un fenómeno complejo que depende de las características en la cinética de las reacciones y la temperatura (Boubekeur et al., 2014), el efecto combinado de la temperatura de curado y los mecanismos de hidratación del cemento. Lo esquematizado en la Fig. 2 junto con los conceptos del proceso de hidratación, cimientan la concepción teórica de que las temperaturas más altas aceleran los procesos de ganancia de resistencia inicial (Bahafid et al., 2017).

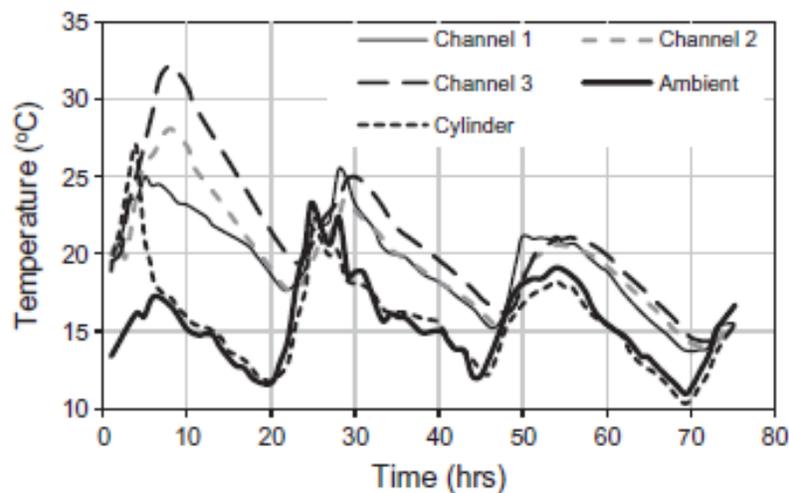


Fig. 3. Desarrollo de temperaturas en diferentes alturas de una placa maciza de concreto. Fuente (Sofi, Mendis y Baweja 2012)

El desarrollo de la temperatura en el concreto in situ se muestra en la Fig. 3, donde, a primeras horas la temperatura es más alta dentro de la matriz del concreto inclusive por encima de los especímenes cilíndricos, esto debido al proceso de hidratación del cemento y las propiedades térmicas del concreto, es decir, el efecto combinado del agua, el cemento, la temperatura de curado, la temperatura ambiente y el volumen de concreto (Castellano, Bonavetti, Donza, & Irassar, 2016).

Estudios posteriores han verificado la relación de los conceptos teóricos descritos anteriormente, siendo todos muy claros indirectamente en la conclusión de que no existen métodos estándar que apropien el desarrollo y conocimiento de los conceptos de temperatura y curado en el desarrollo de resistencias a la compresión en el concreto y más aún en placas macizas. Además de que los métodos convencionales

y las comparaciones en general revelan que los resultados para estimar el desarrollo de las resistencias deben ser usados con algunas reservas (Sofi et al., 2012), esto debido a que el nivel de confianza de los resultados depende de los parámetros y la metodología usada.

Teniendo en cuenta los estudios realizados para la estimación de la resistencia a la compresión del concreto en diferentes elementos estructurales, asumiendo como punto importante en el contenido dentro de la investigación, la utilización de un sistema de curado basado en el acondicionamiento de temperatura o TMC por sus siglas en inglés (Temperature Match Curing), se evidencia que (Sofi et al., 2012), describen el sistema TMC para la evaluación de la resistencia in situ como uno de los más usados a nivel industrial para placas prefabricadas, en donde la predicción de las resistencias en losas de 200 mm de espesor obtuvieron una concordancia aceptable con errores por debajo del 1%; además se establece que el sistema TMC para curado de especímenes cilíndricos proporciona una correlación muy estrecha con la resistencia obtenida in situ. En esta investigación se trasladó en tiempo real el desarrollo de temperaturas a los especímenes cilíndricos.

Para elementos de concreto en masa, (Yikici & Chen, 2015) predicen la resistencia del concreto a diferentes profundidades en cubos de concreto de 1.8m, utilizando el método de madurez, aun cuando en esta investigación no se realiza el curado de las muestras utilizando un sistema TMC, la predicción se compara con la extracción de núcleos en los cubos de concreto, hasta llegar a obtener resistencias diferentes en cada una de las profundidades de los cubos, y los valores se encontraron en +/- el 15% de lo estimado en las zonas medias de los elementos. Para la estimación de las resistencias se realizó la medición del desarrollo de temperaturas en diferentes puntos dentro de los cubos de concreto. De la misma manera pero sobre cubos de dimensiones inferiores se realiza la estimación de la resistencia a la compresión tomando como parámetro el desarrollo de temperaturas en el concreto y la influencia de la temperatura ambiente (Sofi et al., 2014).

La predicción de la resistencia a temprana edad fue también objeto de estudio de (Benaicha et al., 2016) que al igual que para (Abdel-Jawad, 2006; Boubekeur et al., 2014; Galobardes et al., 2015; Topçu & Toprak, 2005; Vázquez-Herrero et al., 2012; Waller et al., 2004; Yikici & Chen, 2015) el método de madurez y la historia del desarrollo de temperaturas del concreto medidas directamente en la estructura in situ, la comparación de los resultados de estimación se realizan con muestras cilíndricas curadas bajo métodos estándar a temperatura constante.

En el año de 1995 (Mak & Torii) estudian el desarrollo de resistencia en concretos de alta resistencia con humo de sílice bajo la influencia de altas

temperaturas de hidratación, realizando el análisis y la comparación de resultados de muestras cilíndricas curadas bajo sistema TMC y en condiciones estándar, el sistema de acondicionamiento de temperatura trabaja con el desarrollo de temperaturas de investigaciones previas, los resultados arrojaron que las muestras cilíndricas curadas en el sistema TMC mostraron resistencias iniciales más altas en comparación con los curados a temperatura estándar (Mak & Torii, 1995).

El efecto de la temperatura in situ en el desarrollo de la resistencia a edades tempranas de concretos con materiales cementantes suplementarios, fue objeto de estudio de (Soutsos, Hatzitheodorou, Kwasny, & Kanavaris, 2016), se realizaron las mediciones del desarrollo de temperaturas sobre diferentes elementos de concreto como placas, bloques, muros y columnas y se estimaron las resistencias a la compresión bajo el método de la madurez, realizando una comparación con los resultados obtenidos en muestras curadas en condiciones estándar y bajo un sistema TMC, se concluye que las altas temperaturas y los gradientes de temperatura existentes en los elementos aumentan notablemente la resistencia de los elementos.

Los sistemas TMC pueden promover eficazmente el desarrollo de la resistencia inicial del concreto según lo estudiado por (Mengxiao et al., 2015), los resultados de resistencias medidos asimilan lo descrito anteriormente, donde el curado de muestras bajo condiciones TMC es superior al curado estándar, este estudio se realiza para comparar las propiedades mecánicas en concretos adicionados con cenizas volantes y escoria de alto horno en sistemas de curado estándar y TMC.

## **2.9. Sistemas industrializados de construcción en concreto**

Los procesos que se ejecutan mediante la planeación adecuada de una serie de actividades y costos, puede denotarse como un sistema industrializado, teniendo en cuenta la correcta selección de equipos y materiales para la construcción de edificaciones o vivienda. Es aceptado en el gremio de la construcción en Colombia que la construcción de edificios con sistemas industrializados está ligada al uso de formaleta metálica modulada, para una o varias unidades de una vivienda tipo, con el principio de rotación diaria de la formaleta, lo cual permite una velocidad de construcción eficiente (Diaz Jorge, Bautista Luisa, Sanchez Adrian, & Ruiz Daniel, 2003).

Los sistemas industrializados, capaces de realizar una rotación diaria de formaleta en pro de la rapidez constructiva de edificaciones y vivienda, son comúnmente desarrollados con paneles metálicos capaces de soportar las presiones

del concreto sin sufrir deformaciones, Fig. 4. Actualmente es muy común el uso de sistemas monolíticos, en los cuales el tiempo de ejecución de la vivienda se reduce considerablemente en comparación con sistemas tradicionales, ya que permite vaciar diariamente y en una sola etapa los muros de fachada, muros internos divisorios, detalles arquitectónicos y las losas de una vivienda (Forsa 2017).



Fig. 4. Formaleta para sistema industrializado mano portable. Fuente (Forsa 2017)

## 2.10. Concreto para sistemas industrializados

Debido a la rapidez de construcción en los sistemas industrializados, el concreto usado debe tener características especiales de resistencia a edades tempranas (Diaz Jorge et al., 2003), esto debido a que las cargas de construcción deben ser soportadas por el sistema estructural desde tempranas edades. Siendo la resistencia a edades tempranas la característica principal del concreto, se tiene en cuenta además el tiempo de fluidez, esto debido a las instalaciones eléctricas e hidráulicas presentes dentro de los muros y placas, los cuales tienen espesores entre 8 y 20 cm.

De acuerdo con las especificaciones técnicas del concreto usado para sistemas industrializados, el diseño de mezcla para los muros y placas requiere características típicas para cada elemento. En la Tabla 1 se muestran estas características; para muros la fluidez del concreto debe ser más alta que en las placas, pero el requisito de resistencia para placas debe ser mayor que en los muros a edades tempranas, debido a que es muy importante para el tipo de sistema el retiro rápido de la formaleta (14 a 18 horas después de fundido el elemento).

Tabla 1. Especificaciones técnicas del concreto para sistemas industrializados (Diaz , y otros 2003)

<b>Característica</b>	<b>Muros</b>	<b>Placas</b>
<b>Fluidez</b>	Alta	Media
<b>Tamaño máximo del agregado</b>	Grava 12.5 mm	Grava 12.5 mm
<b>Resistencia inicial</b>	Media	Alta
<b>Tiempos de fraguado</b>	Acelerado	Acelerado
<b>Resistencia final</b>	De acuerdo al diseño	De acuerdo al diseño
<b>Riesgo de fisuración</b>	Bajo	Alto

Los conceptos revisados pretendieron establecer la importancia en la relación de la resistencia del concreto a edades tempranas in situ con el desarrollo del historial de temperaturas en elementos de concreto macizo.

De tal manera, establecer la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas del material, con ayuda de los parámetros de madurez, curado, acondicionamiento de temperatura y resistencia in situ y direccionado todo hacia las exigencias de un entorno constructivo real, cimientan la solución de la brecha investigativa encontrada, la cual está implícita en la hipótesis y el desarrollo de este trabajo.



## Capítulo 3. Materiales y métodos

El presente trabajo enmarcó dentro de su metodología la simulación con la mayor parte de las variables de los contextos técnicos, logísticos y de tiempos, en torno a las características típicas de una obra; los materiales y procedimientos realizados, tienen la calidad y rigurosidad típica del entorno constructivo.

El panorama sobre el cual se ejecutaron los procedimientos intentó seguir a cabalidad todos los parámetros normativos de calidad, desde el laboratorio o en la obra, para asimilar todo el contexto típico de la construcción y así darle un acercamiento más real a los resultados obtenidos.

### 3.1. Materiales

En los materiales utilizados para la ejecución de la metodología se exigió todo el cumplimiento normativo dentro de los estándares de calidad, en los agregados, el cemento, agua y aditivos para el diseño de mezcla, se cumplieron los requisitos de las normas ASTM C33, ASTM C1157M-11 y ASTM C494, la fabricación de concreto cumplió con los estándares exigidos por la ACI 318.

Los equipos de medición y ensayo fueron suministrados por los laboratorios de la Pontificia Universidad Javeriana y los SGS Laboratorios Contecon Urbar, en la ciudad de Bogotá, Colombia.

### 3.1.1. Diseño de mezcla

El diseño de mezcla de concreto utilizado para la ejecución de la etapa experimental del proyecto es de tipo industrializado, en el cual según los procesos constructivos, la aceleración de los tiempos y la reducción de los costos (Gasch et al., 2012) permite la reutilización total del encofrado utilizado en las obras. El diseño de mezcla y los materiales para su fabricación fueron suministrados por la constructora Arquitectura y Concreto SAS en la ciudad de Bogotá, Colombia.

La caracterización de los materiales y los resultados históricos de resistencia a la compresión según la ASTM C39-14, así como la curva de evolución de resistencia, fueron suministrados por la constructora. Se evaluó dicha información en relación con la metodología del proyecto para establecer los parámetros de medición de temperaturas y resistencia a la compresión del concreto, en relación con el tiempo máximo y pertinente de instrumentación del concreto y las edades de ensayo a compresión. La resistencia nominal del diseño de mezcla es de 28 MPa y las características principales del concreto fabricado están descritas en la Tabla 1. La dosificación en peso se muestra a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño de mezcla para un concreto tipo industrializado de 28 MPa

Material	Peso para Kg/m <sup>3</sup>
Cemento ART Argos río claro	380
Arena de río	883
Grava de 12.5 mm	995
Agua	190
Eucon WR-78	1,23
Accelguard – 25	7,00

#### 3.1.1.1. Concreto tipo industrializado 28 MPa

El cemento utilizado fue de tipo ART o alta resistencia temprana según la ASTM C1157-11. Los agregados provienen del municipio del Guamo - Tolima y cumplen la ASTM C33 con características granulométricas ajustadas a los rangos dados en la norma. Los aditivos son un acelerante de fraguado y un reductor de agua y retardante de la casa Toxement, estos están dentro de los rangos de la ASTM C494 tipo D y E.

La relación agua cemento (a/c) del diseño de mezcla es de 0,5 y el asentamiento dado para el concreto es de 7" +/- 2", o 177,8 mm, la manejabilidad y fluidez establecida para el concreto es alta de acuerdo a su asentamiento dadas las condiciones constructivas bajo las cuales se utiliza y según lo descrito en el capítulo 2. El ensayo de asentamiento se realizó para cada mezcla bajo lo establecido en la ASTM C143-90, ver la Fig. 5.



Fig. 5. Ensayo para determinar el asentamiento del concreto según ASTM C143-90

### 3.1.2. Planta de fabricación de concreto

La dosificación del concreto se realizó en obra utilizando la planta de concreto automatizada referencia Altron AM-25 modelo 2017, este equipo se encuentra calibrado y certificado para la producción de concreto en obra y cumple con los estándares normativos dados por la ACI 318, en la Fig. 6 se puede ver el equipo descrito.



Fig. 6. Planta de concreto Altron AM-25 / 2017

El control automático de peso permite la dosificación exacta de los materiales del diseño de mezcla para una cantidad en volumen dada desde  $0,1 \text{ m}^3$  a  $1 \text{ m}^3$ . La certificación de los sistemas de pesaje de cada uno de los materiales se da por la entidad competente para Colombia, ONAC, Organismo Nacional de Acreditación.

### 3.1.3. Sensor de temperatura - Termocuplas

Los sensores de temperatura (ver Fig. 7) utilizados para la instrumentación y medición de temperaturas dentro del concreto son referencia Omega Serie 5SRTC, estos sensores están fabricados con aislamiento trenzado y poseen un conector que va conectado al equipo de adquisición de datos y software. Las características de las termocuplas se listan a continuación:

- Aislamiento tipo Kapton trenzado
- Calibraciones tipo K
- Calibre 20, 24, 30 y 36 AWG
- Alambres 30 y 36 AWG con aislamiento PFA. Máxima temperatura de Servicio  $260 \text{ }^\circ\text{C}$
- Longitudes estándar 1 y 2 metros (36 y 72 ")
- Conector miniatura moldeado
- Temperatura máxima de servicio para el cuerpo del conector  $220 \text{ }^\circ\text{C}$

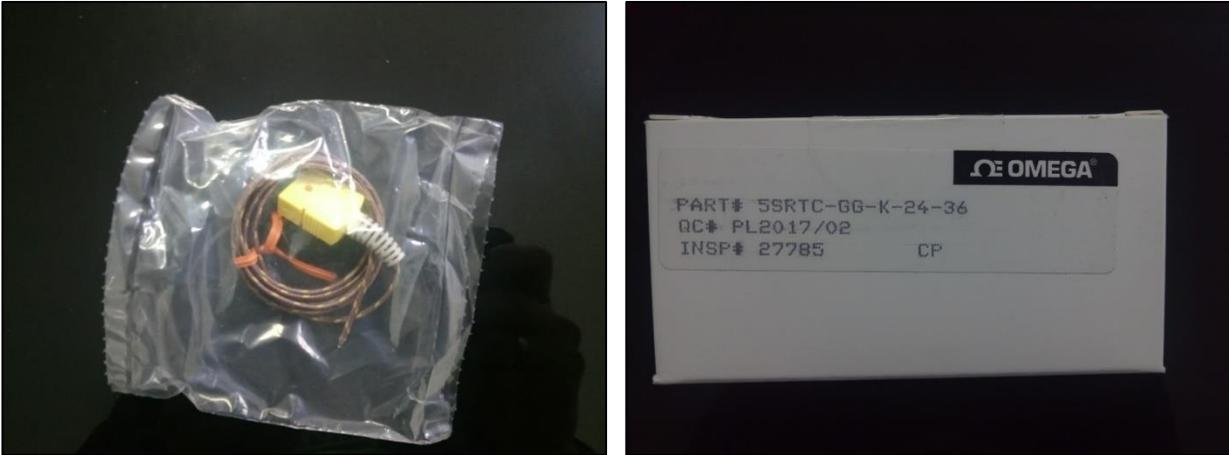


Fig. 7 Termocupla Omega Serie 5SRTC

#### 3.1.4. Software y equipo de adquisición de datos

El sistema (software-equipo) desarrollado por la empresa Kuspyde ingeniería se denomina INGEMODULER, este es un equipo de medición modular multivariable que permite agrupar en una configuración señales de múltiples sensores para hacer la adquisición de datos en modo simultáneo.

Físicamente está compuesto por una caja transportadora, lo que posibilita la instalación de este equipo tanto en laboratorios como en ambientes industriales como por ejemplo, obras de construcción. Los datos tomados son mostrados en la interfaz gráfica por medio de un equipo de cómputo personal, en la Fig. 8 se puede observar el aspecto del equipo.

Para este caso, se utilizaron 11 canales de medición de temperaturas distribuidos de acuerdo a la necesidad de cada elemento a medir (placa de concreto). Los datos de temperatura se tomaron con una frecuencia de 0.1 hertz (una medida cada 10 segundos) para cada canal de medición, por lo cual se estimó un total de datos por hora de 360 y de 8640 por día.

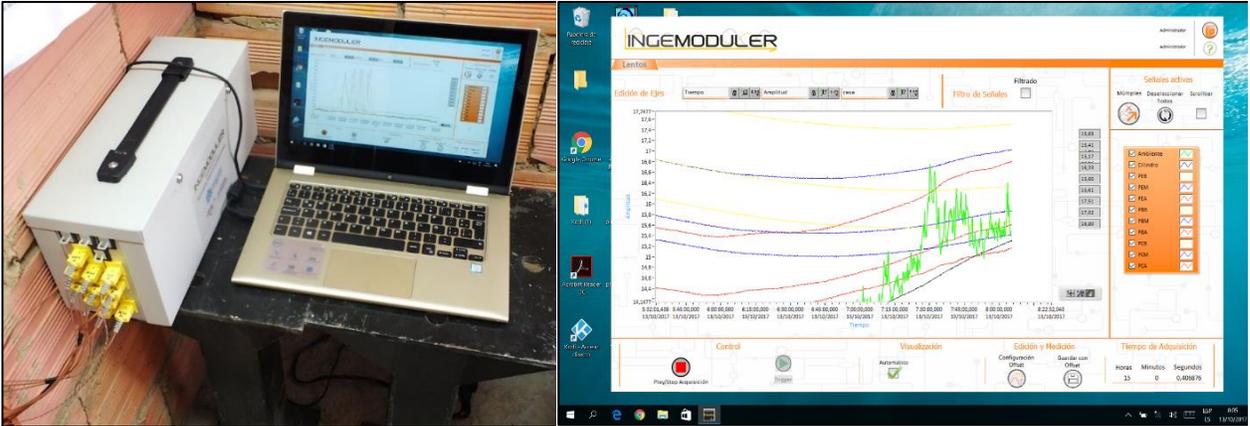


Fig. 8. Equipo Ingemoduler e interfaz de medición gráfica del software

La licencia del software y el equipo de adquisición de datos son propiedad de la Pontificia Universidad Javeriana en la ciudad de Bogotá.

### 3.1.5. Estación meteorológica doméstica inalámbrica

En la Fig. 9, se puede ver la estación meteorológica referencia WS 2095, es un equipo compacto que mide la temperatura y la humedad (interna y externa), la lluvia y la presión barométrica. La consola de la estación meteorológica muestra la información en pantalla, los datos son guardados en la memoria interna y son descargados en formato Excel con una frecuencia para tomar un dato cada 5 minutos.



Fig. 9. Estación meteorológica domestica inalámbrica

La licencia del software y el equipo de adquisición de datos de humedad son propiedad de la Pontificia Universidad Javeriana en la ciudad de Bogotá.

### 3.1.6. Sistema de perforación para concreto – extractor de núcleos

El sistema de perforación para concreto con columna, utilizado para la extracción de núcleos en las placas de concreto, es de referencia DD 150-U, funciona en húmedo sobre concreto y comúnmente se utiliza para realizar pases de tubería. Tiene un motor potente y de alto rendimiento de tres velocidades para una velocidad de perforación óptima y una empuñadura lateral ajustable en 360°, con funciones de gestión del polvo y de agua integradas. Las características técnicas del equipo se listan a continuación, el aspecto físico de puede ver en la Fig. 10.

- Voltaje nominal: 120 Voltios
- Modo de operación: Manual
- Número de marchas: 3
- Rango de perforación: 24 a 112 mm
- Peso del sistema completo: 22 kg



Fig. 10. Sistema de perforación para concreto con columna DD 150-U

Esta máquina hace parte del área certificada de servicios especializados de los laboratorios SGS Contecon Urbar, todas las extracciones de núcleos se realizaron in situ y fueron ejecutadas por el laboratorio en la ciudad de Bogotá.

### 3.1.7. Máquina de ensayos de compresión

La máquina de ensayos a compresión Automax Fig. 11, utilizada para los ensayos de cilindros y núcleos de concreto normalizados, se compone esencialmente de un marco o bastidor soldado de cuatro columnas de alta rigidez, asiento esférico de alto desempeño en baño de aceite para lubricación, lo que permite una alineación inicial libre al contacto inicial con el espécimen y platos de compresión redondos de 165 mm de diámetro, adecuado para ensayos de cilindros hasta 160 mm de diámetro x 320 mm conforme a la ASTM C39.

Esta máquina hace parte del área certificada de concretos de los laboratorios SGS Contecon Urbar, todos los ensayos a compresión se realizaron en las instalaciones del laboratorio en la ciudad de Bogotá.



Fig. 11. Máquina de ensayos a compresión Automax

### 3.1.8. Cámara para ensayo de acondicionamiento de temperatura

El curado con acondicionamiento de temperatura (TMC: Temperature Match Curing), se realizó con la cámara climática Clime Event, de Weisstechnik (Fig. 12),

esta permite curar los cilindros con la influencia de la temperatura y la humedad dadas en los rangos medidos. La interfaz gráfica permitió la programación del desarrollo de temperaturas y humedades medido en cada una de las placas asimilando las condiciones ambientales del sitio de vaciado del concreto.



Fig. 12. Cámara climática para el curado con acondicionamiento de temperatura

### 3.2. Metodología de trabajo

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo realizando experimentos controlados en campo y en laboratorio, ejecutando mediciones del desarrollo de temperaturas dentro de placas de concreto por medio de una instrumentación con termocuplas. Adicionalmente, se realizaron ensayos destructivos (extracción de núcleos) sobre estos elementos y ensayos de compresión sobre muestras cilíndricas de concreto fabricadas en campo y sobre los núcleos extraídos. Las placas de concreto se construyeron con diferentes espesores (0.10 m, 0.12 m y 0.15 m) y emulando el desarrollo de temperaturas medidas en las placas sobre especímenes de concreto, los cuales fueron ensayados posteriormente para establecer la resistencia a compresión con curado bajo el acondicionamiento de temperatura.

El desarrollo de la investigación estableció, con la implementación de la metodología descrita, la determinación de la resistencia en placas de concreto a diferentes espesores a edades tempranas (1 día, 2 días, 3 días y 7 días).

Para el desarrollo de esta investigación se plantearon tres etapas: etapa inicial, etapa experimental y etapa analítica, las cuales se describen a continuación en detalle.

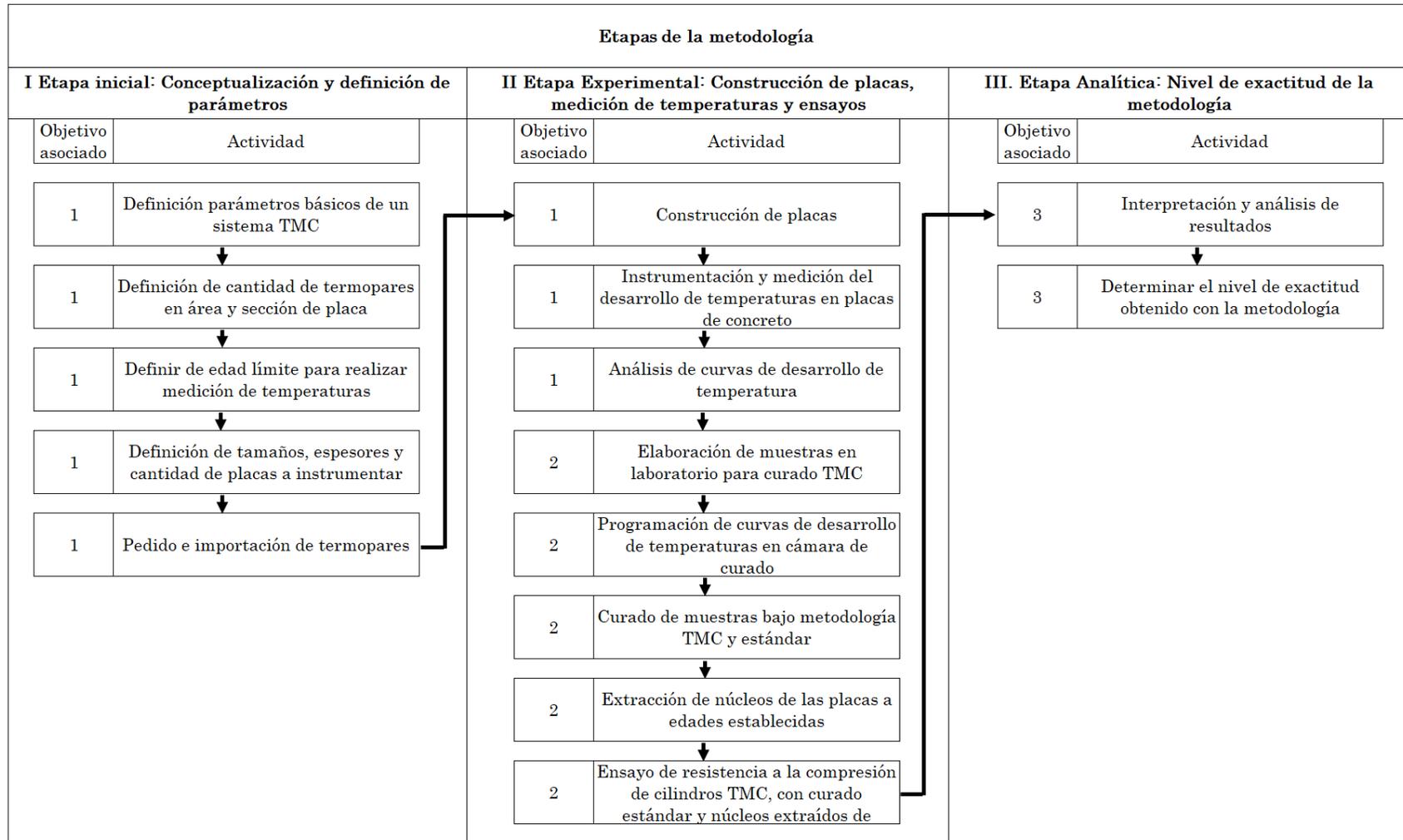


Fig. 13. Esquema del desarrollo metodológico

### **3.2.1. Etapa inicial: Conceptualización y definición de parámetros**

La etapa inicial de la metodología consistió en la revisión bibliográfica, teniendo en cuenta los conceptos claves para la investigación, adicional a esto se verificaron en la literatura los parámetros importantes para el desarrollo del proceso metodológico.

La revisión se llevó a cabo con la consulta en revistas indexadas de información pertinente y actual, teniendo en cuenta la temática de estudio y el impacto. Lo anterior con el fin de conceptualizar y definir parámetros importantes para el desarrollo de la metodología.

#### **3.2.1.1. Sistema TMC Temperature Match Curing**

La revisión de literatura arrojó, en primera instancia, el entendimiento de los parámetros de medición de temperaturas en placas de concreto con relación a un sistema de acondicionamiento de temperatura TMC (Temperature Match Curing). Hallando en estos parámetros, los conceptos básicos de instrumentación de placas de concreto en cuanto a la colocación de los elementos de medición en área y sección, número de puntos de medición y cantidad de elementos de medición.

En la Fig. 1 del Capítulo 2 se esquematiza el concepto básico de un sistema de este tipo, en donde los historiales de temperatura tomados por la instrumentación realizada a los elementos de concreto son transportados a una cámara de curado para igualar dentro de la misma los cambios térmicos a los cuales está sometido el concreto. En la cámara de curado se encuentran muestras o especímenes cilíndricos de concreto que desarrollan su proceso de madurez con la misma temperatura del elemento instrumentado, este mismo sistema fue utilizado también por (Swee Liang y Kazuyuki 1995).

Es importante tener en cuenta que la igualación o emulación de la temperatura dentro de la cámara de curado, para el concepto del sistema TMC, puede realizarse en simultáneo con la medición o posterior a ésta, ejemplo que también fue desarrollado recientemente por (Soutsos , Hatzitheodorou y Kwasny 2016), ver la Fig. 14. Con relación a este último caso de desarrollo de esta la investigación se fundamentó de esta manera, curando posteriormente a la medición de temperaturas especímenes cilíndricos de concreto en cámara de curado.

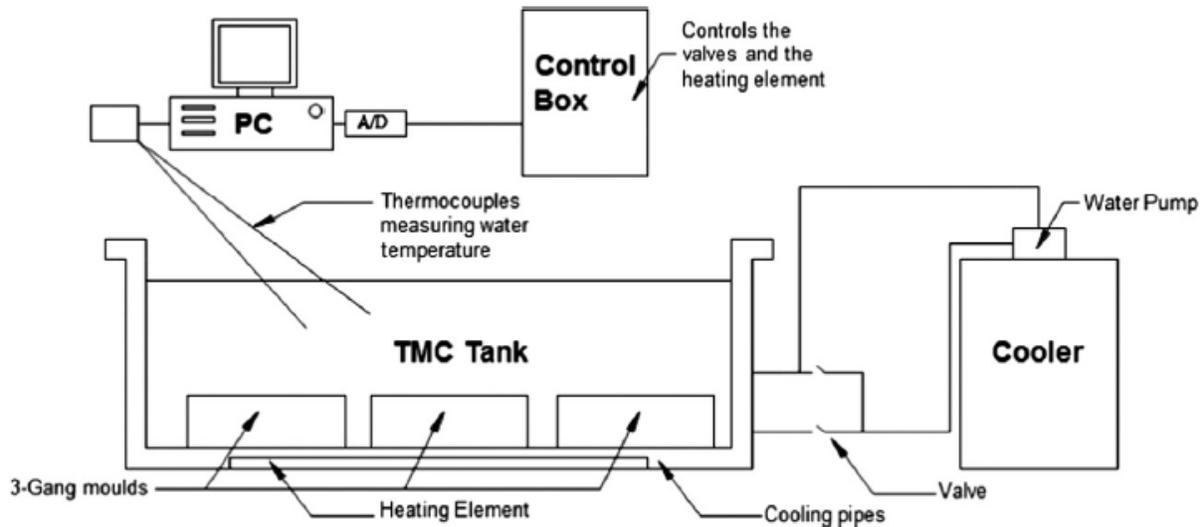


Fig. 14 Sistema TMC con tanque de curado. Fuente (Soutsos, Hatzitheodorou y Kwasny 2016)

De acuerdo con lo anterior, los componentes básicos de un sistema TMC utilizados dentro de la investigación son listados a continuación:

- Termocuplas o sensores de temperatura.
- Equipo de adquisición de datos con PC para visualización y almacenamiento.
- Cámara o tanque de curado con sistema de control de temperaturas y humedad.

La cantidad y ubicación de los puntos de medición de temperaturas en la placa de concreto está relacionada con el proceso de hidratación del cemento y con la generación de calor de hidratación, lo cual influye en las propiedades mecánicas del concreto (Schackow , y otros 2016), por tanto, la instrumentación se distribuyó en área y sección de cada placa teniendo en cuenta la proporción de concreto existente alrededor de cada punto de medición.

Los puntos escogidos fueron: esquina de placa (PE), borde de placa (PB) y centro de placa (PC), el desarrollo de temperatura en cada uno de estos puntos se ve afectado directamente por la cantidad de concreto junto a él, pues en la esquina hay menos proporción de concreto que en el borde y a su vez en el borde menos que en el centro. Adicional a los puntos de instrumentación en área, se instalaron en espesor tres termocuplas repartidas bajo el mismo concepto anterior, en la parte alta del espesor de la placa (A), en el medio del espesor (M) y en la parte baja (B). En la Fig. 15, se esquematiza la distribución de la instrumentación en área y sección descrita.

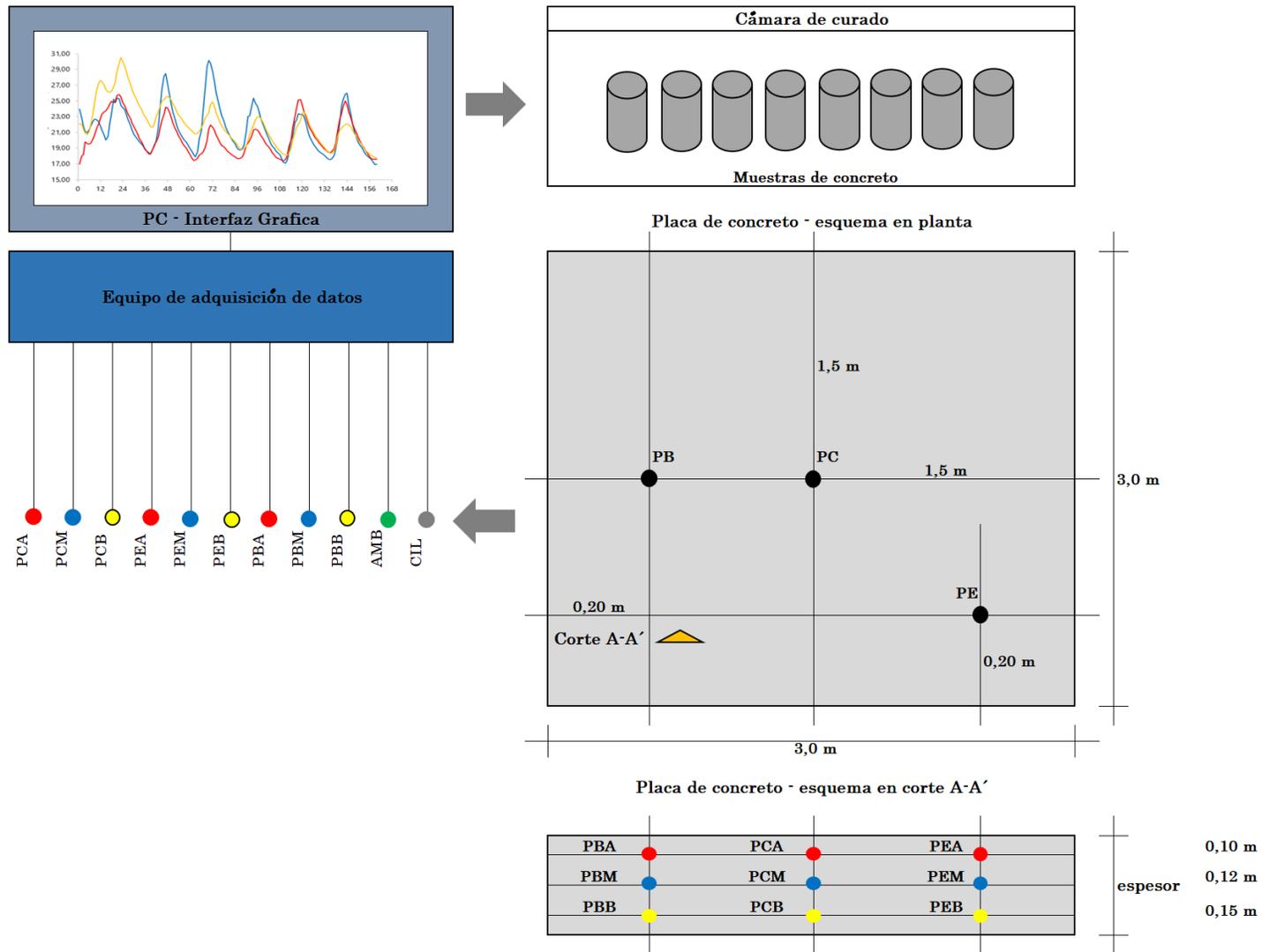


Fig. 15 Esquema de montaje para sistema TMC utilizado

La nomenclatura dada para cada uno de los puntos de instrumentación se resume en la Tabla 3, teniendo en cuenta que por placa se instalaron once puntos de medición con termocuplas individuales. De estos, nueve puntos en placa, para identificar el desarrollo de temperaturas y cómo estas tienen un papel fundamental en el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto (Toufik , Karim y El-Hadj 2014), un punto para medir temperatura ambiente, con el fin de evidenciar la influencia significativa que tiene ésta en la ganancia de propiedades de resistencia del concreto a edades tempranas (M. Sofi, P. Mendis, y otros 2014), y un punto para medir la temperatura en una muestra cilíndrica fabricada con el mismo concreto de la placa, para identificar el desarrollo de temperaturas en volúmenes de concreto menores.

Tabla 3. Nomenclatura de puntos de instrumentación

<b>Punto</b>	<b>Esquina</b>	<b>Borde</b>	<b>Centro</b>	<b>Otros puntos</b>
<b>Alto</b>	(1) PEA	(4) PBA	(7) PCA	(10) Ambiente
<b>Medio</b>	(2) PEM	(5) PBM	(8) PCM	(11) Cilindro
<b>Bajo</b>	(3) PEB	(6) PBB	(9) PCB	

### 3.2.1.2. Cantidad, tamaño y espesor de placas

Se revisaron, además, planos estructurales y arquitectónicos de 7 proyectos en ejecución y planificación de la constructora Arquitectura y Concreto SAS como complemento en la definición de parámetros de arranque en la etapa experimental de la metodología. En segunda instancia se definieron los espesores típicos de placas macizas y las áreas promedios de las mismas para la delimitar el número y las dimensiones de los elementos (placas) estándar a construir e instrumentar, con la revisión acordada bajo permisos de una constructora de los planos de los proyectos en ejecución y planificación en la ciudad de Bogotá.

En la Tabla 4 se describe la información importante de los proyectos revisados, para la definición del tamaño de las placas y el espesor, así como la cantidad a construir; se puede observar cómo el área mayor en placa dentro de un piso tipo para los proyectos tiene un promedio de 9,44 m<sup>2</sup> y los espesores varían entre 0.10 m y 0.15m.

Los sistemas constructivos en la mayoría de los casos son de tipo industrializado, esto refleja la necesidad de la velocidad en la construcción, no sin obviar que para sistemas de mampostería estructural y convencional, el factor tiempo también es importante, en cuanto a la reutilización de la formaleta para placas.

Tabla 4. Características de proyectos constructivos revisados

Proyecto	Tipo	Estado	Sistema constructivo		Espesor (m)	Área mayor de placa (m <sup>2</sup> )	
I	Vivienda	Terminado	Industrializado	Mano portable	0,10	3,0 x 2,9	8,70
II	Vivienda	Ejecución	Industrializado	Mano portable	0,10	3,0 x 2,9	8,70
III	Vivienda	Ejecución	Industrializado	Mano portable	0,10	3,4 x 3,1	10,54
IV	Vivienda	Ejecución	Industrializado	Mano portable	0,10	3,4 x 2,5	8,50
V	Mixto	Planeación	Industrializado	Mano portable	0,10	3,3 x 3,1	10,23
VI	Vivienda	Terminado	Mampostería	Mampostería	0,12	3,7 x 2,4	8,88
VII	Mixto	Ejecución	Convencional	Convencional	0,15	3,5 x 3,0	10,50
						<b>Área promedio (m<sup>2</sup>)</b>	<b>9,44</b>

De acuerdo con la información suministrada en cada uno de los proyectos revisados y según la pertinencia para la investigación, se construyeron placas de 3 x 3 m en tres espesores diferentes (0.10 m, 0.12 m y 0.15 m), esto con el fin de estandarizar el área y utilizar los espesores existentes, a fin de evaluar el comportamiento térmico para cada una.

Por otro lado, se construyeron 2 placas por espesor con el fin de no afectar la instrumentación y la recolección de datos de temperatura con los ensayos destructivos (extracción de núcleos), por tanto sobre una placa se realizó la medición de temperaturas y sobre otra se realizó la extracción de núcleos.

En total se construyeron 6 placas de 3 x 3 m en tres espesores diferentes. La construcción de los elementos se realizó con insumos (concreto, formaleta y herramientas), mano de obra y espacio en campo, asimilando las condiciones reales de las estructuras de concreto de los proyectos de construcción típicos de una obra. Además, el manejo de la información anterior se realizó bajo permiso acordado y firmado entre la gerencia técnica de la constructora Arquitectura y Concreto SAS y los investigadores.

### 3.2.1.3. Tiempo de medición de temperaturas

Las características que deben tener los concretos en los sistemas industrializados descritos anteriormente (Tabla 1) contextualizan la necesidad de este tipo de proyectos con sistemas constructivos característicos, para la reutilización rápida de la formaleta en tiempos mínimos (Mouhcine, Yves y AdilHafidi 2016). Todo esto, va de la mano del desarrollo de resistencia de la mezcla de concreto en

condiciones típicas de una obra en construcción y a su vez de las propiedades térmicas del concreto a edades tempranas (M. Sofi, P. Mendis, y otros 2014).

Para el concreto utilizado en la investigación, dado el diseño de mezcla descrito en el capítulo de 3.1.1 y 3.1.1.1, se estudiaron los históricos de resistencia a compresión y las curvas de evolución hasta los 28 días de edad, con el fin de establecer la edad límite de medición de temperaturas bajo tres conceptos importantes: a. el primero, que las propiedades de resistencia de los concretos a temprana edad tienen una influencia significativa de la temperatura (M. Sofi, P. Mendis, y otros 2014), b. el segundo, que el efecto de la temperatura en la resistencia disminuye con la edad (Toufik , Karim y El-Hadj 2014) y, c. el tercero y no menos importante la disminución de los tiempos de construcción siempre y cuando el concreto sea capaz de resistir todos los esfuerzos del proceso constructivo (Santilli, Teixeira y Puente 2015). Los datos históricos del diseño de mezcla utilizado en los proyectos descritos en la Tabla 4 se describen en la Tabla 5 teniendo en cuenta la edad en la que se realizó el ensayo a compresión y el resultado de resistencia obtenido durante la construcción del proyecto.

Los datos de resistencia se tomaron de los proyectos II, III y IV. El concreto fabricado con el diseño de mezcla de 28 MPa tiene como característica importante para cada proyecto obtener el 10% de la resistencia a 14 horas, es decir mínimo 2,8 MPa, para poder realizar el retiro de la formaleta.

Tabla 5. Histórico de resistencia a compresión para el concreto tipo industrializado de 28 MPa

	<b>Proyecto II</b>	<b>Proyecto II</b>	<b>Proyecto IV</b>
<b>Edad (días)</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>
<b>1</b>	4,1	3,5	5,6
<b>2</b>	18,1	13,5	17,5
<b>3</b>	28,3	23,4	28,1
<b>7</b>	32,5	29,6	29,8
<b>14</b>	35,0	32,5	32,3
<b>28</b>	38,8	35,6	36,5

La curva de desarrollo de resistencia de los concretos evaluados en los proyectos se observa en la Fig. 16, se aprecia la tendencia de alcanzar sobre las 3 días la resistencia de diseño.

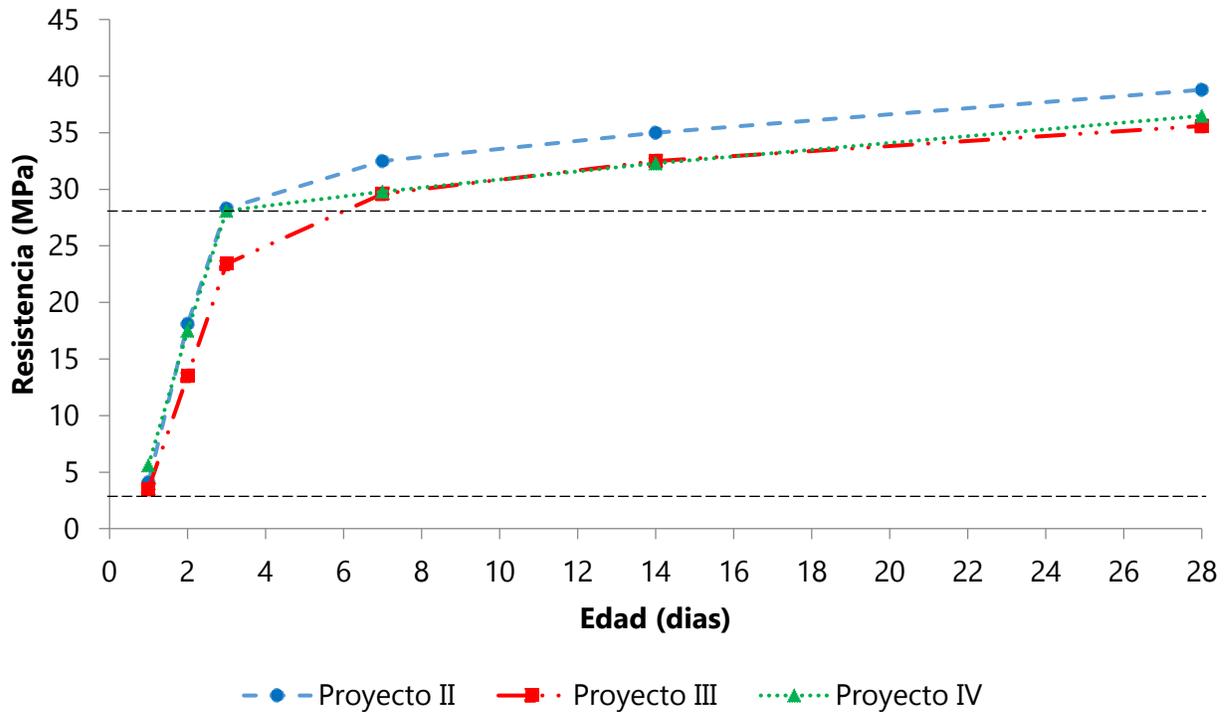


Fig. 16 Desarrollo de resistencia a compresión in situ para los proyectos II, III y IV

En cada uno de los proyectos evaluados se evidencia que los datos históricos de resistencia en el día 1 (ensayo realizado entre las 14 horas a 24 horas) cumplen con el parámetro de resistencia dado (10%) y que el 100% de la resistencia se obtiene entre los 3 y 7 días, por lo cual, entendiéndolos tres conceptos descritos atrás para la definición del tiempo de instrumentación, se define como edad límite para realizar la medición de temperaturas los 7 primeros días. Adicionalmente los ensayos de resistencia a la compresión de las muestras cilíndricas y los núcleos extraídos, así como el tiempo de curado dentro de la cámara para el sistema TMC, se limita también a esta edad.

### 3.2.2. Etapa Experimental

En el desarrollo de la etapa experimental se ejecutaron las acciones destinadas a la construcción de placas de concreto macizas en los diferentes espesores (0,10m, 0,12m y 0,15m), instrumentación de las placas, medición del desarrollo de temperaturas, curado de especímenes de concreto bajo el acondicionamiento de temperatura o TMC, curado isotérmico de especímenes y ensayos de resistencia a compresión de núcleos y muestras cilíndricas de concreto.

### 3.2.2.1. Construcción de placas

Con relación a lo descrito en el numeral 3.2.1.2, la construcción de las seis placas de 9 m<sup>2</sup> de 3m de largo por 3m de ancho, con los espesores determinados (0,10m, 0,12m y 0,15m) se realizó con el concreto fabricado en una obra en la ciudad de Bogotá, de la constructora Arquitectura y concreto SAS, con el fin de asimilar las condiciones críticas posibles encontradas in situ en cuanto a las variables de mano de obra, temperatura y humedad. El concreto utilizado para la fabricación de las placas esta descrito en los numerales 3.1.1 y 3.2.1.3, la resistencia nominal fue de 28 MPa.

En total se utilizaron 5,10 m<sup>3</sup> de concreto y 3,6 m<sup>2</sup> de formaleta para la conformación de los laterales de las placas. Se contó con 3 personas que trabajaron 2 horas/hombre por cada placa, para el mezclado (en planta de concreto Altron AM-25), extendido y afinado del concreto en cada una de las placas. La herramienta menor y ferretería necesaria para la ejecución de los trabajos fue suministrada también por la constructora. El proceso de construcción de las placas se describe en la Tabla 6, cada una de las actividades fueron supervisadas por el investigador a fin de controlar el proceso de construcción.

Tabla 6. Proceso de construcción de placas de concreto

	<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>
<b>a</b>	Armado de formaleta	Extendido e instalación en la zona de la formaleta, de acuerdo a las dimensiones de las placas
<b>b</b>	Fabricación del concreto y control de asentamiento	Mezclado del concreto en planta
<b>c</b>	Colocación de concreto	Transporte del concreto desde planta hasta la zona de construcción de las placas
<b>d</b>	Extendido y vibrado del concreto	Se extiende el concreto con pala y se realiza el vibrado con vibrador de ajuga para eliminar aire y dar compacidad
<b>e - f</b>	Afinado superficial del concreto	Afinado de la superficie del concreto en las placas para darle acabado liso

La construcción de las placas se realizó por espesores, es decir, primero se construyeron las placas de 0,10m de espesor, posteriormente las de 0,12m y por último las de 0,15m; el proceso de construcción de observa gráficamente en la Fig. 17.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 17. Proceso de construcción de placas de concreto

(a) Armado de formaleta, (b) Fabricación y control de asentamiento, (c) Colocación del concreto, (d) Extendido y vibrado del concreto, (e) Afinado superficial, (f) Placas terminadas.

### 3.2.2.2. Medición de temperaturas y humedad relativa

La medición de humedad relativa del ambiente en el lugar donde se construyeron las placas se realizó con las características descritas en el numeral 3.1.5. La medición de temperaturas en las placas de concreto se realizó con base en lo estipulado en los numerales 3.1.4 y 3.2.1.1, la instrumentación de las placas se ejecutó con la instalación de sensores de temperatura o termocuplas de acuerdo al esquema de la Fig. 15. Además, una vez terminada la construcción de las placas por espesor, se realizó la instalación de las termocuplas con la nomenclatura descrita en la Tabla 3, la conexión de las termocuplas se realiza con el conector en el equipo de adquisición de datos y el sensor directamente al concreto o al ambiente.

Para la distribución correcta de las termocuplas en el espesor de la placa en cada uno de los puntos se construyó un elemento metálico en forma de “T” (Fig. 18), para distribuir de acuerdo a las distancias necesarias las termocuplas, es decir, de acuerdo al espesor de la placa, los sensores se ubican en distancias exactas para que la lectura de las temperaturas pueda ser igual en cuanto a condiciones de ubicación en todas las zonas (esquina, borde, centro).

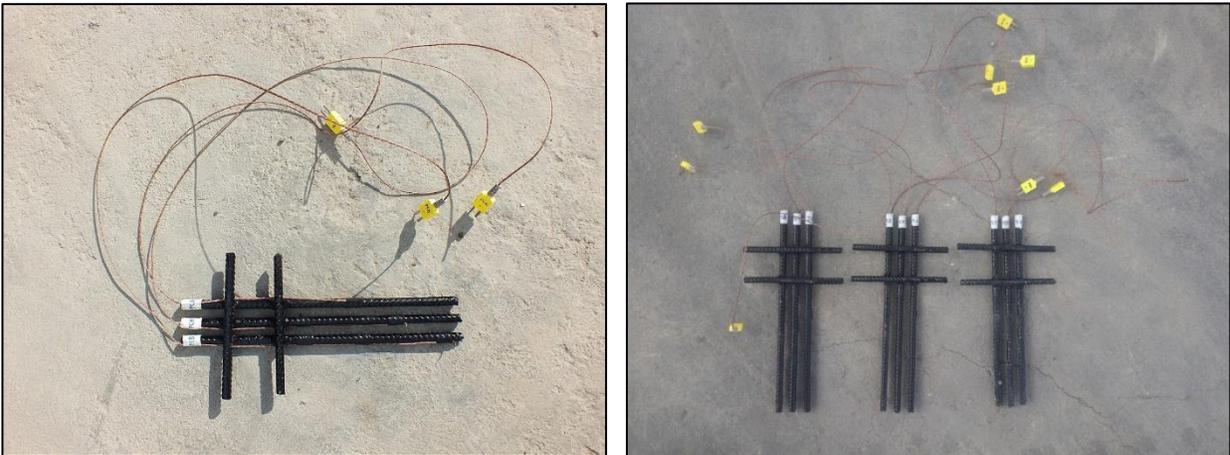


Fig. 18. Elemento para instalación de termocuplas

En vista de que los espesores de las placas varían, la instalación de las termocuplas se realiza de acuerdo a las distancias dadas en la Tabla 7.

Tabla 7. Distancias de ubicación de termocuplas en espesor

Esquina	Punto		Profundidad de termocupla (m)		
	Borde	Centro	Placa 0,1 m	Placa 0,12 m	Placa 0,15 m
(1) PEA	(4) PBA	(7) PCA	0,01	0,01	0,01
(2) PEM	(5) PBM	(8) PCM	0,05	0,06	0,075
(3) PEB	(6) PBB	(9) PCB	0,09	0,11	0,14
	(10) Cilindro			0,05	

El elemento para la instalación de las termocuplas se introdujo en el concreto, como lo muestra la Fig. 19, asegurando la verticalidad en los tres puntos (esquina, borde, centro), también se introdujo la termocupla en el cilindro como lo muestra la Fig. 20.

Previamente, el equipo de adquisición de datos se encendió y se dejó listo para la toma de datos. Una vez introducidas las termocuplas en el concreto se inicia el proceso de medición por 7 días, en el apartado 4.1. Desarrollo de temperaturas y humedad relativa) se describen los resultados obtenidos de la medición.



Fig. 19. Instalación de termocuplas en placas



Fig. 20. Instrumentación de cilindro

### 3.2.2.3. Extracción de núcleos

Posterior a la construcción de las placas, se realiza desde el día 1 la extracción de núcleos para cada placa con el equipo descrito en el numeral 3.1.6, el procedimiento de extracción se ejecutó con relación a la ASTM C42, con un diámetro de núcleos de 50 mm y una altura de 100 mm para cumplir la relación 2 a 1 mínima que demanda la norma, como lo muestra la Fig. 21.



Fig. 21. Extracción de núcleos

La logística de extracción y ensayo se describe en la Tabla 8, los núcleos extraídos fueron ensayados el mismo día para asegurar que el dato de resistencia a compresión estuviera dentro del día estudiado.

Por cada día de ensayo (1, 2, 3 y 7) se realizaron 9 núcleos, repartidos en las zonas de medición de temperaturas (3 núcleos en la esquina, 3 núcleos en el borde y 3 núcleos en el centro), para un total de 36 núcleos por placa y 108 núcleos en total para todas las placas.

Tabla 8. Logística de extracción de núcleos

Actividad	Día	Hora inicio	Hora fin
<b>1. Inicio medición de temperaturas</b>	0	17:00	--
<b>2. Extracción de núcleos día 1</b>	1	7:00	8:00
<b>3. Acondicionamiento de humedad</b>	1	9:00	14:00
<b>4. Refrentado de núcleos día 1</b>	1	14:00	16:00
<b>5. Ensayo a compresión</b>	1	16:00	17:00
<b>Para los días 2, 3 y 7 se repiten las mismas actividades y horario</b>			

Adicional a lo anterior, después de la extracción, las caras de los núcleos fueron refrentadas con azufre bajo los criterios de la ASTM C617, para luego realizarse el ensayo a compresión, como se observa en la Fig. 22.



Fig. 22. Núcleo refrentado y con acondicionamiento de humedad listo para ensayo

El refrentado se realizó en las instalaciones de los laboratorios SGS Contecon Urbar, en la ciudad de Bogotá.

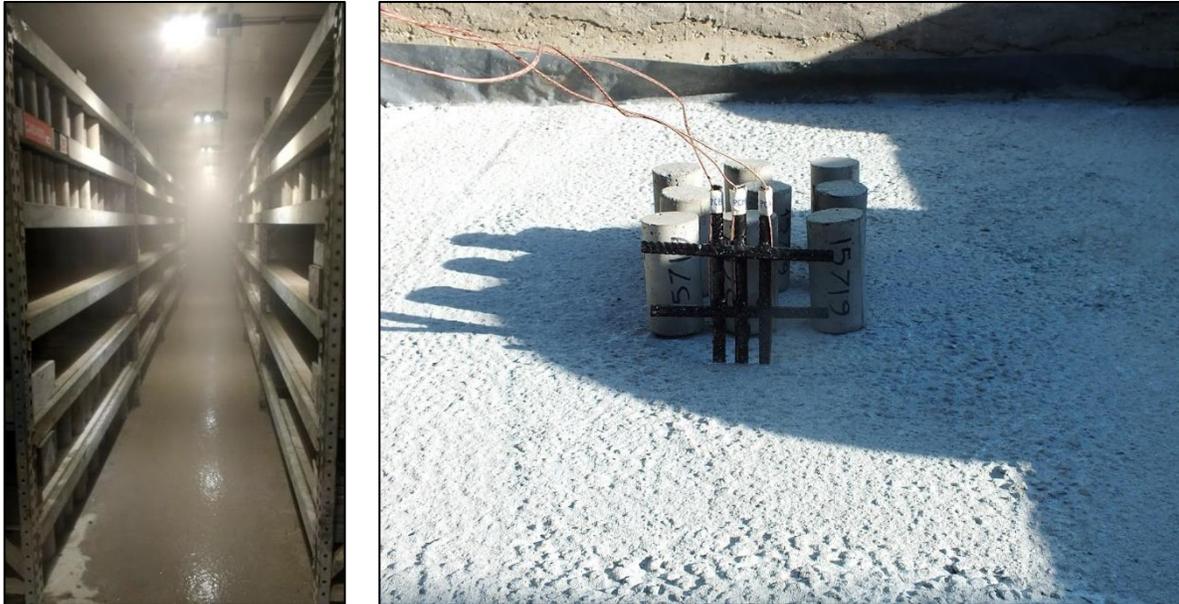
#### 3.2.2.4. Resistencia a la compresión de núcleos y muestras cilíndricas

El ensayo a compresión de los núcleos y las muestras de concreto cilíndricas se realizó en el equipo descrito en el numeral 3.1.7; por cada placa de concreto se fabricaron muestras cilíndricas para control de calidad con las mismas dimensiones de los núcleos (50 mm x 100 mm), en total se fabricaron 25 cilindros por placa, 12 unidades para curado isotérmico a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  según lo estipulado por la ASTM C31, 12 unidades para curado in situ (en las mismas condiciones de temperatura y humedad de las placas) y 1 cilindro para medición de temperaturas. En total se fabricaron 75 cilindros para todas las placas, la fabricación de los cilindros se muestra en la Fig. 23.



Fig. 23. Fabricación de cilindros de 50 mm x 100 mm

Por cada día (1, 2, 3 y 7) de estudio se ensayaron 6 cilindros, 3 con curado isotérmico y 3 con curado in situ, adicional a estos cilindros se ensayaron también los 9 núcleos extraídos por día como se describió en el numeral 3.2.2.3. Los cilindros con curado in situ o sin curado, fueron colocados en la misma zona de las placas y los que se sometieron a curado isotérmico fueron llevados al laboratorio y curados en cámara. En la Fig. 24 se observan los procedimientos de curado.



(a)

(b)

Fig. 24. Curado de muestras cilíndricas, (a) isotérmico (b) in situ

El ensayo a compresión se realizó bajo los parámetros de la ASTM C39M, y similar a los núcleos los cilindros también fueron refrentados según la ASTM C617, como lo muestran las Fig. 25 y Fig. 26 respectivamente.



Fig. 25. Ensayo a compresión de muestra cilíndrica y núcleo



Fig. 26. Cilindro refrentado listo para ensayo

### 3.2.2.5. Acondicionamiento de temperatura de curado de muestras cilíndricas

Una vez fabricadas las muestras cilíndricas, de acuerdo a la ASTM C31, los cilindros fueron sometidos al curado con acondicionamiento de temperatura, en la cámara climática, el curado se realiza por el mismo periodo de tiempo (7 días) al cual se sometieron las placas y los cilindros con curado isotérmico y sin curado y se ensayan a compresión en las edades establecidas, ver la Fig. 27.



Fig. 27. Curado de muestras cilíndricas en cámara climática

### 3.2.3. Etapa de Análisis

Una vez ejecutados los ensayos en la etapa experimental se realizó la recopilación de los datos y se elaboró una comparación de las resistencias a la compresión obtenidas con el fallo de los especímenes cilíndricos curados bajo el acondicionamiento de temperatura (cilindros TMC) y los núcleos extraídos de las placas.

Adicional a lo anterior y a manera de comparación, a fin de evaluar la realidad de las resistencias obtenidas bajo curado isotérmico, se compararon los resultados de los núcleos, los especímenes cilíndricos curados bajo el acondicionamiento de temperatura (TMC) y los curados bajo método estándar.

Se verificó la exactitud de los resultados obtenidos entre los núcleos extraídos y los especímenes cilíndricos curados bajo el acondicionamiento de temperatura, realizando una comparación de los resultados de cada una de las muestras ensayadas a las diferentes edades; por cada edad de ensayo se obtuvo la relación entre el resultado del núcleo extraído y el cilindro TMC, esta relación se expresó en porcentaje y se definió qué tan lejos o cerca está el valor de resistencia de los cilindros TMC en comparación con los núcleos tomados en las placas. El desarrollo de esta etapa de análisis se encuentra en los Capítulos 4 y 5.

## Capítulo 4. Resultados, análisis y discusión

La investigación explicó el comportamiento de una variable en función de otras, lo cual estableció el comportamiento de la resistencia del concreto en placas macizas en función de la temperatura de curado y el desarrollo de temperaturas del concreto, para este nivel de análisis se utilizó el control metodológico y estadístico de las variables existentes.

### 4.1. Desarrollo de temperaturas y humedad relativa

La instrumentación con termocuplas en cada una de las placas arrojó el desarrollo de las temperaturas durante 7 días en cada uno de los puntos medidos. Se puede evidenciar el rango de temperaturas máximas y mínimas presentes en cada punto instrumentado.

La Tabla 9 discrimina los resultados de temperatura en los puntos instrumentados en cada placa, se observa la temperatura máxima, la mínima y el dato promedio de temperatura obtenido durante los 7 días de medición.

Tabla 9. Temperaturas máximas y mínimas en placas de concreto

Temperatura	Amb.	Cil.	PEB	PEM	PEA	PBB	PBM	PBA	PCB	PCM	PCA
<b>Placa 0,10 m</b>											
<b>Promedio (°C)</b>	16,5	16,9	20,8	20,7	20,4	21,1	21,0	20,8	21,4	21,3	21,0
<b>Máximo (°C)</b>	27,7	24,0	31,8	34,1	38,5	32,4	34,7	37,4	30,2	32,2	35,3
<b>Mínimo (°C)</b>	10,8	12,9	15,6	15,1	14,3	15,9	15,1	14,3	16,8	16,2	15,2
<b>Placa 0,12 m</b>											
<b>Promedio (°C)</b>	15,9	16,4	19,5	19,6	19,3	19,8	19,7	19,5	20,6	20,5	20,2
<b>Máximo (°C)</b>	28,5	22,2	26,4	28,4	31,6	25,6	27,4	30,1	25,8	27,1	29,0
<b>Mínimo (°C)</b>	8,0	11,5	15,3	14,7	13,7	16,2	15,4	14,2	16,5	16,4	15,3
<b>Placa 0,15 m</b>											
<b>Promedio (°C)</b>	15,9	16,4	20,7	20,5	19,8	20,9	20,8	20,1	22,2	21,9	21,1
<b>Máximo (°C)</b>	26,1	22,2	29,2	31,2	33,9	29,2	31,2	33,7	30,5	32,0	33,6
<b>Mínimo (°C)</b>	9,4	12,9	16,3	15,4	14,2	16,8	16,1	14,9	17,7	16,9	15,7

Los historiales de temperaturas definidos durante la medición de las 3 placas de concreto se tomaron durante los meses de septiembre y octubre del año 2017. Se obtuvieron picos de temperaturas en la matriz de concreto de 38°C en la placa de 0.10 m, de 31°C en la placa de 0.12 m y de 33°C en la placa de 0.15 m, estos máximos de se presentan en la parte superior de las placas. La medición de las temperaturas hizo posible determinar la relación entre la ganancia de resistencia y las altas temperaturas tal y como lo estudiaron (Soutsos et al., 2016), esto, en relación a la aceleración del proceso de hidratación del cemento y la microestructura, evidenciada durante la extracción de los núcleos con la homogeneidad del concreto (Bahafid et al., 2017; Zhao et al., 2015).

Las mediciones reportaron que, las temperaturas de las noches y sobre las primeras horas de la mañana son superiores en la parte inferior de las placas e inferiores en la zona superior, lo cual se presenta con la disminución de la temperatura ambiente. Por otro lado, una vez la temperatura ambiente aumenta durante las horas del día sucede lo contrario, la superficie superior de la placa está a una temperatura más alta que la inferior, el fenómeno también fue estudiado y evidenciado por (Gasch et al., 2012).

Durante las primeras 24 horas después de la producción y el vaciado del concreto se observan incrementos de temperatura con relación a la temperatura ambiente en el concreto de las placas, diferente al cilindro que tiende a seguir el comportamiento térmico de la temperatura ambiente.

El desarrollo de temperaturas medido en las placas de concreto se puede observar para la placa de 0.10 m en la Fig. 28, placa 0.12 m en la Fig. 29 y para la placa 0.15 m en la Fig. 30.

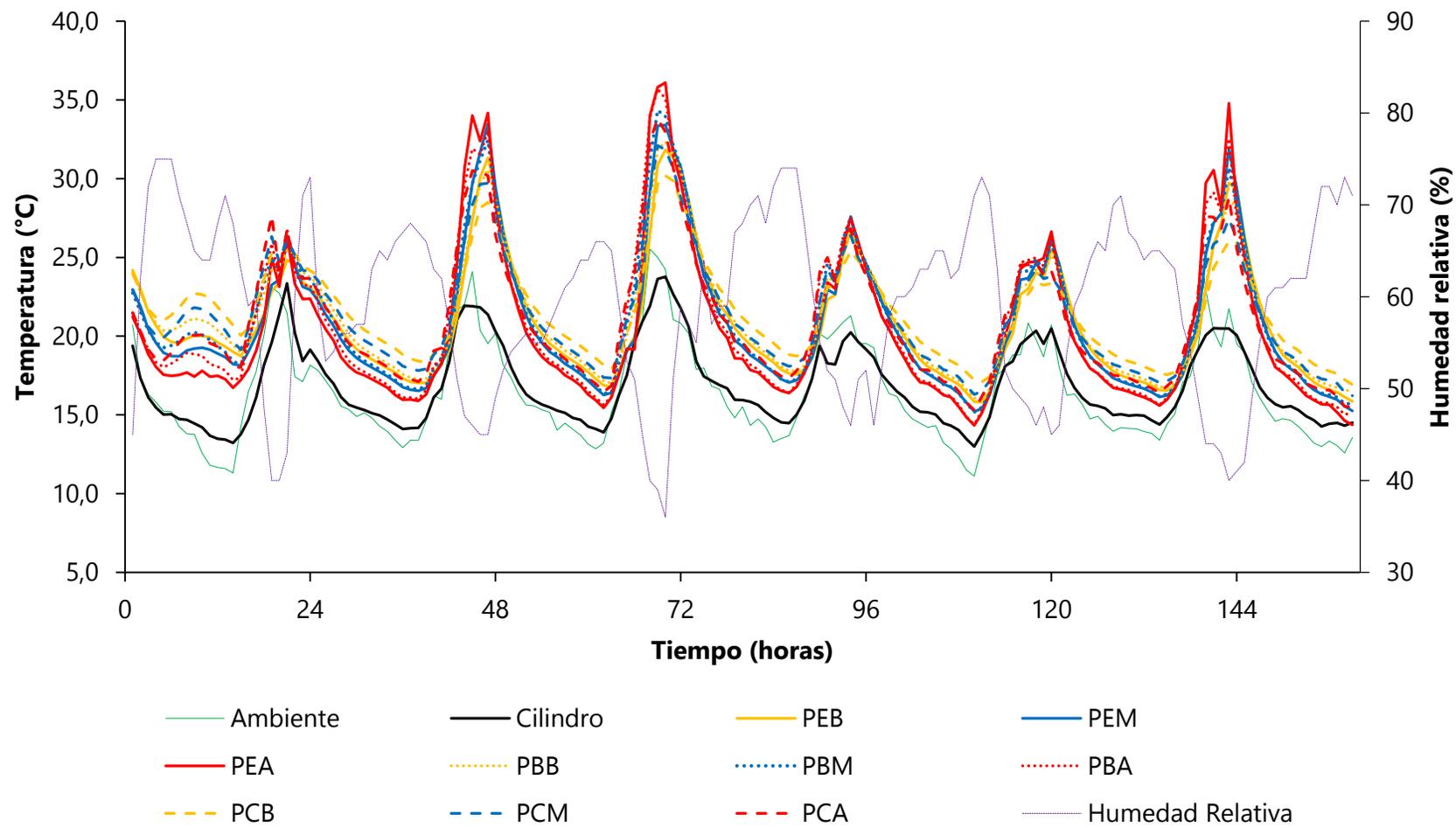


Fig. 28. Desarrollo de temperaturas y humedades relativas en la placa de 0.10 m

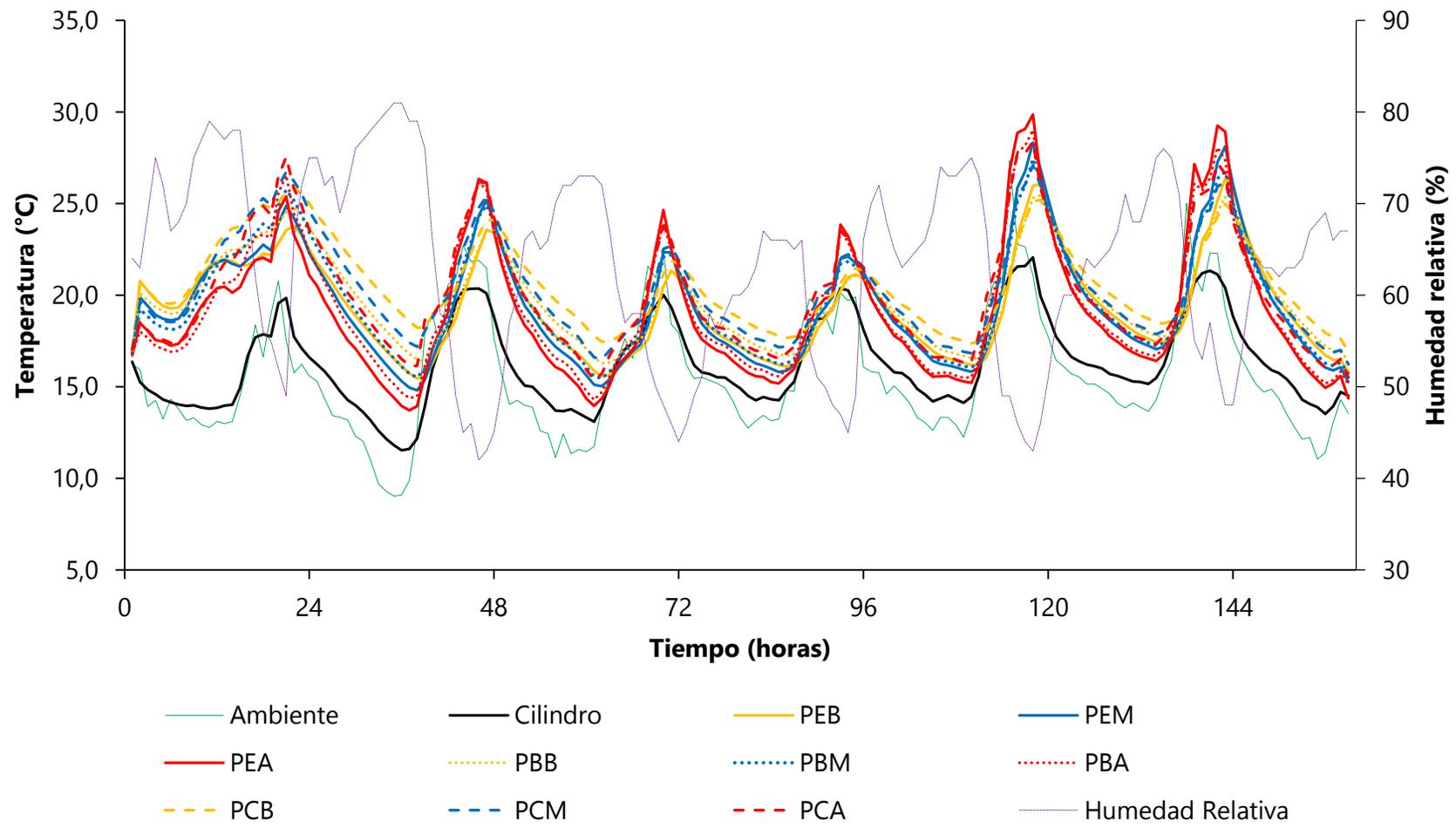


Fig. 29. Desarrollo de temperaturas y humedades relativas en la placa de 0.12 m

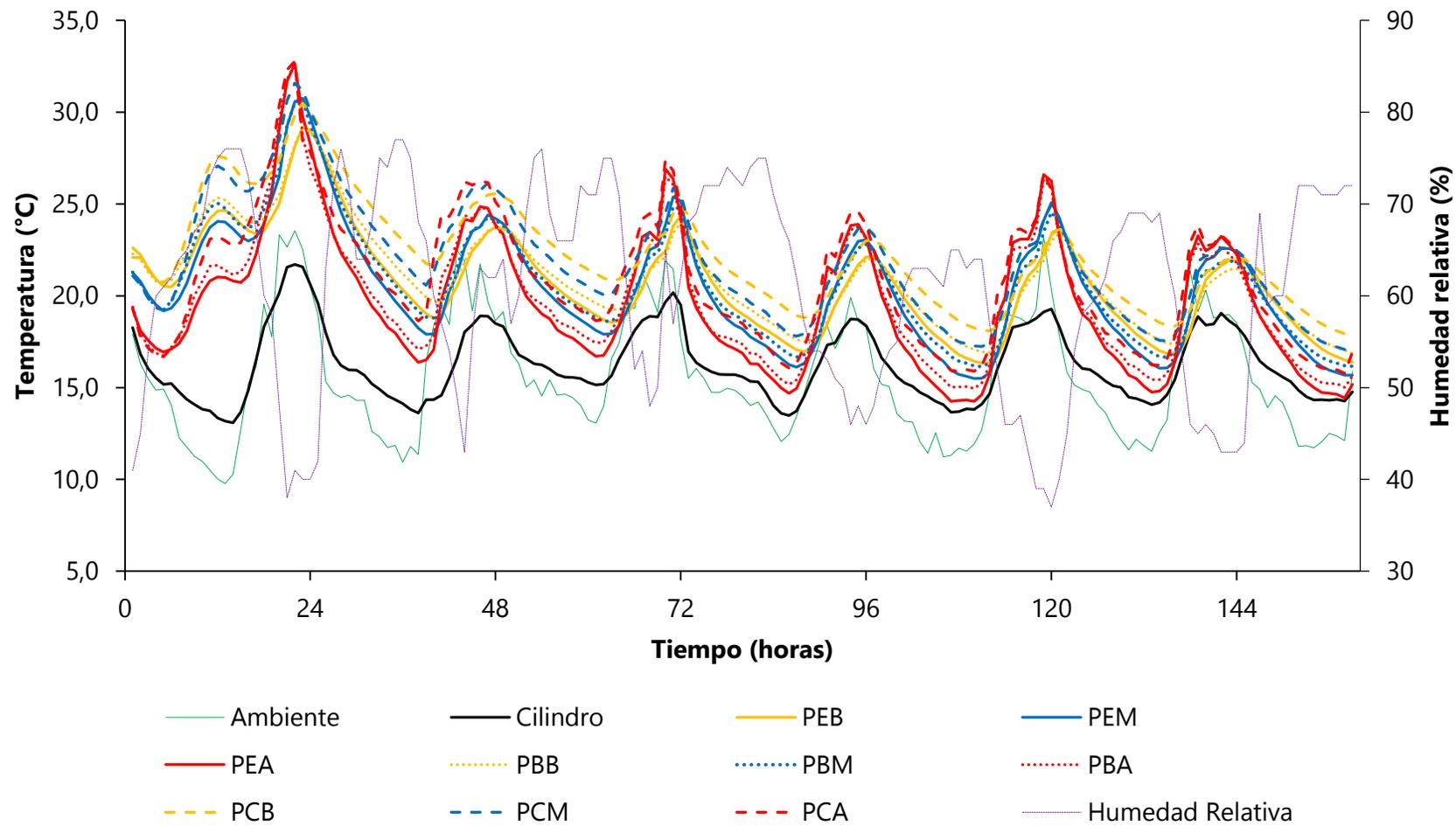


Fig. 30. Desarrollo de temperaturas y humedades relativas en la placa de 0,15 m

Con el paso de las horas la temperatura en el concreto sigue la tendencia de la ambiente, existiendo en los 9 puntos medidos valores superiores a la temperatura ambiente durante el día e inferiores incluso por debajo de la temperatura ambiente en las noches, esto además lo evidenciaron (Benaicha et al., 2016; Sofi et al., 2012; W. F. Price & J. P. Hynes, 1996).

La tendencia de los 9 puntos instrumentados, en la mitad del espesor de las placas en los puntos (PCM, PEM y PBM), refleja que las temperaturas medidas tienden a ser el promedio de las mediciones realizadas arriba (A) y abajo (B) de las placas.

En las Fig. 28, Fig. 29 y Fig. 30, se muestra además las humedades relativas medidas durante el mismo rango de tiempo que las temperaturas en el concreto, estas se utilizaron para el curado de los cilindros con acondicionamiento de temperatura y se observa cómo, con el aumento de la temperatura ambiente, la humedad relativa disminuye y viceversa.

La importancia de la humedad en el ambiente de curado es resaltada por (Mak & Torii, 1995; Rómel Solís Carcaño & Eric I. Moreno, 2005) y está relacionada directamente con la ganancia de resistencia del concreto; la simulación del ambiente en el acondicionamiento de temperatura de curado implica que no solo se tuvo en cuenta las condiciones internas de temperatura dentro de la matriz del concreto, sino además, las externas considerando las variaciones de humedad relativa.

La medición de la humedad relativa del ambiente no tiene en cuenta las variaciones de la humedad dentro del concreto y como estas son diferentes tanto, en las placas como en los cilindros, debido a los volúmenes, la geometría y el desarrollo de temperaturas. De esta variable no se realizaron medidas dentro de la matriz de concreto, también importantes en la evolución de las propiedades mecánicas. Esta limitante en la investigación no fue tenida en cuenta debido a los altos costos relacionados con esta clase de medición.

La relación entre la humedad interna, la del ambiente y la temperatura está ligada a la hidratación de la matriz, las propiedades y la forma de los productos de hidratación como el C-H-S, este aspecto relacionado directamente con el modo y tipo de curado lo estudió además (Soutsos et al., 2016; Zhao et al., 2015), encontrado que puede generar diferencias en los resultados de resistencia en los cilindros curados con acondicionamiento de temperatura con respecto a la resistencia in situ dada por los núcleos.

Las condiciones de humedad y temperatura desiguales dentro de la matriz sustentan lo descrito anteriormente, ya que de acuerdo a los resultados de (Mengxiao

et al., 2015), las resistencias del concreto se pueden ver afectadas por un cambio en la tasa de hidratación del cemento, lo que conlleva a una distribución desigual de los productos de hidratación en la pasta de cemento, provocando diferencias en el desarrollo de la resistencia de las placas y por tanto de los cilindros.

#### 4.2. Desarrollo de resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a compresión obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, se describen en las Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, donde se observan las resistencias a 1, 2, 3 y 7 días para los cilindros con curado isotérmico, sin curado y los núcleos extraídos en cada placa, los valores se presentan en MPa.

Tabla 10. Resistencia en MPa a compresión de cilindros y núcleos – placa 0.10 m

Edad	Cilindros con Curado Isotérmico	Cilindros sin Curado	Núcleos		
			Borde	Centro	Esquina
1	12,90	11,27	12,48	12,00	13,12
2	18,03	15,60	15,68	17,27	17,16
3	20,50	17,30	21,57	19,42	22,23
7	24,33	23,80	22,87	20,00	24,70

Tabla 11. Resistencia en MPa a compresión de cilindros y núcleos – placa 0.12 m

Edad	Cilindros con Curado Isotérmico	Cilindros sin Curado	Núcleos		
			Borde	Centro	Esquina
1	5,67	5,03	9,04	9,11	10,17
2	11,57	9,20	11,66	15,83	15,47
3	14,57	14,47	17,28	19,32	17,98
7	19,37	19,80	31,42	31,97	32,28

Tabla 12. Resistencia en MPa a compresión de cilindros y núcleos – placa 0.15 m

Edad	Cilindros con Curado Isotérmico	Cilindros sin Curado	Núcleos		
			Borde	Centro	Esquina
1	11,57	9,37	15,94	14,65	15,72
2	18,97	16,20	24,86	24,26	21,60
3	23,67	18,20	31,36	27,62	30,34
7	27,37	20,27	31,99	30,05	30,95

Los valores obtenidos en cada conjunto de cilindros fueron evaluados bajo un análisis ANOVA, con el fin de estudiar las diferencias entre ellos y la significancia estadística que representan. Ver anexo 1.

Los resultados de resistencia a la compresión de los cilindros sin curado y los cilindros con curado isotérmico a 23 °C, presentan diferencias considerables de hasta 7 MPa. La significancia estadística de estas diferencias son mayores cuando el espesor de la placa se incrementa y es relevante a partir de los 2 días, puesto que el ambiente de los cilindros sin curado se mantiene en temperaturas promedio de 16 °C a diferencia de los 23 °C del curado isotérmico, lo que indicó el aumento de la resistencia a edades tempranas con el aumento de la temperatura de curado tal y como lo muestra (Boubekeur et al., 2014).

Así mismo los resultados establecen cómo la resistencia está influenciada por factores tales como la temperatura del concreto, el calor de hidratación y las condiciones ambientales presentes validando lo dicho por (Sofi et al., 2014).

Las bajas temperaturas iniciales de la placa de 0.12 m generaron un cambio en la hidratación del cemento, generando concentración de hidratos en las áreas que están alrededor de los granos del cemento (Benaicha et al., 2016), produciendo un aumento en la porosidad, representada en la disminución de la resistencia a 1 día.

Los cilindros con curado isotérmico en las placas de 0.10 m y 0.15 m obtuvieron resistencias a la compresión a 7 días muy cercanas con una diferencia de 3 MPa, pero los resultados de la placa 0.12 m tienen una diferencia mayor con relación a la resistencia a los 7 días de las otras placas, esta diferencia está entre 5 y 7 MPa. Esto debido a que el concreto utilizado en esta placa tenía una relación agua/cemento de 0.53, mayor a la relación del concreto utilizado en las placas 0.10 m y 0.15 m de 0.50 con 10kg más de cemento, estos resultados referencian la importancia establecida por (Castellano et al., 2016) en cuanto a correlación de la relación agua/cemento y la temperatura en la hidratación del cemento y la resistencia. El cambio en la cantidad de cemento y la relación agua/cemento, se debió a un error en la escogencia del diseño

y la programación de éste, en el equipo de producción de concreto descrito en el apartado 3.1.2.

La resistencia a la compresión de los núcleos extraídos, que representa la resistencia in situ del concreto, se ve influenciada también por el desarrollo de las temperaturas en la matriz, estas resistencias presentan diferencias bajas en la placa con menor espesor pero altas en las placas de 0.12 m y 0.15 m con relación a los cilindros con curado isotérmico.

Las diferencias existentes en los núcleos de todas las placas, en las zonas de borde, centro y esquina, presentan diferencias que no son significativas desde el punto de vista estadístico.

La afectación de los resultados puede deberse al proceso de perforación tal y como lo menciona (Yikici & Chen, 2015) y así mismo por el espesor del elemento ya que la resistencia del núcleo en la parte inferior tiene una tendencia a ser más alta que la resistencia del núcleo en la parte superior, por el diferencial de temperatura existente, que es menor en la placa de 0.10 m, esto debido a influencia de las temperaturas, que ya se mencionó y es correspondido a su vez por (Abdel-Jawad, 2006).

Las resistencias de los núcleos obtenidas muestran cómo las muestras cilíndricas curadas de forma estándar o con curado isotérmico sobreestiman la resistencia in situ del concreto, esto también es afirmado por (W. F. Price & J. P. Hynes, 1996). Tan solo en los núcleos de la placa 0.10 m los valores de resistencias tienen cercanía a los obtenidos por los cilindros con curado isotérmico.

En la placa de 0.12 m los núcleos extraídos a 1 día presentan una resistencia menor con respecto a los núcleos ensayados a la misma edad en las otras placas, con valores de hasta 6 MPa por debajo, lo que puede indicar que la evolución de resistencia se vio afectada por las bajas temperaturas que se presentaron durante las 12 primeras horas después de haber vaciado el concreto, con una diferencia promedio de hasta 4°C en comparación con las otras placas.

Por otra parte las resistencias de los núcleos de la placa 0.15 m a 1 y 2 días presentan valores mayores a las otras placas en las mismas edades, viéndose influenciada esta ganancia de resistencia por las temperaturas promedio durante las primeras 48 horas que alcanzaron hasta 4°C por encima de los rangos de temperaturas de las placas 0.10 m y 0.12 m. Este comportamiento caracteriza el desarrollo de la resistencia del concreto, pues depende en gran medida de la historia de la temperatura durante el tiempo, una vez es vaciado el elemento (Yikici & Chen, 2015), mostrando relación a su vez con el efecto en la hidratación del cemento y la

afectación en la reducción del tamaño de las partículas, lo que significa que la influencia del desarrollo térmico a edades tempranas sobre la microestructura del cemento y por tanto, sobre las propiedades físicas y mecánicas, caracterizan el comportamiento del concreto (Bahafid et al., 2017).

### 4.3. Ajuste de resistencia de núcleos

La relación entre la resistencia a la compresión de un núcleo y la resistencia in situ del concreto en una estructura puede tener un sesgo, si el tamaño del núcleo no tiene un tamaño estándar de 100 mm por 200 mm (Bartlett, 1997). El tamaño de los núcleos obtenidos en cada una de las placas fue de 50 mm por 100 mm, por esto fue necesario realizar una conversión de la resistencia del núcleo a la resistencia in situ, así mismo, la corrección se realizó por la afectación presente en la extracción de los núcleos, a razón del equipo y el proceso de corte y extracción, tal y como lo estudiaron (W. F. Price & J. P. Hynes, 1996; Yikici & Chen, 2015). Los factores de corrección de la resistencia obtenida en los núcleos los describe (Bartlett, 1997) de acuerdo con la ecuación (2) siguiente:

$$f_{c.ip} = F_{mc} \cdot F_d \cdot F_{l/d} \cdot F_r \cdot f_{cNS} \quad (2)$$

Donde;  $f_{c.ip}$  es la resistencia in situ,  $F_{mc}$  representa el efecto de la condición húmeda o seca durante el ensayo según la ASTM C42,  $F_d$  es el factor que considera el daño en el borde del núcleo durante la extracción,  $F_{l/d}$  es la relación entre el diámetro y la longitud del núcleo,  $F_r$  hace referencia a la presencia de refuerzo en el núcleo y  $f_{cNS}$  es la resistencia no estándar obtenida del núcleo.

Los valores de cada factor tomados para la corrección de la resistencia de los núcleos se observan en la tabla 13.

Tabla 13. Factores de corrección para ajuste de resistencia de núcleos. Fuente (Bartlett, 1997).

Factor	Valor
Fmc	0,96
Fd	1,12
F <sub>l/d</sub>	1,00
Fr	1,00

Las resistencias corregidas en MPa de los núcleos extraídos de acuerdo a los factores de corrección en cada una de las placas se pueden ver en las Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16.

Tabla 14. Resistencia corregida de núcleos – placa 0.10 m

<b>Edad</b>	<b>Núcleos</b>		
	<b>Borde</b>	<b>Centro</b>	<b>Esquina</b>
1	14,23	13,68	14,95
2	17,87	19,68	19,56
3	24,59	22,14	25,34
7	26,06	22,80	28,15

Tabla 15. Resistencia corregida de núcleos – placa 0.12 m

<b>Edad</b>	<b>Núcleos</b>		
	<b>Borde</b>	<b>Centro</b>	<b>Esquina</b>
1	10,30	10,39	11,59
2	13,29	18,04	17,63
3	19,69	22,02	20,49
7	35,81	36,43	36,79

Tabla 16. Resistencia corregida de núcleos – placa 0.15 m

<b>Edad</b>	<b>Núcleos</b>		
	<b>Borde</b>	<b>Centro</b>	<b>Esquina</b>
1	18,17	16,70	17,91
2	28,33	27,65	24,62
3	35,75	31,48	34,58
7	36,46	34,25	35,27

#### 4.4. Curado con acondicionamiento de temperatura

El desarrollo de temperaturas medido permitió establecer el comportamiento térmico del concreto en los diferentes espesores de cada placa fabricada. La elaboración de muestras cilíndricas con curado isotérmico y sin curado, establecieron el comportamiento mecánico del concreto en relación a la resistencia a la compresión.

De igual manera, los núcleos extraídos en cada zona de las placas y el ensayo a compresión de los mismos, permitieron conocer la resistencia in situ del concreto.

Dado el comportamiento térmico del concreto y conociendo la resistencia in situ a la compresión, el curado con acondicionamiento de temperatura de muestras cilíndricas se realizó con el historial de temperaturas con las cuales se ejecutó una estimación por madurez de la resistencia de cada placa, en cada zona instrumentada y cuyo resultado tiene la menor diferencia con respecto a las resistencias obtenidas en los núcleos de cada zona de las placas.

Los 9 perfiles de temperatura obtenidos se analizaron a fin de que el historial escogido simulara las condiciones de cada placa, autores como (Mak & Torii, 1995; Sofi et al., 2012) simularon las condiciones en ambientes con agua a temperatura controlada sin tener en cuenta la humedad relativa del ambiente, o utilizando una humedad relativa controlada con un valor fijo (Jiang, Jiang, Zha, & Song, 2017), dejando de lado la importancia de la cantidad de vapor de agua en el ambiente y su relación con la ganancia de resistencia como lo resaltan (Rómel Solís Carcaño & Eric I. Moreno, 2005), así como el comportamiento por la inercia térmica del material y el desprendimiento de calor (Ng et al., 2011).

La hidratación del cemento en la matriz del concreto es acompañada por la evolución del calor, conllevando al concreto a posibles problemas de resistencia (Atiş, 2002; Schackow et al., 2016).

La estimación por madurez se realizó para cada conjunto de temperaturas en cada uno de los puntos descritos en la Tabla 7, por tanto, para cada placa se analizaron 9 puntos, en donde se obtuvieron las resistencias estimadas y con relación a los valores obtenidos en el ensayo de los núcleos extraídos se estimó el error relativo. La curva escogida para el acondicionamiento de temperatura fue aquella cuyo error relativo promedio fue menor.

Las muestras cilíndricas para el acondicionamiento de temperatura se fabricaron con el mismo diseño de mezcla de las placas, utilizando los materiales y la dosificación con la cual se construyeron las placas. Además, se contempló el cambio de relación agua/cemento en la placa de 0.12 m.

#### **4.4.1. Estimación de resistencias y curva óptima por madurez**

La madurez, se basa en la ley de Arrhenius y es útil para estimar o predecir la resistencia a la compresión a edades tempranas en el concreto (Pereperez Ventura &

Barbera Ortega, 2004). Para la estimación de la resistencia por madurez según la ASTM 1074-11 se debe conocer la variación de las resistencias para una determinada historia de temperaturas, por tanto, utilizando la ecuación (3) que se deriva de la ley de Arrhenius, se estima una edad equivalente considerando una energía de activación aparente y posterior a esto, se estima la evolución de la resistencia media a compresión utilizando la ecuación (4).

$$J = \sum_{i=0}^{i=t} \left[ e^{\left[ 13,65 - \frac{4000}{273+T_i} \right] \Delta t_i} \right] \quad (3)$$

Donde;  $j$  es la edad equivalente,  $T_i$  es la temperatura medida en determinado punto y  $\Delta t_i$  es la variación del tiempo en escala medida en horas.

$$R = fcm(28) * e^{\left[ S \left[ 1 - \sqrt{\frac{28}{j}} \right] \right]} \quad (4)$$

Donde;  $R$  es la resistencia a la compresión calculada,  $fcm(28)$  es la resistencia obtenida del núcleo,  $j$  la edad equivalente y  $S$  es el coeficiente que depende de la velocidad potencial de endurecimiento del cemento, el cual se debió estimar para el historial de temperaturas de los cilindros con curado isotérmico.

La estimación de resistencias a compresión utilizando el método de madurez arrojó que el punto con menos diferencia o error relativo con respecto a las resistencias obtenidas por el ensayo a compresión de núcleos extraídos y las resistencias estimadas, fue en todas las placas el de centro (C) y abajo en la sección transversal (B), por consiguiente, el desarrollo de temperaturas en el punto (PCB) se utilizó para el curado de las muestras cilíndricas con acondicionamiento de temperaturas, en la Tabla 17 se muestra lo descrito, las resistencias están en MPa.

Tabla 17. Resistencias en MPa a compresión estimadas por madurez y errores relativos

<b>Placa 0.10 m</b>			
<b>Núcleo de borde</b>	<b>Madurez PCB</b>	<b>Diferencias</b>	<b>Error relativo (%)</b>
<b>13,68</b>	13,71	-0,03	-0,2%
<b>19,68</b>	18,54	1,13	5,8%
<b>22,14</b>	20,94	1,20	5,4%
<b>22,80</b>	24,36	-1,56	-6,9%
<b>Promedio</b>		<b>0,18</b>	<b>1,0%</b>
<b>Placa 0.12 m</b>			
<b>Núcleo de borde</b>	<b>Madurez PCB</b>	<b>Diferencias</b>	<b>Error relativo (%)</b>
<b>10,39</b>	14,38	-3,99	-38,4%
<b>18,04</b>	22,52	-4,48	-24,8%
<b>22,02</b>	26,46	-4,43	-20,1%
<b>36,43</b>	40,44	-4,00	-11,0%
<b>Promedio</b>		<b>-4,23</b>	<b>-23,6%</b>
<b>Placa 0.15 m</b>			
<b>Núcleo de borde</b>	<b>Madurez PCB</b>	<b>Diferencias</b>	<b>Error relativo (%)</b>
<b>16,70</b>	20,97	-4,27	-25,6%
<b>27,65</b>	25,77	1,88	6,8%
<b>31,48</b>	29,18	2,30	7,3%
<b>34,25</b>	36,28	-2,03	-5,9%
<b>Promedio</b>		<b>-0,53</b>	<b>-4,3%</b>

La estimación por madurez en el punto evaluado (PCB) permitió conocer la predicción de las resistencias in situ teniendo en cuenta el efecto de la temperatura en el concreto (Pereperez Ventura & Barbera Ortega, 2004), el desarrollo de resistencias de los núcleos extraídos en cada placa y la estimación por madurez de las resistencias de las placas de 0.10 m, 0.12, y 0.15, se pueden observar respectivamente en las Fig. 31, Fig. 32 y Fig. 33 siguientes.

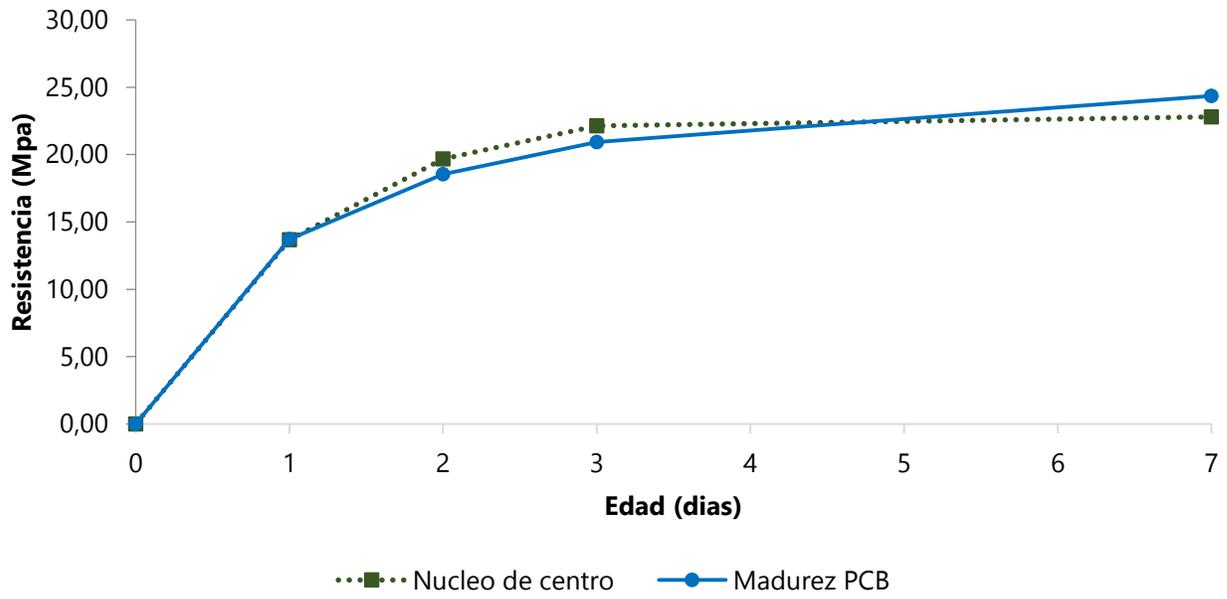


Fig. 31. Evolución de resistencias de núcleos en el punto PCB y estimación por madurez – placa 0.10m

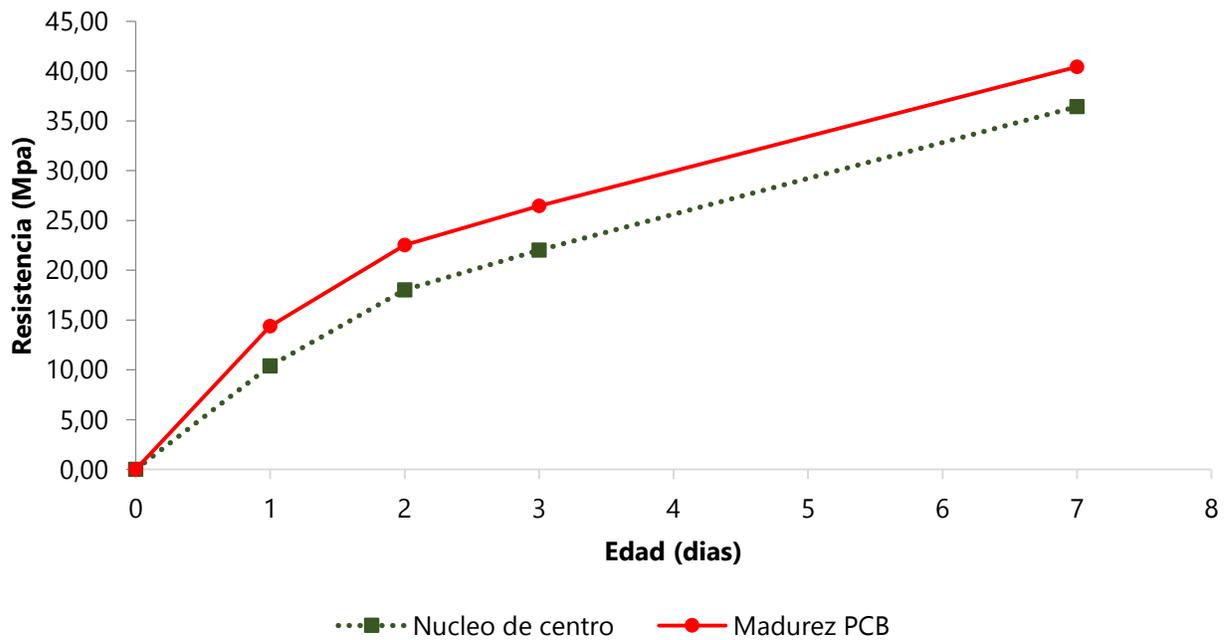


Fig. 32. Evolución de resistencias de núcleos en el punto PCB y estimación por madurez – placa 0.12m

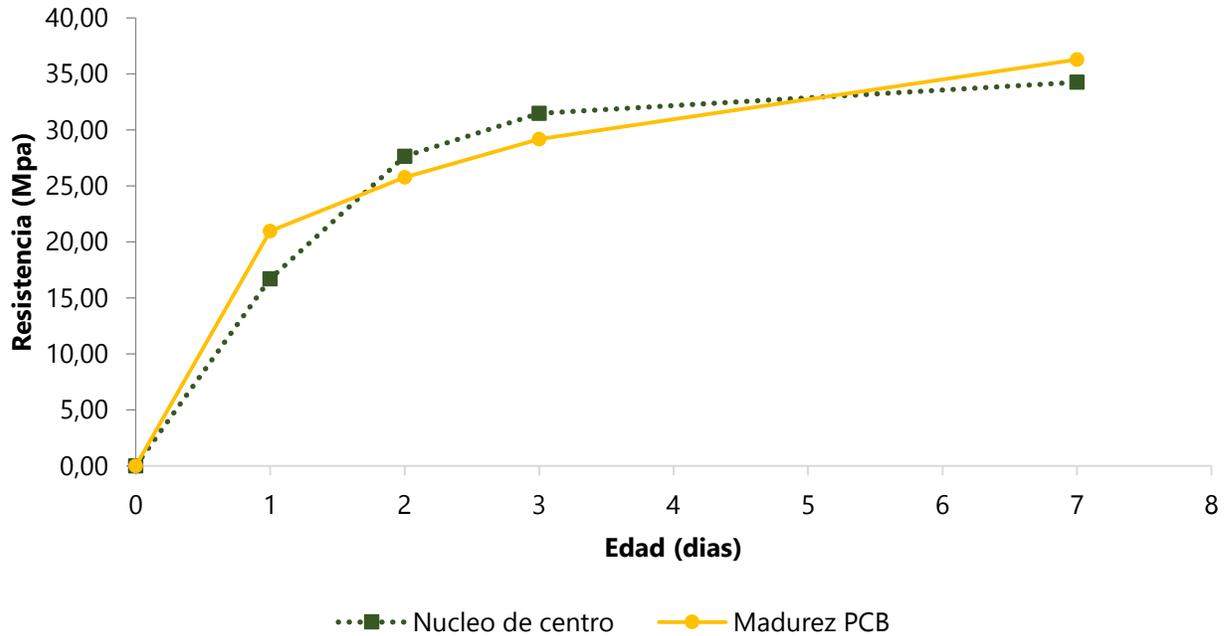


Fig. 33. Evolución de resistencias de núcleos en el punto PCB y estimación por madurez – placa 0.15m

El método de la madurez del concreto proporciona un enfoque para evaluar la resistencia in situ de las placas durante la construcción (Galobardes et al., 2015), la aplicación del método se usó para definir la resistencia en el lugar de medición y que estos valores sean representativos para los de resistencia, obtenidos en los lugares de extracción de los núcleos (Yikici & Chen, 2015). Los valores de resistencia estimados presentaron diferencias o dispersiones tal y como lo evidenciaron (Abdel-Jawad, 2006; Boubekour et al., 2014).

En la Fig. 34 se observan las curvas escogidas en los puntos PCB de cada placa, de acuerdo a la estimación de resistencia por madurez y el error relativo calculado y sobre el cual se estima la diferencia mínima, según las resistencias de los núcleos extraídos.

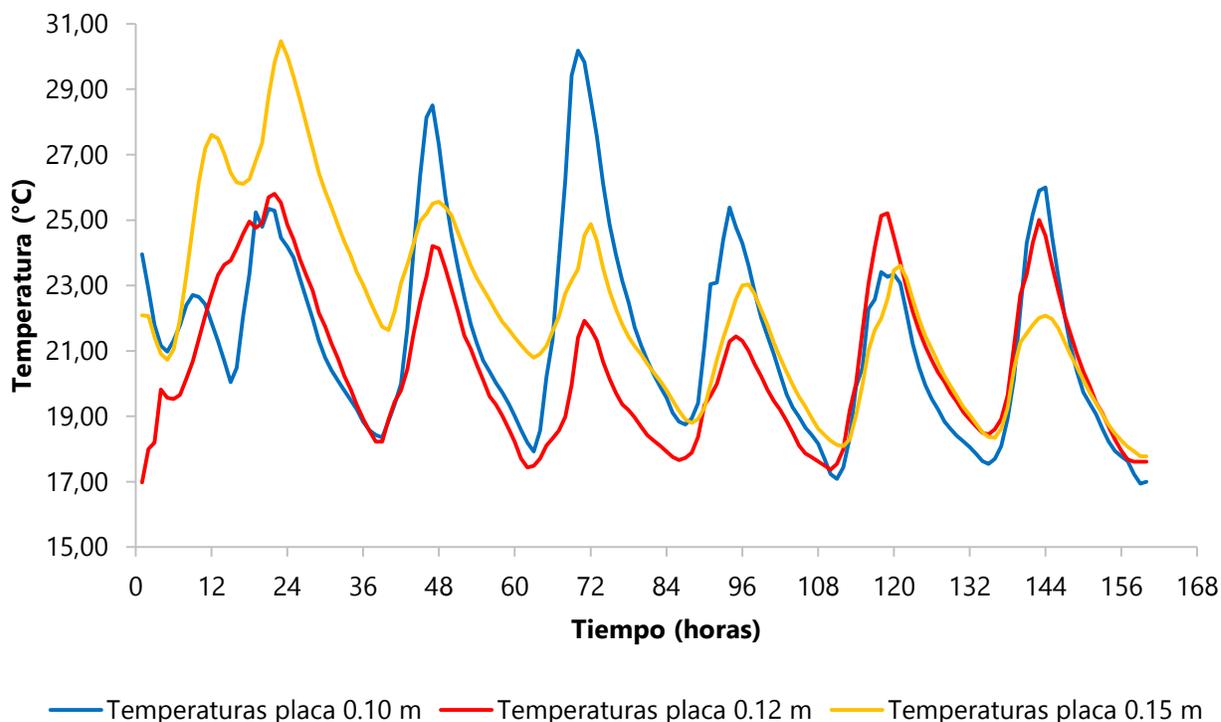


Fig. 34. Curvas de temperatura escogida para el acondicionamiento de temperatura

El proceso para definir la curva óptima con la que se realizó el acondicionamiento de las muestras cilíndricas de cada placa es contrario al desarrollo establecido por (Mak & Torii, 1995; Sofi et al., 2012) , donde se estimaba una curva para el curado con acondicionamiento de temperatura por el promedio de los perfiles medidos de temperatura en la estructura.

Las curvas escogidas para el acondicionamiento de temperatura están respaldadas por la estimación por madurez de las resistencias in situ y los errores calculados. La utilización de éstas disminuye la incertidumbre que existe en la escogencia 1 de los 9 puntos instrumentados para el curado con acondicionamiento y se ampara en los errores relativos de la estimación. Reflejar la realidad del comportamiento in situ de una estructura es el concepto que centra la importancia de lo anterior.

#### 4.5. Resistencia de muestras curadas con acondicionamiento de temperatura

Las muestras cilíndricas curadas bajo acondicionamiento de temperatura, utilizando el desarrollo térmico obtenido y analizado junto con las humedades relativas del ambiente en el mismo lapso de tiempo, fueron ensayadas a las mismas

edades que los núcleos. Las muestras curadas en ambiente isotérmico y las no curadas y la resistencia a la compresión en MPa obtenida para cada placa se observa en la Tabla 18.

Tabla 18. Resistencia a compresión en MPa de cilindros curados con acondicionamiento de temperatura

Edad	Placa 0.10 m	Placa 0.12 m	Placa 0.15 m
1	13,83	14,50	19,43
2	19,93	20,20	28,10
3	22,40	26,90	32,57
7	25,60	36,67	34,45

Las resistencias a compresión obtenidas en el ensayo de las muestras cilíndricas curadas con el acondicionamiento de temperatura se compararon con las resistencias obtenidas en los conjuntos de muestras cilíndricas con curado isotérmico, sin curado, extracción de núcleos de las placas y la estimación por madurez realizada. En el siguiente apartado, se desarrolla el nivel de exactitud obtenido con la comparación de los resultados.

Los cilindros curados con acondicionamiento de temperatura en condiciones de humedad relativa ambiente no difieren en la exposición a humedad de los cilindros con curado isotérmico y sin curado, puesto que se mantuvieron en ambientes no saturados, pero sí con humedades relativas diferentes, por tanto la comparación y la exactitud reflejan la importancia y el beneficio del método de curado (Mak & Torii, 1995).

#### 4.6. Exactitud y comparación de resultados de resistencia

Los resultados de resistencia a la compresión de cada conjunto de cilindros y núcleos ensayados se compararon, con el fin de evaluar el nivel de exactitud en porcentaje, el cual está dado por el error relativo menos el 100%, entre las diferencias de cada uno de los datos de las resistencias obtenidas de los cilindros con acondicionamiento de temperatura, curado isotérmico, sin curado y estimación por madurez con las resistencias obtenidas en los núcleos extraídos a razón de ser estos valores la resistencia in situ, con los pertinentes factores de corrección (Bartlett, 1997).

El énfasis primordial, dado el objetivo general de la investigación, se da en la exactitud obtenida entre los núcleos extraídos y los cilindros curados con acondicionamiento de temperatura en cada edad de ensayo.

Se verificó el nivel de exactitud entre los resultados obtenidos entre los núcleos extraídos y las muestras cilíndricas curadas bajo el acondicionamiento de temperatura. La relación entre los resultados dados en MPa y expresada en porcentaje se desarrolla en las Tabla 19, y Tabla 21, adicionalmente se comparan los datos obtenidos en la estimación por madurez para el punto de centro abajo (PCB) tal y como se definió en el análisis realizado (véase apartado 4.4.1).

Tabla 19. Estimación de errores relativos con relación a núcleos – placa 0.10 m

<b>Resistencias a compresión</b>					
<b>Edad</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
1	13,7	13,8	13,7	12,9	11,3
2	19,7	19,9	18,5	18,0	15,6
3	22,1	22,4	20,9	20,5	17,3
7	22,8	25,6	24,4	24,3	23,8
<b>Error relativo con relación a los núcleos</b>					
<b>Edad</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>	
1	1,1%	0,2%	5,7%	17,6%	
2	1,3%	5,8%	8,4%	20,7%	
3	1,2%	5,4%	7,4%	21,9%	
7	12,3%	6,9%	6,7%	4,4%	
<b>Promedio</b>	<b>4,0%</b>	<b>4,6%</b>	<b>7,0%</b>	<b>16,1%</b>	

Tabla 20. Estimación de errores relativos con relación a núcleos – placa 0.12 m

Edad	Resistencias a compresión				
	Núcleo	Acondicionamiento de temperatura	Estimación por Madurez	Curado Isotérmico	Sin Curado
1	10,4	14,5	14,4	5,7	5,0
2	18,0	20,2	22,5	11,6	9,2
3	22,0	26,9	26,5	14,6	14,5
7	36,4	36,7	40,4	19,4	19,8
Error relativo con relación a los núcleos					
Edad	Acondicionamiento de temperatura	Estimación por Madurez	Curado Isotérmico	Sin Curado	
1	39,6%	38,4%	45,4%	51,6%	
2	12,0%	24,8%	35,9%	49,0%	
3	22,2%	20,2%	33,8%	34,3%	
7	0,7%	11,0%	46,8%	45,6%	
<b>Promedio</b>	<b>18,6%</b>	<b>23,6%</b>	<b>40,5%</b>	<b>45,1%</b>	

Tabla 21. Estimación de errores relativos con relación a núcleos – placa 0.15 m

Edad	Resistencias a compresión				
	Núcleo	Acondicionamiento de temperatura	Estimación por Madurez	Curado Isotérmico	Sin Curado
1	16,7	19,4	21,0	11,6	9,4
2	27,7	28,1	25,8	19,0	16,2
3	31,5	32,6	29,2	23,7	18,2
7	34,3	34,5	36,3	27,4	20,3
Error relativo con relación a los núcleos					
Edad	Acondicionamiento de temperatura	Estimación por Madurez	Curado Isotérmico	Sin Curado	
1	16,3%	25,6%	30,7%	43,9%	
2	1,6%	6,8%	31,4%	41,4%	
3	3,5%	7,3%	24,8%	42,2%	
7	0,6%	5,9%	20,1%	40,8%	
<b>Promedio</b>	<b>5,5%</b>	<b>11,4%</b>	<b>26,8%</b>	<b>42,1%</b>	

Los valores de error relativo bajos representan un nivel de exactitud mayor, en la Fig. 35 para la placa de 0.10 m, Fig. 36 para la placa de 0.12 m y Fig. 37 para la de 0.15 m, se puede observar como las curvas de evolución de resistencia reflejan los

resultados de cada una de las placas, dados los valores de exactitud calculados en cada edad.

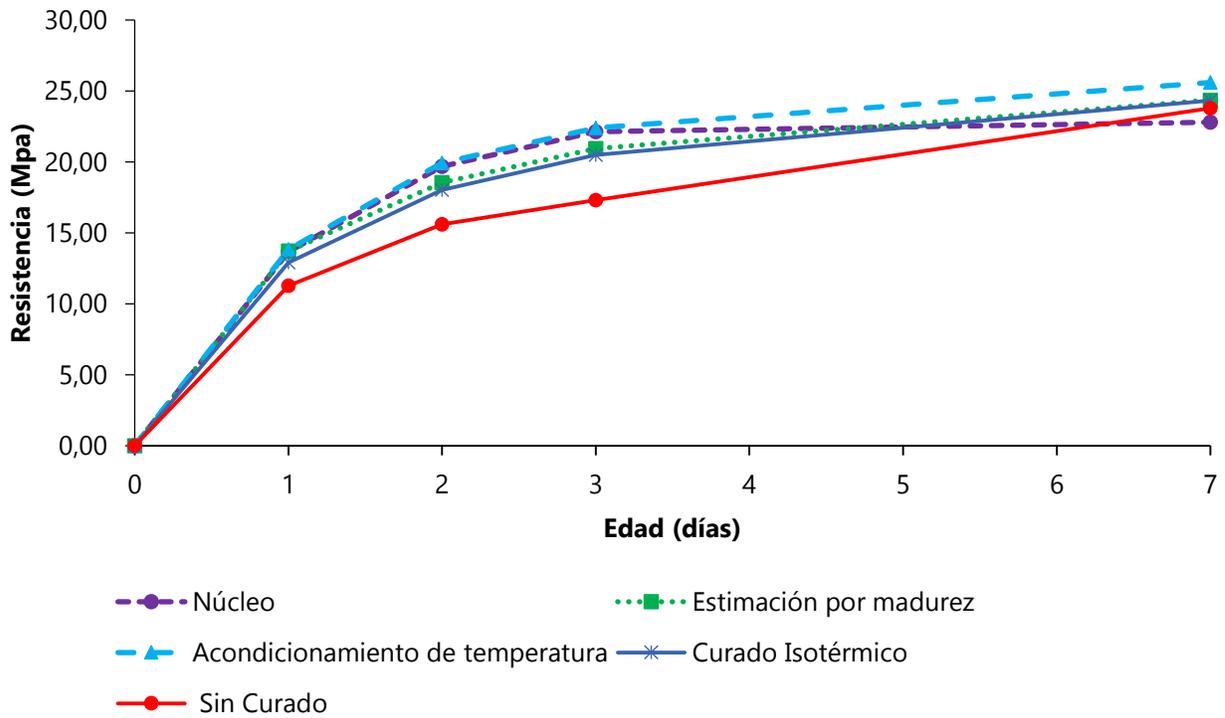


Fig. 35. Desarrollo de resistencias placa 0.10 m

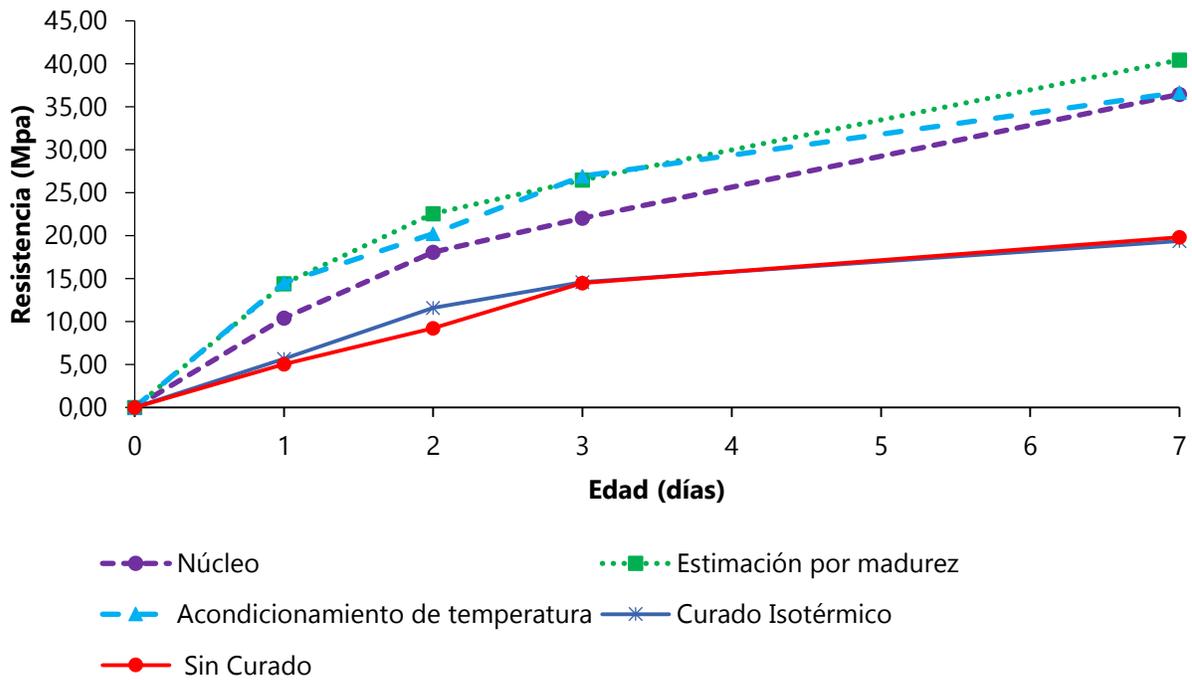


Fig. 36. Desarrollo de resistencias placa 0.12 m

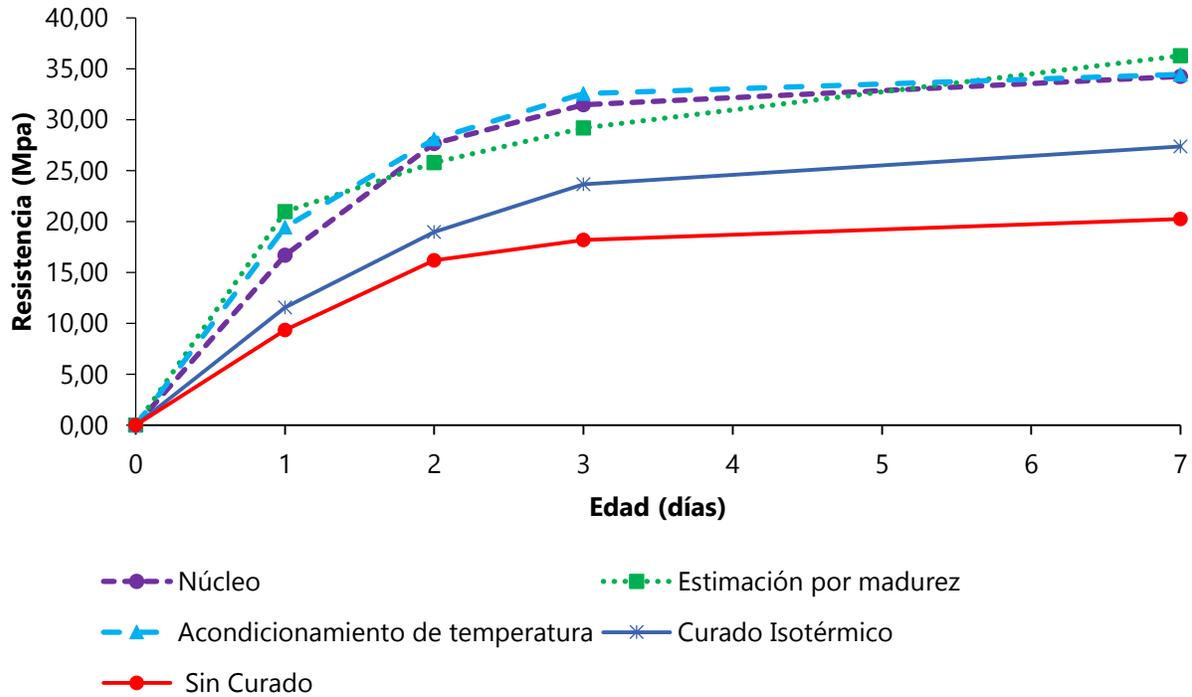


Fig. 37. Desarrollo de resistencias placa 0.15 m

Los valores de exactitud calculados con respecto a las resistencias de las muestras cilíndricas curadas con el acondicionamiento de temperatura, a las resistencias derivadas de ensayos realizados bajo parámetros normativos de curado y a estimaciones de madurez de acuerdo al desarrollo de temperaturas dentro del concreto con relación a la resistencia in situ, obtenida por el ensayo a compresión de los núcleos extraídos, se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Niveles de exactitud de las resistencias del concreto con respecto a los núcleos

<b>Exactitud con respecto a los núcleos - Placa 0.10 m</b>				
<b>Edad</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
1	99%	99%	94%	82%
2	99%	94%	92%	79%
3	99%	95%	93%	78%
7	88%	93%	93%	96%
<b>Promedio</b>	<b>96%</b>	<b>95%</b>	<b>93%</b>	<b>84%</b>
<b>Exactitud con respecto a los núcleos - Placa 0.12 m</b>				
<b>Edad</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
1	60%	62%	55%	48%
2	88%	75%	64%	51%
3	78%	80%	66%	66%
7	99%	89%	53%	54%
<b>Promedio</b>	<b>81%</b>	<b>76%</b>	<b>60%</b>	<b>55%</b>
<b>Exactitud con respecto a los núcleos - Placa 0.15 m</b>				
<b>Edad</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
1	84%	74%	69%	56%
2	98%	93%	69%	59%
3	97%	93%	75%	58%
7	99%	94%	80%	59%
<b>Promedio</b>	<b>94%</b>	<b>89%</b>	<b>73%</b>	<b>58%</b>

La exactitud promedio calculada para los cuatro conjuntos de muestras con respecto a la resistencia in situ, se puede ver en la Tabla 23.

Tabla 23. Nivel de exactitud promedio con respecto a los núcleos

<b>Muestra</b>	<b>Exactitud promedio</b>
<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	91%
<b>Estimación por Madurez</b>	87%
<b>Curado Isotérmico</b>	75%
<b>Sin Curado</b>	66%

Los valores de exactitud de las resistencias obtenidas, con respecto a los núcleos, son mayores en los cilindros con curado por acondicionamiento de temperatura, seguido de la estimación de madurez.

Los resultados de la estimación por madurez mostraron que la resistencia calculada tiene un +/- 13% de diferencia con respecto a la resistencia in situ, bajo este mismo rango se encontraron los resultados descritos por (Yikici & Chen, 2015). El acondicionamiento por temperatura tiene una diferencia de +/- 9%, muy inferior a la obtenida por los cilindros con curado isotérmico y los no curados de +/- 15% y +/- 34%.

Los ensayos a compresión de las muestras cilíndricas con acondicionamiento de temperatura tienen una exactitud mayor al 15% con respecto al promedio de resistencias con curado isotérmico, esto también lo reportan (Jiang et al., 2017), donde la tendencia es que la resistencia a la compresión de las muestras curadas con acondicionamiento de temperatura sea mayor a las resistencias con curado estándar de acuerdo a la ASTM C31 con una temperatura de 23°C +/- 2°C.

Por otra parte, los resultados con respecto a la resistencia de los núcleos o resistencia in situ y la estimación por madurez tienen un nivel de exactitud superior al 87%, dando una estrecha correlación con las resistencias obtenidas con las muestras curadas con acondicionamiento de temperatura, lo cual se afirma por (Mengxiao et al., 2015; W. F. Price & J. P. Hynes, 1996).

Lo anterior refleja la importancia de coincidir el historial de temperatura y humedad del concreto para estimar la resistencia in situ, teniendo en cuenta las correcciones pertinentes a los núcleos o ensayos destructivos pues estas estimaciones no tienen en cuenta la variación de la resistencia en el lugar a lo largo del volumen del elemento (Bartlett, 1997), que también fue desarrollado por (Waller et al., 2004; Yikici & Chen, 2015).

Las muestras cilíndricas sin curado, bajo las mismas condiciones de temperatura ambiente y humedad relativa, no reflejan la resistencia in situ a la compresión de las placas de concreto. La diferencia entre estos resultados y las muestras curadas con el acondicionamiento de temperatura es del 25%, la diferencia promedio con respecto a las muestras con curado isotérmico es del 10%, este valor está dentro del margen admitido por ACI 318.

Es importante entender que los resultados de los cilindros sin curado no son representativos para tomar decisiones correspondientes a las características de durabilidad o resistencia del concreto, debido al volumen y a que el desarrollo de temperaturas de las placas y los cilindros son diferentes a pesar de encontrarse en

condiciones similares de temperatura y humedad, este fenómeno fue estudiado también por (Mak & Torii, 1995; Yikici & Chen, 2015)

El cálculo de la exactitud a 1 día con respecto al acondicionamiento de temperatura refleja los valores más bajos en las placas de 0.12 m y 0.15 m, esto debido a la afectación que existe y cuya importancia ya se describió, por las extracción de los núcleos, donde el concreto se ve afectado por el corte y el proceso de extracción (Bartlett, 1997; W. F. Price & J. P. Hynes, 1996).

## Capítulo 5. Conclusiones

En el presente trabajo de maestría se determinó la exactitud de la metodología con acondicionamiento de temperatura de curado. Verificando el desarrollo del historial de temperaturas en el interior de placas de concreto macizas y determinando la evolución de resistencias de especímenes cilíndricos sometidos a diferentes métodos de curado, comparándolas con la resistencia in situ dada por núcleos extraídos. A partir del trabajo realizado, se concluye:

- a. La medición del historial de temperaturas dentro de las placas de concreto macizas en los 9 puntos en área y sección, mostraron cómo las condiciones en la matriz de concreto referente a las temperaturas alcanzadas son mayores que la del ambiente, siguiendo la tendencia del incremento o disminución de ésta, pero con diferencias significativas.
- b. El volumen de concreto, la sección y las dimensiones de los elementos sobre las cuales se midieron las temperaturas, afectan los valores máximos y mínimos alcanzados, a razón de que los valores internos dentro de los cilindros instrumentados son muy inferiores a los encontrados en las placas.
- c. La tendencia en la evolución de temperaturas en los cilindros, que tienen un volumen de concreto muy inferior a las placas, es seguir las temperaturas ambiente, las diferencias son significativas, estando inclusive por debajo del ambiente.
- d. En la matriz de concreto se presentan diferencias de temperatura a lo largo de la sección de las placas. Las temperaturas en las zonas inferiores son mayores que en la superficie, en horas de baja temperatura ambiente y contrario en

horas de temperaturas ambiente altas. La medición en los puntos medios de la sección del concreto tienden a ser el promedio de los valores superior e inferior.

La evolución de las resistencias del concreto establecida mediante el ensayo a compresión de especímenes cilíndricos, bajo estándares normativos, determinó la relación existente entre la resistencia y el desarrollo térmico del concreto. Adicional, la comparación de los resultados de la resistencia in situ con los cilindros curados con diferentes métodos y la estimación por madurez permitió establecer las siguientes conclusiones:

- a. El curado isotérmico en cilindros de concreto, según parámetros normativos, realiza un acercamiento más efectivo a la resistencia de las placas de concreto, dependiendo del espesor del elemento, entre menor espesor tenga la placa la resistencia del cilindro curado en ambiente isotérmico se acerca más a la resistencia in situ.
- b. El espesor de la placa es determinante en la obtención de los valores de resistencia a compresión, teniendo en cuenta que la resistencia de los cilindros sin curado se aleja de la resistencia in situ según incrementa el espesor.
- c. Los valores de resistencia de los cilindros sin curado no reflejan la realidad de la evolución de resistencia en las placas, este término debe ser utilizado con reservas, pues a pesar de estar en la misma condición no desarrolla la misma evolución debido a los diferentes volúmenes de concreto y el desarrollo térmico.
- d. La resistencia in situ del concreto, obtenida por la extracción de los núcleos, a los días 1, 2, 3 y 7, es representativa siempre y cuando se tengan en cuenta las correcciones pertinentes a los valores, pues el proceso de extracción, la edad en la que se realiza la extracción, el equipo que se utilice y las condiciones internas del concreto, hacen variar significativamente los resultados.
- e. Determinar las resistencias por medio de la estimación por madurez realiza un acercamiento a las condiciones in situ muy efectivo, tanto como lo hacen los ensayos de resistencias de muestras cilíndricas con acondicionamiento de temperatura de curado. Estos métodos son eficaces a edades tempranas, proporcionando un acercamiento más efectivo a la realidad. Las diferencias con relación a los cilindros curados en ambiente isotérmico y los no curados son significativas a nivel estadístico de acuerdo al análisis ANOVA realizado, pero

también significativas a razón de las condiciones reales de obra en donde un valor menor podría generar retrasos en la programación o ejecución de actividades.

- f. Los cilindros curados con acondicionamiento de temperatura tienen una limitante y es no tener en cuenta las condiciones de humedad interna del concreto en el curado, la humedad relativa sí se tiene en cuenta, este sesgo puede estar generando diferencias con la resistencia in situ encontrada. Adicional porque las condiciones de humedad interna son diferentes en las placas y en los cilindros.
- g. Determinar la exactitud a manera de comparación entre las diferentes resistencias obtenidas genera un panorama de conciencia en cuanto a los valores sobre los cuales dependen las actividades de un proceso constructivo de tipo industrializado. Las diferencias, significativas o no, a razón de la resistencia in situ y los parámetros estándar para la obtención de estos valores, deben ser manejados con reservas, pues el acercamiento dado por el curado con acondicionamiento de temperatura y la estimación por madurez son más efectivos de acuerdo a los resultados que el ensayo de cilindros curados en ambiente isotérmico o en las condiciones de obra.



## Capítulo 6. Trabajo futuro de investigación

Los resultados del presente trabajo se obtuvieron bajo las condicionantes dadas por los estándares de normalización, los procedimientos ejecutados abren la puerta a futuras líneas de investigación:

- a. Ejecutar mediciones de humedad interna del concreto para que la emulación de las condiciones de curado sean más efectivas.
- b. Realizar el curado con acondicionamiento, utilizando el desarrollo de temperaturas medido en todos los puntos.
- c. Determinar el desarrollo de temperaturas y la exactitud del curado con acondicionamiento en placas de espesores mayores a 0.15 m.
- d. Curar con acondicionamiento de temperaturas en tiempo real, para asegurar que las muestras cilíndricas se realicen con el mismo concreto de las placas.



## Referencias bibliográficas

American Concrete Institute. *ACI 318-14: Building code requirements for structural concrete and commentary*

ASTM International. (a). *ASTM C1074 – 11 standard practice for estimating concrete strength by the maturity method*

ASTM International. (b). *ASTM C1157/C1157M-17 standard performance specification for hydraulic cement*

ASTM International. (c). *ASTM C143/C143M-15a standard test method for slump of hydraulic-cement concrete*

ASTM International. (d). *ASTM C31/C31M-18 standard practice for making and curing concrete test specimens in the field*

ASTM International. (e). *ASTM C33/C33M-18 standard specification for concrete aggregates*

ASTM International. (f). *ASTM C39/C39M-18 standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*

ASTM International. (g). *ASTM C42/C42M-16 standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete.*

ASTM International. (h). *ASTM C494/C494M-17 standard specification for chemical admixtures for concrete*

ASTM International. (i). *ASTM C617/C617M-15 standard practice for capping cylindrical concrete specimens*

Abdelaty, Metwally abd allah. (2014). *Compressive strength prediction of portland cement concrete with age using a new model*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.hbrcj.2013.09.005 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S1687404813000783>

Abdel-Jawad, Y. A. (2006). *The maturity method: Modifications to improve estimation of concrete strength at later ages*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.022 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061805001807>

Alvarado, Y. A., Calderón, P. A., Adam, J. M., Payá-Zaforteza, I. J., Pellicer, T. M., Pallarés, F. J., & Moragues, J. J. (2009). *An experimental study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistory buildings using partial striking*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.engstruct.2009.03.021 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0141029609001229>

Atiş, C. D. (2002). *Heat evolution of high-volume fly ash concrete*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/S0008-8846(01)00755-4 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0008884601007554>

Bahafid, S., Ghabezloo, S., Duc, M., Faure, P., & Sulem, J. (2017). *Effect of the hydration temperature on the microstructure of class G cement: C-S-H composition and density*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.cemconres.2017.02.008 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S000888461630312X>

Bartlett, F. M. (1997). *Precision of in-place concrete strengths predicted using core strength correction factors obtained by weighted regression analysis*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/S0167-4730(97)00020-9 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0167473097000209>

Benaicha, M., Burtschell, Y., & Alaoui, A. H. (2016). *Prediction of compressive strength at early age of concrete – application of*

*maturity*//doi.org/10.1016/j.jobe.2016.03.003 Retrieved from  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216300274>

Boubekeur, T., Ezziane, K., & Kadri, E. (2014). *Estimation of mortars compressive strength at different curing temperature by the maturity method*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.084 Retrieved from  
<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061814009969>

Castellano, C. C., Bonavetti, V. L., Donza, H. A., & Irassar, E. F. (2016). *The effect of w/b and temperature on the hydration and strength of blastfurnace slag cements*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.001 Retrieved from  
<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061815306322>

Diaz Jorge, C., Bautista Luisa, Sanchez Adrian, & Ruiz Daniel. (2003).  
Caracterizacion de mezclas de concreto utilizadas en sistemas industrializados de construccion de edificaciones&nbsp;; *Universidad De Los Andes*, , 60-73.

Galobardes, I., Cavalaro, S. H., Goodier, C. I., Austin, S., & Rueda, Á. (2015). *Maturity method to predict the evolution of the properties of sprayed concrete*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.038 Retrieved from  
<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061814013403>

Gasch, I., Alvarado, Y. A., & Calderón, P. A. (2012). *Temperature effects on load transmission between slabs and shores*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.engstruct.2012.02.004 Retrieved from  
<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0141029612000624>

Jiang, P., Jiang, L., Zha, J., & Song, Z. (2017). *Influence of temperature history on chloride diffusion in high volume fly ash concrete*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.225 Retrieved from  
<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061817306207>

- Mak, S. L., & Torii, K. (1995). *Strength development of high strength concretes with and without silica fume under the influence of high hydration temperatures*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/0008-8846(95)00175-1 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S008884695001751>
- Mengxiao, S., Qiang, W., & Zhikai, Z. (2015). *Comparison of the properties between high-volume fly ash concrete and high-volume steel slag concrete under temperature matching curing condition*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.134 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061815303512>
- Ng, S., Low, K., & Tioh, N. (2011). *Thermal inertia of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete wall panels: Experimental study*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.enbuild.2011.06.022 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0378778811002714>
- Pereperez Ventura, B., & Barbera Ortega, E. (2004). Concrete temperature, maturity and strength. *Cuaderno Intemac*, (55), 1-34.
- Rómel Solís Carcaño, & Eric I. Moreno. (2005). Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo. *Ingeniería Revista Académica*, 9(3) Retrieved from <http://www.redalyc.org.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/articulo.oa?id=46790301>
- Santilli, A., Teixeira, S., & Puente, I. (2015). *Influence of temperature and concrete reinforcement on vertical formwork design*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.017 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061815004511>
- Schackow, A., Effting, C., Gomes, I. R., Patrui, I. Z., Vicenzi, F., & Kramel, C. (2016). *Temperature variation in concrete samples due to cement hydration*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.048 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S1359431116307050>

- Sofi, M., Mendis, P. A., & Baweja, D. (2012). *Estimating early-age in situ strength development of concrete slabs*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.019 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S095006181100568X>
- Sofi, M., Mendis, P., Baweja, D., & Mak, S. (2014). *Influence of ambient temperature on early age concrete behaviour of anchorage zones*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.051 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061813010830>
- Soutsos, M., Hatzitheodorou, A., Kwasny, J., & Kanavaris, F. (2016). *Effect of in situ temperature on the early age strength development of concretes with supplementary cementitious materials*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.034 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061815306607>
- Topçu, İ B., & Toprak, M. U. (2005). *Fine aggregate and curing temperature effect on concrete maturity*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.cemconres.2004.04.023 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0008884604001772>
- Vázquez-Herrero, C., Martínez-Lage, I., & Sánchez-Tembleque, F. (2012). *A new procedure to ensure structural safety based on the maturity method and limit state theory*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.040 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061812002425>
- W. F. Price, & J. P. Hynes. (1996). In-situ strength testing of high strength concrete. *Magazine of Concrete Research*, (48), 189-197.
- Waller, V., d'Aloia, L., Cussigh, F., & Lecrux, S. (2004). *Using the maturity method in concrete cracking control at early ages*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/S0958-9465(03)00080-5 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0958946503000805>

- Xu, L., Wu, K., Rößler, C., Wang, P., & Ludwig, H. M. (2017). *Influence of curing temperatures on the hydration of calcium aluminate cement/portland cement/calcium sulfate blends*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.016 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0958946517302883>
- Yikici, T. A., & Chen, H. (. (2015). *Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.026 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061815300441>
- Zhao, Q., Liu, X., & Jiang, J. (2015). *Effect of curing temperature on creep behavior of fly ash concrete*//doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.030 Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/science/article/pii/S0950061815302476>

## Agradecimientos

Agradecimiento a la Pontificia Universidad Javeriana, por garantizar las condiciones tecnológicas y de tiempo a SGS Laboratorios Contecon Urbar, por la respuesta y disposición técnica y humana, y a Arquitectura y Concreto SAS, por el interés y ayuda logística y económica en la investigación.



## **Anexos**

El análisis ANOVA, es un análisis de varianza, donde se define un valor de F, que nos indica cuando las diferencias entre los datos son significativas, utilizando además una prueba de Tukey, en la cual se miden dichas diferencias en términos de la varianza de los grupos evaluados, en relación a un valor de diferencia significativo. Las diferencias obtenidas entre los grupos de cilindros se compararon con el valor de diferencia significativa, si el valor lo excede entonces la diferencia es significativa estadísticamente. A continuación se desarrolla el análisis para la placa de 0.10 m.

### Anexo 1a. Análisis ANOVA para placa 0.10 m

Edad (días)	Resistencias a compresión				
	Núcleo	Acondicionamiento de temperatura	Estimación por Madurez	Curado Isotérmico	Sin Curado
1	13,7	13,8	13,7	12,9	11,3
2	19,7	19,9	18,5	18,0	15,6
3	22,1	22,4	20,9	20,5	17,3
7	22,8	25,6	24,4	24,3	23,8
Promedio	19,6	20,4	19,4	18,9	17,0

### Resumen de datos

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Núcleo	4	78,3	19,6	17,2
Acondicionamiento de temperatura	4	81,8	20,4	24,8
Estimación por Madurez	4	77,6	19,4	20,0
Curado Isotérmico	4	75,8	18,9	22,9
Sin Curado	4	68,0	17,0	27,1

### Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	26,3	4,0	6,6	0,3	0,9	3,1
Dentro de los grupos	336,1	15,0	22,4			
Total	362,4	19,0				

Multiplicador	4,4
Cuadrado del error medio	22,4
Tamaño de muestra	4,0
<b>Diferencia Honestamente Significativa</b>	<b>5,2</b>

<b>Diferencias día 1</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-0,2	0,0	0,8	2,4
Acondicionamiento de temperatura			0,1	0,9	2,6
Estimación por Madurez				0,8	2,4
Curado Isotérmico					1,6
Sin Curado					
<b>Diferencias día 2</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-0,3	1,1	1,6	4,1
Acondicionamiento de temperatura			1,4	1,9	4,3
Estimación por Madurez				0,5	2,9
Curado Isotérmico					2,4
Sin Curado					
<b>Diferencias día 3</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-0,3	1,2	1,6	4,8
Acondicionamiento de temperatura			1,5	1,9	5,1
Estimación por Madurez				0,4	3,6
Curado Isotérmico					3,2
Sin Curado					
<b>Diferencias día 7</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-2,8	-1,6	-1,5	-1,0
Acondicionamiento de temperatura			1,2	1,3	1,8
Estimación por Madurez				0,0	0,6
Curado Isotérmico					0,5
Sin Curado					
<b>Diferencias Promedio</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-0,9	0,2	0,6	2,6
Acondicionamiento de temperatura			1,1	1,5	3,5
Estimación por Madurez				0,4	2,4
Curado Isotérmico					2,0
Sin Curado					

El análisis ANOVA, es un análisis de varianza, donde se define un valor de F, que nos indica cuando las diferencias entre los datos son significativas, utilizando además una prueba de Tukey, en la cual se miden dichas diferencias en términos de la varianza de los grupos evaluados, en relación a un valor de diferencia significativo. Las diferencias obtenidas entre los grupos de cilindros se compararon con el valor de diferencia significativa, si el valor lo excede entonces la diferencia es significativa estadísticamente. A continuación se desarrolla el análisis para la placa de 0.12 m.

### Anexo 1b. Análisis ANOVA para placa 0.12 m

Edad (días)	Resistencias a compresión				
	Núcleo	Acondicionamiento de temperatura	Estimación por Madurez	Curado Isotérmico	Sin Curado
1	10,4	14,5	14,4	5,7	5,0
2	18,0	20,2	22,5	11,6	9,2
3	22,0	26,9	26,5	14,6	14,5
7	36,4	36,7	40,4	19,4	19,8
Promedio	21,7	24,6	25,9	12,8	12,1

### Resumen de datos

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Núcleo	4	86,9	21,7	119,5
Acondicionamiento de temperatura	4	98,3	24,6	90,8
Estimación por Madurez	4	103,8	25,9	118,6
Curado Isotérmico	4	51,2	12,8	32,9
Sin Curado	4	48,5	12,1	41,1

### Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	686,2	4,0	171,6	2,1	0,1	3,1
Dentro de los grupos	1208,5	15,0	80,6			
Total	1894,7	19,0				

Multiplicador	4,4
Cuadrado del error medio	80,6
Tamaño de muestra	4,0
<b>Diferencia Honestamente Significativa</b>	<b>9,8</b>

<b>Diferencias día 1</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-4,1	-4,0	4,7	5,4
Acondicionamiento de temperatura			0,1	8,8	9,5
Estimación por Madurez				8,7	9,3
Curado Isotérmico					0,6
Sin Curado					
<b>Diferencias día 2</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-2,2	-4,5	6,5	8,8
Acondicionamiento de temperatura			-2,3	8,6	11,0
Estimación por Madurez				11,0	13,3
Curado Isotérmico					2,4
Sin Curado					
<b>Diferencias día 3</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-4,9	-4,4	7,5	7,6
Acondicionamiento de temperatura			0,4	12,3	12,4
Estimación por Madurez				11,9	12,0
Curado Isotérmico					0,1
Sin Curado					
<b>Diferencias día 7</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-0,2	-4,0	17,1	16,6
Acondicionamiento de temperatura			-3,8	17,3	16,9
Estimación por Madurez				21,1	20,6
Curado Isotérmico					-0,4
Sin Curado					
<b>Diferencias Promedio</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-2,8	-4,2	8,9	9,6
Acondicionamiento de temperatura			-1,4	11,8	12,4
Estimación por Madurez				13,2	13,8
Curado Isotérmico					0,7
Sin Curado					

El análisis ANOVA, es un análisis de varianza, donde se define un valor de F, que nos indica cuando las diferencias entre los datos son significativas, utilizando además una prueba de Tukey, en la cual se miden dichas diferencias en términos de la varianza de los grupos evaluados, en relación a un valor de diferencia significativo. Las diferencias obtenidas entre los grupos de cilindros se compararon con el valor de diferencia significativa, si el valor lo excede entonces la diferencia es significativa estadísticamente. A continuación se desarrolla el análisis para la placa de 0.15 m.

### Anexo 1c. Análisis ANOVA para placa 0.15 m

Edad (días)	Resistencias a compresión				
	Núcleo	Acondicionamiento de temperatura	Estimación por Madurez	Curado Isotérmico	Sin Curado
1	16,7	19,4	21,0	11,6	9,4
2	27,7	28,1	25,8	19,0	16,2
3	31,5	32,6	29,2	23,7	18,2
7	34,3	34,4	36,3	27,4	20,3
Promedio	27,5	28,6	28,1	20,4	16,0

### Resumen de datos

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Núcleo	4	110,1	27,5	59,4
Acondicionamiento de temperatura	4	114,5	28,6	44,7
Estimación por Madurez	4	112,2	28,1	41,4
Curado Isotérmico	4	81,6	20,4	46,4
Sin Curado	4	64,0	16,0	22,4

### Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	508,5	4,0	127,1	3,0	0,1	3,1
Dentro de los grupos	643,1	15,0	42,9			
Total	1151,5	19,0				

Multiplicador	4,4
Cuadrado del error medio	42,9
Tamaño de muestra	4,0
<b>Diferencia Honestamente Significativa</b>	<b>7,2</b>

<b>Diferencias día 1</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-2,7	-4,3	5,1	7,3
Acondicionamiento de temperatura			-1,5	7,9	10,1
Estimación por Madurez				9,4	11,6
Curado Isotérmico					2,2
Sin Curado					
<b>Diferencias día 2</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-0,4	1,9	8,7	11,5
Acondicionamiento de temperatura			2,3	9,1	11,9
Estimación por Madurez				6,8	9,6
Curado Isotérmico					2,8
Sin Curado					
<b>Diferencias día 3</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-1,1	2,3	7,8	13,3
Acondicionamiento de temperatura			3,4	8,9	14,4
Estimación por Madurez				5,5	11,0
Curado Isotérmico					5,5
Sin Curado					
<b>Diferencias día 7</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-0,2	-2,0	6,9	14,0
Acondicionamiento de temperatura			-1,8	7,1	14,2
Estimación por Madurez				8,9	16,0
Curado Isotérmico					7,1
Sin Curado					
<b>Diferencias Promedio</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Acondicionamiento de temperatura</b>	<b>Estimación por Madurez</b>	<b>Curado Isotérmico</b>	<b>Sin Curado</b>
Núcleo		-1,1	-0,5	7,1	11,5
Acondicionamiento de temperatura			0,6	8,2	12,6
Estimación por Madurez				7,7	12,0
Curado Isotérmico					4,4
Sin Curado					