

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**“CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO CON BAJA
RELACIÓN AGUA-CEMENTO POR MÉTODOS DESTRUCTIVOS
Y NO DESTRUCTIVOS”**

POR:

“ING. IVÁN DE JESÚS SÁNCHEZ VILLA”

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA EN VÍAS TERRESTRES**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

MAYO DE 2017



“Control de calidad del concreto con baja relación agua-cemento por métodos destructivos y no destructivos”. Tesis presentada por Iván de Jesús Sánchez Villa como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Vías Programa Maestría en Ingeniería en Vías Terrestres, ha sido aprobada y aceptada por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Rafael Astorga Bustillos
Secretario de Investigación y Posgrado

M.I. José Antonio Portillo Ocegüera
Coordinador(a) Académico

Dr. Gilberto Wenglas Lara
Director(a) de Tesis

26 de Mayo de 2017

Comité:
Dra. Cecilia Olivia Olague Caballero
Dr. José Castañeda Ávila

© Derechos Reservados
Iván de Jesús Sánchez Villa
Circuito Número I s/n, Nuevo
Campus Universitario II, 31100
Chihuahua, Chih.



24 de febrero de 2017

ING. IVÁN DE JESUS SÁNCHEZ VILLA

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Gilberto Wenglas Lara** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **"CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO CON BAJA RELACIÓN AGUA-CEMENTO POR MÉTODOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS"**.

INDICE

Índice

Dedicatoria

Agradecimientos

Tabla de contenido

Índice de tablas

Capítulo 1. Fundamentación teórica

1.1 Métodos no destructivos

1.2 Métodos destructivos

1.3 Madurez del concreto hidráulico

1.4 Cemento

1.5 Resistencia a la compresión

1.6 Relación agua-cemento

1.7 Contenidos de cemento

1.8 Tiempo de fraguado

1.9 Concreto de alta resistencia

Facultad de Ingeniería
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00 www.ingued.unm.mx





Capítulo 2. Metodología

- 2.1 Caracterización de material pétreo
- 2.2 Agua
- 2.3 Cemento
- 2.4 Diseño de mezclas de concreto
- 2.5 Elaboración de especímenes de concreto
- 2.6 Evaluación del tiempo de fraguado
- 2.7 Método de madurez
- 2.8 Método de Curado

Capítulo 3. Resultados y análisis

- 3.1 Muestras curadas a temperatura controlada
- 3.2 Muestras curadas a temperatura ambiente
- 3.3 Variación en la predicción de la resistencia del concreto

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

Referencias

Anexo A: Recursos y materiales

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"naturam subiecit allis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.C.H.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. FERNANDO RAFAEL ASTORGA
BUSTILLOS

Facultad de Ingeniería
Grupo No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih. C.P. 31125
tel. (314) 442-96-00 www/ing.usch.mx



Dedicatoria

A mis padres J. Jesús Sánchez Luévano y Aida Leticia Villa Almaraz que sin su apoyo moral y económico no hubiera podido finalizar mis estudios, gracias a sus consejos me formé mejor persona tanto personal como profesionalmente.

A mi hermana Nayeli que siempre estuvo ahí cuando necesitaba de ella y a mi sobrino Santi que me sacó incontables sonrisas.

Agradecimientos

Primeramente me gustaría agradecer sinceramente a mi director de Tesis, el Dr. Wenglas

Lara su tiempo, esfuerzo y dedicación.

Sus conocimientos, su experiencia y su orientación fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Así mismo a mis asesores de tesis la Dra. Olague Caballero y el Dr. Castañeda Ávila que me ayudaron a moldear este trabajo.

A mis compañeros de la maestría que me acompañaron en esta experiencia Guadalupe, Pavel, Paco, Infante, Urbina, Neto, Samuel, Priscila que me daban consejos y me sacaban adelante.

A todos mis amigos que creyeron en mí y me daban ánimos para seguir adelante Manuel, César, Franco, Daniella, David, Karenina, Andrés.



Tabla de contenido

Dedicatoria	iv
Agradecimientos	vi
Tabla de contenido	iii
Índice de tablas	v
Capítulo 1: Fundamentación Teórica	6
1.1 MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS	6
1.2 MÉTODOS DESTRUCTIVOS	6
1.3 MADUREZ DEL CONCRETO HIDRÁULICO	7
1.4 CEMENTO	12
1.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	12
1.6 RELACIÓN AGUA-CEMENTO	13
1.7 CONTENIDOS DE CEMENTO	14
1.8 TIEMPO DE FRAGUADO	14
1.9 CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA	14
Capítulo 2: Metodología	16
2.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL PÉTREO	16
2.1.1 Granulometría de los agregados	17
2.1.2 Peso volumétrico	18
2.1.3 Peso específico y absorción de los agregados pétreos	19
2.1.4 Absorción	19
2.2 Agua	19



2.3 Cemento _____	20
2.4 Diseño de mezclas de concreto _____	20
2.5 Elaboración de especímenes de concreto _____	20
2.6 Evaluación del tiempo de fraguado _____	23
2.7 Método de madurez _____	24
2.8 Método de Curado _____	25
Capítulo 3: Resultados y Análisis _____	28
3.1 Muestras curadas a temperatura controlada _____	28
3.1.1 Resistencia del concreto _____	28
3.1.2 Madurez del concreto _____	29
3.1.3 Curvas de calibración _____	30
3.2 Muestras curadas a temperatura ambiente _____	32
3.2.1 Resistencia del concreto _____	32
3.2.2 Madurez del concreto _____	32
3.2.3 Estimación de la resistencia del concreto _____	36
3.3 Variación en la predicción de la resistencia del concreto _____	38
Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones _____	44
Referencias _____	45
Anexo A: Recursos y materiales _____	48



Índice de tablas

<i>Tabla 1.1-Clasificación del concreto</i>	15
<i>Tabla 2.1-Granulometría de los agregados gruesos designación de mallas ASTM C 33.</i>	17
<i>Tabla 2.2-Granulometría de los agregados finos designación de mallas ASTM C 33.</i>	18
<i>Tabla 2.3- Pesos volumétricos del agregado pétreo.</i>	19
<i>Tabla 2.4 - Cantidades de los componentes para un metro cúbico de concreto primera etapa.</i>	22
<i>Tabla 2.5 - Propiedades del concreto fresco de la primera etapa</i>	22
<i>Tabla 2.6 - Cantidades de los componentes para un metro cúbico de concreto segunda etapa.</i>	22
<i>Tabla 2.7-Propiedades del concreto fresco segunda etapa</i>	23
<i>Tabla 3.1-Resultados del método de madurez y la resistencia a la compresión para el lote con relación agua-cemento de 0.48.</i>	39
<i>Tabla 3.2- Resultados del método de madurez y la resistencia a la compresión para el lote con relación agua-cemento de 0.46.</i>	39
<i>Tabla 3.3- Resultados del método de madurez y la resistencia a la compresión para el lote con relación agua-cemento de 0.44.</i>	39
<i>Figura 1.1 Diagrama de madurez del concreto usando la función de Nurse-Saul (Alabama Department of Transportation, 2006).</i>	9
<i>Figura 2.1- Granulometría de los agregados gruesos designación de mallas ASTM C 33.</i>	17
<i>Figura 2.2- Granulometría agregados fino designación de mallas ASTM C 33.</i>	18
<i>Figura 2.3- Preparación de los componentes del concreto.</i>	21
<i>Figura 2.4-Disposición de los especímenes tentativos a usarse en la fabricación de la curva de calibración de la primera etapa.</i>	26
<i>Figura 2.5-Curado especímenes segunda etapa.</i>	26



<i>Figura 2.6-Lectura y registro de temperatura especímenes de la segunda etapa.</i>	27
<i>Figura 3.1- Registro de las lecturas de temperaturas lote de primera etapa con relación agua-cemento de 0.48.</i>	29
<i>Figura 3.2- Registro de las lecturas de temperaturas lote de primera etapa con relación agua-cemento de 0.46.</i>	30
<i>Figura 3.3- Registro de las lecturas de temperaturas lote de primera etapa con relación agua-cemento de 0.44.</i>	30
<i>Figura 3.4-Curva de calibración del lote de la primera etapa con la relación agua-cemento de 0.48.</i>	31
<i>Figura 3.5- Curva de calibración del lote de la primera etapa con la relación agua-cemento de 0.46.</i>	31
<i>Figura 3.6- Curva de calibración del lote de la primera etapa con la relación agua-cemento de 0.44.</i>	31
<i>Figura 3.7-Registro de las lecturas de temperatura lote con relación agua-cemento de 0.48.</i>	33
<i>Figura 3.8- Registro de las lecturas de temperatura lote con relación agua-cemento de 0.46.</i>	33
<i>Figura 3.9- Registro de las lecturas de temperatura lote con relación agua-cemento de 0.44.</i>	33
<i>Figura 3.10-Estimación o predicción del lote con relación agua-cemento 0.48 y valores reales obtenidos de la resistencia a la compresión de especímenes en campo.</i>	37
<i>Figura 3.11- Estimación o predicción del lote con relación agua-cemento 0.46 y valores reales obtenidos de la resistencia a la compresión de especímenes en campo.</i>	37
<i>Figura 3.12- Estimación o predicción del lote con relación agua-cemento 0.44 y valores reales obtenidos de la resistencia a la compresión de especímenes en campo.</i>	38
<i>Figura 3.13-Comparación de la estimación de la resistencia a la compresión con el índice de madurez y la edad equivalente con el valor del ensaye de resistencia a compresión del lote con relación agua-cemento de 0.48.</i>	40
<i>Figura 3.14- Comparación de la estimación de la resistencia a la compresión con el índice de madurez y la edad equivalente con el valor del ensaye de resistencia a compresión del lote con relación agua-cemento de 0.46.</i>	40



Figura 3.15- Comparación de la estimación de la resistencia a la compresión con el índice de madurez y la edad equivalente con el valor del ensaye de resistencia a compresión del lote con relación agua-cemento de 0.48. _____ 41

Figura 3.16-Se muestra el tiempo de fraguado inicial y final junto con el ajuste que gobierna los datos obtenidos en una curva potencial para la variación de relación agua-cemento de 0.48. _____ 42

Figura 3.17- Se muestra el tiempo de fraguado inicial y final junto con el ajuste que gobierna los datos obtenidos en una curva potencial para la variación de relación agua-cemento de 0.46. _____ 42

Figura 3.18- Se muestra el tiempo de fraguado inicial y final junto con el ajuste que gobierna los datos obtenidos en una curva potencial para la variación de relación agua-cemento de 0.44. _____ 42

Figura 3.19-La figura de arriba muestra la dispersión relación agua-cemento contra tiempo de fraguado inicial y final que se obtuvo de las tres pruebas de tiempo de fraguado que se hizo en esta investigación. _ 43



Introducción

La construcción de infraestructura pública genera crecimiento, dado que aumenta la capacidad productiva. Al construir una carretera no sólo estamos aumentando la capacidad de traslado de pasajeros y bienes, sino que creamos nuevas oportunidades de desarrollo entre las poblaciones que conecta. En lo que respecta a la búsqueda de un país con mejores condiciones de vida la infraestructura como plataforma para el crecimiento para todos sus habitantes, el desarrollo de infraestructura fomenta la igualdad de oportunidades.

Los pavimentos de concreto hidráulico cumplen la función como la superficie de rodamiento de caminos y carreteras. El concreto es una solución duradera, económica y sustentable para las autopistas, carreteras, caminos rurales, residenciales y calles de la ciudad, intersecciones, pistas de aterrizaje, instalaciones intermodales, bases militares, estacionamientos, y mucho más.

El concreto es una mezcla de algunos de los recursos más abundantes en la tierra: agua, agregados gruesos y finos, cemento, y el aire. De igual importancia, estos recursos son normalmente disponibles a nivel local, lo que reduce los costos de transporte y el consumo de combustible para su entrega.

El ingrediente clave del concreto es el cemento Portland, que da al material su resistencia y une todos los materiales. Muchos pavimentos de concreto hidráulico también incluyen las adiciones suplementarias de materiales cementantes. Estos pueden incluir subproductos industriales como cenizas volantes o escoria de alto horno.

Independientemente del tipo de carretera o las condiciones del pavimento actuales, hay una solución con concreto. Puede ser utilizado para los nuevos pavimentos, reconstrucción, rejuvenecimiento, restauración o rehabilitación. Los pavimentos de concreto generalmente proporcionan la más larga vida, un mantenimiento mínimo.

La determinación de la resistencia del concreto en el sitio es obviamente muy importante para los constructores. Muchas decisiones como al momento de retirar la cimbra en concreto pretensado, cuando abrir el tráfico en caminos; están basadas en cuando se alcanza el mínimo nivel de resistencia. Esperar



demasiado para realizar estas operaciones puede resultar en altos costos de operación, pero realizarlos demasiado pronto puede causar agrietamientos en la estructura o el colapso de ésta. La información usada para tomar éstas decisiones es usualmente obtenida de cilindros colados y curados en campo, pruebas “pullout”, o pruebas de penetración.

Dado que en la construcción de pavimentos rígidos para carreteras y en otro tipo de elementos se usa concreto con relaciones agua cemento bajas se ha incrementado el estudio de este tema, como en la investigación realizada usando el método de madurez con varias relaciones agua-cemento bajas para su uso tentativo en diversas estructuras, uno de sus enfoques es hacia el tema de pavimentos, donde se predijo el desarrollo de propiedades mecánicas del concreto hidráulico además de hacer una examinación de la energía de activación y nuevos enfoques para el método de madurez como para la energía de activación (Zhang et al., 2008). También, se investigó la resistencia del concreto de baja relación agua-cemento, entre otras propiedades, en vías rápidas para diferentes contenidos de cemento, así como su resistencia al desgaste por abrasión (Ghafoori & Tays, 2010). Recientemente se desarrolló una investigación (Antico et al., 2015) donde se analizaron los tiempos de carga así como el espesor para la edad de apertura en cuatro pavimentos de concreto hidráulico con relaciones agua cemento bajas. Estas investigaciones se caracterizan por darle importancia al concreto hidráulico elaborado con bajas relaciones agua-cemento. En esta investigación se presentan curvas de calibración (resistencia-índice de madurez) que contribuyen a fortalecer criterios para una apertura temprana de los pavimentos al tráfico y evitar altos costos y tiempos de construcción así como evitar la apertura a edades tempranas que causan daños en la estructura.

El método de madurez es una técnica que puede ser usada para estimar la resistencia del concreto en campo. Aunque esta prueba no destructiva ha estado disponible por varios años no ha sido ampliamente usada en México pero con la reciente aprobación por ASTM (American Society for Testing and Materials) de la práctica recomendada para estimar la resistencia del concreto por el método de madurez, debería incrementar su uso (Holland., 1987).

El 2 de marzo de 1973, partes de un edificio de departamentos de varios pisos en construcción en el condado de Fairfax, Va., sufrió un colapso progresivo. 14 trabajadores murieron y otros 34 resultaron



heridos en el incidente. El reporte del NBS (The National Bureau of Standards, por sus siglas en inglés) concluyó que la causa más probable de la falla fue la temprana remoción de la cimbra que resultó en esfuerzos de punzonamiento que excedieron la capacidad del concreto relativamente joven (4 días). Los investigadores NBS encontraron dificultad en el uso de datos de resistencia relativa obtenidos bajo condiciones de temperatura constante para obtener una estimación fiable de la resistencia del concreto en el lugar en el momento de la falla. Esto desencadenó un interés en un enfoque relativamente nuevo conocido como el método de la madurez para la estimación de desarrollo de la fuerza en el lugar bajo condiciones de temperatura variables (Carino & Lew, 2001).

Cinco años más tarde, 51 trabajadores murieron cuando una torre de enfriamiento se desplomó contra el suelo mientras se estaba construyendo en la isla del Willow, Virginia Occidental. Una vez más, la estructura falló porque el concreto no había alcanzado resistencia suficiente para soportar las cargas (Lew et al., 1979).

En lo que respecta a las vías terrestres, con los avances recientes en equipos y tecnología y más énfasis en construcción de alta velocidad, la práctica del método de madurez está ganando amplio uso y aceptación. De hecho, una encuesta de 2001 en Estados Unidos de los organismos viales estatales indicó que 32 estados están aplicando o investigando acerca de conceptos de madurez, y 13 estados han, de hecho, adoptado protocolos o especificaciones para el uso del método de madurez (Tepke & Tikalsky, 2001).

El enfoque de madurez proporciona un sencillo y útil método de estimación del aumento de resistencia del concreto a edades tempranas (generalmente menos de 14 días de edad) (Crawford, 1997). Por mucho, su mayor beneficio es que permite a los ingenieros evaluar la resistencia en el lugar de una estructura de pavimento de concreto hidráulico. Esta valiosa información puede entonces ser utilizada para ayudar a determinar el apropiado tiempo para la apertura de un pavimento al tráfico, para aserrar las juntas, para retirar la cimbra, o para cesar prácticas especiales para el concreto tales como el uso de aislamiento durante el clima frío (Federal Highway Administration, 2005). Además, los costos para las pruebas de aseguramiento de calidad se reducen porque el monitoreo por madurez requiere menos vigas o cilindros que otros métodos (American Concrete Pavement Association, 2002). Ya que es un método



de ensayo no destructivo, el monitoreo de madurez no imparte daño alguno al pavimento de concreto existente.

En la presente investigación tiene como objetivo estimar la resistencia a la compresión simple (ASTM C 39, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”) del concreto elaborado con relaciones agua-cemento bajas utilizando el método de madurez (ASTM C 1074, “Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”). Además se evalúa el error de estimar la resistencia del concreto expuesto al medio ambiente utilizando curvas de calibración elaboradas en condiciones estándar.

En lo que las vías terrestres se refiere, con frecuencia, es necesario abrir lo más pronto posible el paso a la circulación en aeropistas, autopistas, calles, entre otros; dando paso a menores costos de operación; por esta razón, se pretende tener todos los elementos para evitar en lo posible cualquier tipo de situación, como la mencionada al hacer uso de los conocimientos que se pretenden acrecentar en este trabajo, para tener mayor certidumbre de cómo actuar cuando se presenten situaciones de toma de decisiones y proceder de la mejor manera.

Tomados en conjunto, estos factores pueden contribuir a la reducción de los costos generales de construcción y acortando programas de construcción. Después de haberse leído lo anterior se expone la importancia de desarrollar el uso de este método de madurez para conocer la resistencia del concreto, México tiene un amplio rango de temperaturas donde sería conveniente, además de agregar certidumbre a la seguridad de la obra en aquellas regiones de bajas temperaturas, así evitando incidentes como los dos anteriores mencionados en los párrafos anteriores y disminuir los costos que genera la larga espera para llegar a la resistencia del concreto cuando se mantienen cerrados los caminos o avenidas esperando la resistencia necesaria para abrir el tráfico.

Con lo mencionado anteriormente dentro de este trabajo se planteó una hipótesis en el protocolo del mismo el cual dice como sigue: los resultados obtenidos con el método de madurez en la resistencia a la compresión del concreto con baja relación agua cemento tienen una estrecha relación con los



obtenidos por compresión simple con un error despreciable para usarse en el control de calidad. Esta hipótesis se trata de demostrar verdadera en el siguiente trabajo con los resultados finales y errores.

Los resultados de este trabajo podrán ser de utilidad para las instituciones de gobierno y empresas que se involucran con el concreto, y en particular cuando se emplea en infraestructura para el transporte, en el control de calidad que lleve a optimizar el tiempo de la apertura de caminos elaborados de concreto, así como programar la remoción de cimbra. Adicionalmente, la presente investigación, será de utilidad para los estudiantes que deseen incursionar en la investigación en el control de calidad del concreto hidráulico.



Capítulo 1: Fundamentación Teórica

1.1 MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Según el ACI (Instituto Americano del Concreto, por sus siglas en inglés) se define a los ensayos no destructivos del concreto como el ensaye que no causa un daño estructural significativo al concreto, así que cualquier ensaye que quede fuera de este concepto se consideran como prueba destructiva del concreto (ACI Committee 228, 1998).

Refiriéndose a los ensayos no destructivos, el ACI muestra una lista de la mayoría de los ensayos que se utilizan, que van desde la inspección visual hasta radiografía del concreto (ACI Committee 228, 1998). Para el presente trabajo se pretende profundizar en el método de madurez donde ambos métodos (compresión simple y madurez), se explican sus generalidades más adelante.

Los métodos no destructivos más comunes son: el número de rebote (ASTM C 805), resistencia a la penetración (ASTM C 803), prueba “pullout” (ASTM C 900), velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C 597), cilindros fabricados en campo (ASTM C 873) y el método de madurez (ASTM C 1074) (ACI Committee 228, 1998).

1.2 MÉTODOS DESTRUCTIVOS

Cualquier método que quede fuera de la definición del ACI para las pruebas no destructivas de concreto se refiere a un ensaye destructivo, y en relación a estos ensayes, la prueba a compresión axial es el ensaye destructivo común para evaluar la resistencia a la compresión (Malek & Kaouther , 2014), ya que es la medida más usada de medición de resistencia que emplean los ingenieros en el diseño de edificios y otras estructuras (IMCYC, 2006).



1.3 MADUREZ DEL CONCRETO HIDRÁULICO

La resistencia del concreto adecuadamente dosificado, colocado y curado puede expresarse como una función de la historia de la temperatura-tiempo que se relaciona a la hidratación del concreto. Una mayor temperatura de curado acelerará el proceso de hidratación y el concreto podría ganar fuerza más rápido a temprana edad. Este concepto se conoce como el concepto madurez (Tahsin & Hung-Liang, 2015).

Como la resistencia del concreto depende tanto de la edad como de la temperatura, puede decirse que la resistencia es función de la sumatoria del intervalo de tiempo multiplicado por la temperatura. A esta suma se le llama madurez, la cual se obtiene a partir de una temperatura base, determinada experimentalmente, que está entre -12 y -10°C . El concreto muestra un pequeño aumento en la resistencia con el tiempo a temperaturas debajo del punto de congelación del agua, hasta aproximadamente -12°C . No debe aplicarse la baja temperatura hasta que el concreto no haya fraguado y ganado suficiente resistencia para resistir daño a causa de la acción de congelación; normalmente se requiere un periodo de espera de 24 horas. Debajo de -12°C , el concreto no parece ganar resistencia con el tiempo (Neville, 1999).

Por lo general la temperatura base utilizada para el cálculo de la madurez del concreto es de -10°C . Se ha confirmado la conveniencia de este valor para edades hasta de 28 días y para temperaturas en el rango de 0 a 20°C . Para temperaturas mayores puede ser apropiada otra base. En la norma ASTM C 1074-93 se describe un método de determinación de la temperatura base (Neville, 1999).

De acuerdo con los conceptos de madurez dados, una relación empírica se puede establecer entre la historia de temperatura-tiempo y el desarrollo de la resistencia del concreto con el fin de predecir la resistencia durante el período de curado mediante el control de la temperatura del concreto in-situ en tiempo real (Tahsin & Hung-Liang, 2015).

Existen varias funciones para la determinación de la madurez (índice de madurez). A continuación se presenta la función de madurez expuesta por Nurse-Saul y se define en la norma ASTM C 1074 como sigue:



Función de madurez Nurse-Saul:

$$M = \sum_0^t (T_c - T_0) \Delta t$$

Ecuación 3-1

Donde,

M=Índice de madurez a la edad t, (°C·hora),

T_c=Temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo, Δt, (°C),

Δt= Intervalo de tiempo (h), y

T₀= Temperatura base o de referencia (°C).

En los orígenes del método de madurez, se requirió un procedimiento para tomar en cuenta el efecto combinado del tiempo y la temperatura en el desarrollo de la resistencia para diferentes métodos de curado considerando altas temperaturas. Se propuso que el producto del tiempo y temperatura podría ser usado para este propósito. Estas ideas condujeron a la famosa función de Nurse-Saul (Carino & Lew, 2001).

La función de madurez de Nurse-Saul calcula el índice de madurez, llamado “factor temperatura-tiempo”. El índice de madurez es un valor cuantitativo de temperatura y tiempo que una mezcla de concreto ha acumulado. El cálculo de la función de madurez de Nurse-Saul puede ser explicado con la Figura 1.1.

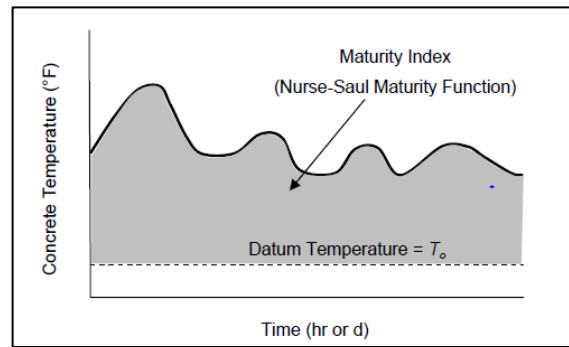


Figura 3.1 Índice de madurez del concreto usando la función de Nurse-Saul (Alabama Department of Transportation, 2006).

Cualquier intervalo de tiempo en que el concreto se cure arriba de la temperatura de referencia o base se suma de forma acumulativa al índice de madurez (Alabama Department of Transportation, 2006). Existen temperaturas bases recomendadas o pueden obtenerse como se presenta en la norma ASTM C 1074, para calcular el índice de madurez.

Para una mezcla de concreto dado es posible estimar su resistencia a la compresión, siempre y cuando el índice de madurez que corresponde a esa resistencia particular ha sido establecido, incluso si el concreto de interés tiene una historia diferente a la de curado del concreto original (Alabama Department of Transportation, 2006).

La Ecuación 1.2 es la función de madurez de Arrhenius, presentada por Hansen and Pedersen (1977), la cual considera el historial de temperatura registrado para calcular el la madurez del concreto en términos de la edad equivalente (Alabama Department of Transportation, 2006). Esta función es definida en el ASTM C 1074 como sigue:

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R} \left[\frac{1}{273+T_c} - \frac{1}{273+T_R} \right]} \cdot \Delta t \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde,

- t_e = Edad equivalente a la temperatura de curado de referencia (h),
- T_c = Temperatura promedio del concreto para un intervalo de tiempo, Δt , ($^{\circ}\text{C}$),
- T_r = Temperatura de referencia, (por lo general ya sea 20°C o 23°C),
- E = Energía de activación, J/mol,
- R = Constante Universal de los gases, $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, y
- Δt = Un intervalo de tiempo (h).



La función de madurez de Arrhenius se basa en la misma idea que rige la madurez de Saúl (1951): una vez que es conocido el tiempo necesario para llegar a una resistencia específica para una mezcla particular a la temperatura de curado de referencia, la edad equivalente para llegar a esa resistencia será la misma, no importa el historial de curado. La función de madurez de Arrhenius representa los intervalos de tiempo en los que el concreto se cura encima o por debajo de la temperatura de referencia.

Varias investigaciones se han realizado sobre el tema de madurez como las hechas para estimar la resistencia a la compresión de concreto en masa (Tahsin & Hung-Liang, 2015). En esta investigación se utilizó la ecuación de Arrhenius y la edad equivalente para estimar la resistencia del concreto, tomando muestras en diferentes ubicaciones en la masa de concreto, de cubos de seis pies por lado, utilizando las curvas de calibración de madurez-resistencia, con unos cilindros colocados y curados en obra para después extraer corazones en diferentes posiciones y profundidades, comparando las resistencias obtenidas de los corazones con las resistencias de los cilindros. Para registrar la temperatura del concreto en las diferentes posiciones se colocaron una serie de sensores de temperatura que quedarían ahogados en el volumen de concreto.

Los resultados que se mostraron en este trabajo indican que la resistencia estimada para el concreto con el método de madurez en la parte superior fue siempre mayor que la resistencia real obtenida con los corazones en los cuatro cubos. Además para tres de los cuatro cilindros, la resistencia real de los corazones obtenida para la parte central de los cubos quedó dentro del 15% de la resistencia estimada con el método de madurez a cualquier edad. Por último la resistencia de los corazones en la parte del fondo de los cubos fue siempre mayor que la estimada con el método de madurez (Tahsin & Hung-Liang, 2015).

El uso del método de madurez se ha extendido en Europa debido a sus ventajas a la hora de estimar la resistencia del concreto en campo a edades tempranas. Este método ha sido usado por más de 20 años en ese continente en muchos proyectos, principalmente para evaluar la resistencia a la compresión del concreto a edades tempranas, varias de las obras en donde fue usado el medidor de



madurez fueron: elementos prefabricados del puente “Ile de Ré” en 1987, pilotes y segmentos de la losa del puente de Normandía en 1991, los túneles A75 “Pas de l’Escalette” en 1994, segmentos del cantiliver del viaducto Rhone BPNL 1994, torres de enfriamiento de la planta nuclear Civaux en 1994, los túneles Rochercardon y Duchère BPNL en 1995, los túneles Montjézieu A75 en 1995, el viaducto Mirville A29 en 1995, el viaducto Amiens PI4 en 1995, los viaductos TGV en Avignon en 1997, viaducto A16 Nièvre en 1998, viaducto PI5 Lisieux y el enlace ferroviario del túnel del canal en el puente Medway en 2000. En especial el uso del medidor de madurez fue usado en los segmentos para el puente de Normandía, donde cada autorización de operaciones de pretensado fue aprobada después de revisar la madurez del concreto justo atrás del anclaje y deducir el valor de la resistencia a la compresión a edad temprana. La resistencia requerida variaba de 12 a 35 MPa (122 a 357 kg/cm²). No se registraron problemas de agrietamiento en las zonas de anclaje debido a la insuficiente resistencia a la compresión cuando se tensaron los cables, esto para los 25000 m³ del concreto ensayado. Para este trabajo los medidores de madurez fueron usados en lugar de cilindros de concreto, los cuales no se consideraron suficientemente representativos de la verdadera resistencia en campo, permitiendo una buena optimización de los ciclos de producción sin riesgos en términos de seguridad en el área de trabajo o agrietamiento del concreto (Waller et al., 2004).

En la actualidad el método estandarizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez se especifica en la norma ASTM C 1074 -11. Este método no es de uso convencional en México para el control de calidad del concreto. Con este trabajo se pretende propiciar el uso de este método al mostrar las ventajas que esta práctica tiene.



1.4 CEMENTO

El material más importante y costoso en el concreto hidráulico es el agente cementante: cemento Portland. Es ampliamente manufacturado, a partir de roca caliza. El nombre Portland es un nombre de un material cementante, de la misma manera que el nombre asfalto, epoxy, cal, etc., se refieren a materiales cementantes. Fue llamado cemento Portland porque se asemeja a un cemento obtenido por la molienda de rocas naturales encontradas en la isla de Portland (Atkins, 1997).

Los materiales principales requeridos para la producción de cemento Portland son: la caliza (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), y óxido de hierro (Fe_2O_3). El componente principal es la cal (60 – 65%), y por esta razón las plantas de fabricación están usualmente localizadas de tal manera que tomen ventaja de una de las varias fuentes de caliza (Atkins, 1997).

En la fabricación del cemento Portland, las materias primas son molidas, mezcladas para producir la deseada proporción de materiales, y calentadas en un horno grande. La temperatura del horno alcanza alrededor de los 1500°C . Esto deja el material con la ausencia de agua y gases y produce nuevos componentes químicos en partículas llamados Clinker. El Clinker es subsecuentemente molido combinando aproximadamente 5% de yeso, esto para controlar la tasa de endurecimiento (Atkins, 1997).

1.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Se define como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o mortero a carga axial, expresado como la fuerza por unidad de área de la sección transversal (American Concrete Institute, 1980).

La resistencia a la compresión es una de las propiedades mecánicas básicas del concreto utilizado para el diseño de estructuras de concreto, que tiene la naturaleza de ir cambiando con el paso del tiempo. El desarrollo de resistencia a la compresión del concreto es de gran importancia para la gestión del procedimiento de construcción y la estimación racional de período de construcción, que también está relacionado con la confiabilidad de la estructura en su vida útil (Ding et al., 2016).



La prueba de resistencia a la compresión es la más común de todas las pruebas sobre concreto endurecido, en parte porque es fácil de practicarse, y en parte porque muchas de las características deseables del concreto están relacionadas cualitativamente con su resistencia (Neville, 1999).

Los resultados de las pruebas de resistencia pueden ser afectadas por variaciones en el tipo de espécimen de prueba, tamaño del espécimen, tipo de molde, curado, preparación de la superficie del extremo, rigidez de la máquina de pruebas, y rapidez de la aplicación de esfuerzo. Por esta razón, las pruebas deberán seguir una norma individual, sin desviación de los procedimientos descritos (Neville, 1999).

Para homogenizar los resultados se usó la norma descrita para esta prueba en el ASTM C 39-93a “Test for compressive strength of cylindrical concrete Specimens”.

1.6 RELACIÓN AGUA-CEMENTO

La relación agua-cemento se define como la relación de la masa de agua a la masa de cemento portland en una mezcla de cemento, expresado como un decimal, excluyendo solamente el agua absorbida por los agregados y abreviado como a/c (ACI, 2013).

Con objeto de controlar el contenido de agua, así como alcanzar resistencias de proyecto y la durabilidad deseada del concreto, se limita la relación agua/cemento, debiendo tenerse en cuenta que, en general la relación agua-cemento adoptada debe ser la menor posible, ubicándose entre 0.46 y 0.54 (Zárate & Tena, 2001).

Para la mayoría de las mezclas, la relación agua cemento oscila entre 0.40 y 0.70 (Atkins, 1997).

El contenido de agua debe ser el mínimo necesario manteniendo la trabajabilidad necesaria. Para concreto en pavimentos la relación agua-cemento en peso no debe exceder a 0.50 (Croney & Croney, 1998).



1.7 CONTENIDOS DE CEMENTO

Para obtener concretos de gran durabilidad, resistentes a la acción del tránsito y de los factores ambientales, se recomienda que, como mínimo, el contenido de cemento sea 300 kg/m^3 (Zárate & Tena, 2001).

El contenido mínimo de cemento como criterio de calidad en pavimento de concreto, recomendado por el comité del ACI, es de 334.6 kg/m^3 de concreto, a no ser que la experiencia local demuestra que este mínimo se puede disminuir (American Concrete Institute 325.9R-91, 1997).

1.8 TIEMPO DE FRAGUADO

El tiempo de fraguado es la condición alcanzada por una pasta de cemento, mortero o concreto cuando ha perdido plasticidad a un cierto grado, en general medido en términos de resistencia a la penetración o deformación; el fraguado inicial se refiere al primer grado de rigidez alcanzado; el fraguado final se refiere al logro de una rigidez significativa; también, presenta deformación permanente después de remover la aplicación de esfuerzo (American Concrete Institute, 1980).

La evaluación del tiempo de fraguado se rige por la norma ASTM C403 / C403M – 08 “Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance“.

1.9 CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

El uso y definición del concreto de alta resistencia ha visto un gradual y continuo desarrollo durante muchos años. En los 1950s, el concreto con una resistencia a la compresión de 34 MPa (347 kg/cm^2) era considerado alta resistencia. En los 1960s, concretos con resistencia a la compresión de 41 MPa (418 kg/cm^2) y 52 MPa (530 kg/cm^2) fueron producidos comercialmente. En los principios de los 1970s, concreto de 62 MPa (632 kg/cm^2) fue producido. Hoy en día, la resistencia a la compresión que se acerca a los 138 MPa (1407 kg/cm^2) ha sido usada en edificios colados en sitio (American Concrete Institute 363R, 2010). Investigadores de laboratorio usando materiales y procesos especiales han logrado “concretos” con resistencias a la compresión que exceden de 800 MPa (8158 kg/cm^2) (Schmidt & Fehling, 2004). A como la tecnología de materiales y los procesos de producción evolucionan, es probable que la máxima resistencia a la compresión del concreto se continúe incrementando y el concreto de alta resistencia será usado en más aplicaciones (American Concrete Institute 363R, 2010).



Según el reporte en concretos de alta resistencia emitido en el 2010 por el ACI definen actualmente el concreto de alta resistencia como aquel con una resistencia a la compresión de diseño de 55 MPa (561 kg/cm²) o mayor. El nuevo valor de 55 MPa (561 kg/cm²) fue elegido debido a que representa un nivel de resistencia en el cual es requerido un especial cuidado para su producción y pruebas del concreto, en el cual pueden ser necesitados requerimientos de diseño estructural (American Concrete Institute 363R, 2010).

La Asociación de Cemento Portland (PCA, por sus siglas en inglés) adopta una clasificación para describir concretos de alta resistencia que se muestra en la Tabla 1.1 (Farny & Panarese , 1994).

Tabla 3.1-Clasificación del concreto por la PCA.

Parámetro	Concreto Convencional	Concreto de Alta Resistencia	Concreto de Muy Alta Resistencia	Concreto de Ultra Alta Resistencia
Resistencia , Mpa	< 50	50-100	100-150	>150
Relación Agua-cemento	>0.45	0.45-0.30	0.30-0.25	<0.25
Aditivos químicos	No necesario	WRA/HRWR*	HRWR*	HRWR*
Aditivos minerales	No necesario	Fly Ash	Humo de Sílice**	Humo de Sílice
Coefficiente de permeabilidad (cm-s)	> 10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³

*WRA=Aditivo reductor de agua; HRWR=Aditivo reductor de agua de alto rango

**También puede contener fly ash.

† Ver "Porosity, Freeze-Thaw Durability and Corrosion Resistance" en capítulo 5 PCA EB 114.



Capítulo 2: Metodología

La etapa experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Asfaltos, Suelos y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua. El experimento consistió en elaborar muestras cilíndricas de concreto hidráulico con base en la norma ASTM C 192, con relaciones agua/cemento de 0.48, 0.46 y 0.44. Los especímenes fueron sometidos a curado en un cuarto húmedo siguiendo la norma ASTM C 511. Se obtuvieron también a su vez especímenes para determinar el tiempo de fraguado para cada una de las variaciones en la relación agua/cemento. Los especímenes cilíndricos se ensayaron siguiendo la norma, ASTM C 39. Para las diferentes mezclas, se obtuvo también para estos especímenes el índice de madurez y se correlacionó con la resistencia a la compresión de los mismos.

De igual manera que lo mencionado anteriormente, se realizó la misma secuencia con especímenes de prueba que sirvieron sólo para ajustar las proporciones de la mezcla. Dichas mezclas de prueba tuvieron variación en la relación agua/cemento para lograr abarcar la proporción requerida y ajustar por interpolación.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL PÉTREO

El material pétreo usado para elaborar las mezclas de concreto en la presente investigación, fue obtenido de un banco de materiales local. El material se obtuvo de acuerdo a la norma ASTM D 75-97, la cual nos permite un adecuado muestreo de agregados para obtener un material homogéneo. El agregado grueso fue grava triturada de tamaño máximo 1", con tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ ", y una arena triturada del mismo banco. El material pétreo se almacenó en el laboratorio para la posterior elaboración de las muestras de concreto hidráulico.

2.1.1 Granulometría de los agregados

La granulometría del agregado grueso y fino se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM C 33 (“Standard Specification for Concrete Aggregates”). En las Tablas 2.1 y 2.2 se muestran los resultados de granulometría de los agregados grueso y fino respectivamente.

Tabla 3.2-Granulometría de agregados gruesos (ASTM C 33).

Malla	Abertura (mm)	Pasa (%)
1"	25.4	100
3/4"	19	86.2
3/8"	9.5	16.9
No. 4	4.75	1.0
No.8	2.36	0.7

Basándose en los resultados de granulometría, se obtuvo el módulo de finura, el cual por definición, según el ASTM C 125, se refiere a la suma de los porcentajes acumulados desde la malla No. 100 hasta el tamaño máximo de la malla usada, obteniéndose un valor de 2.66.

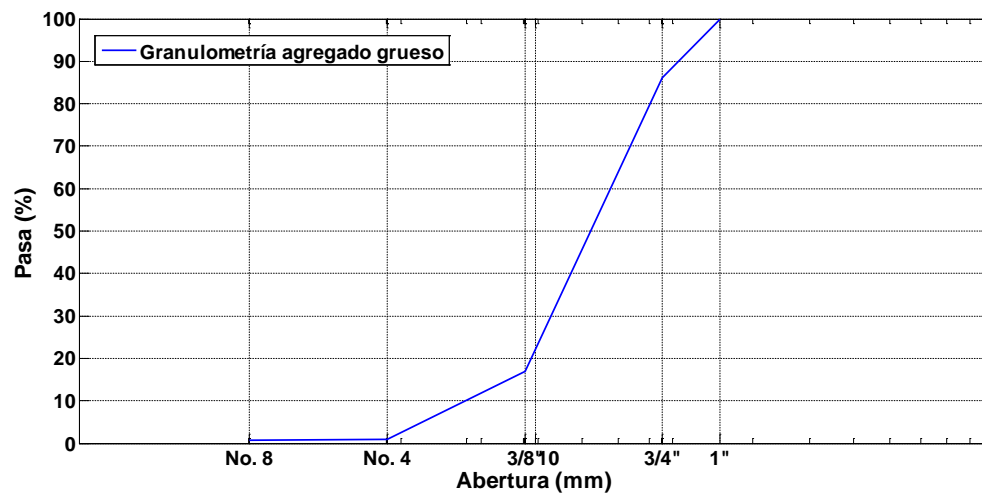


Figura 3.2- Granulometría de los agregados gruesos de acuerdo a la norma ASTM C 33.

Tabla 3.3-Granulometría de los agregados finos de acuerdo a la norma ASTM C 33.

Malla	Abertura (mm)	Pasa (%)
3/8"	9.5	100.0
4	4.75	100.0
8	2.36	87.6
16	1.18	62.3
30	0.6	41.7
50	0.3	25.2
100	0.15	17.1
200	0.075	12.4

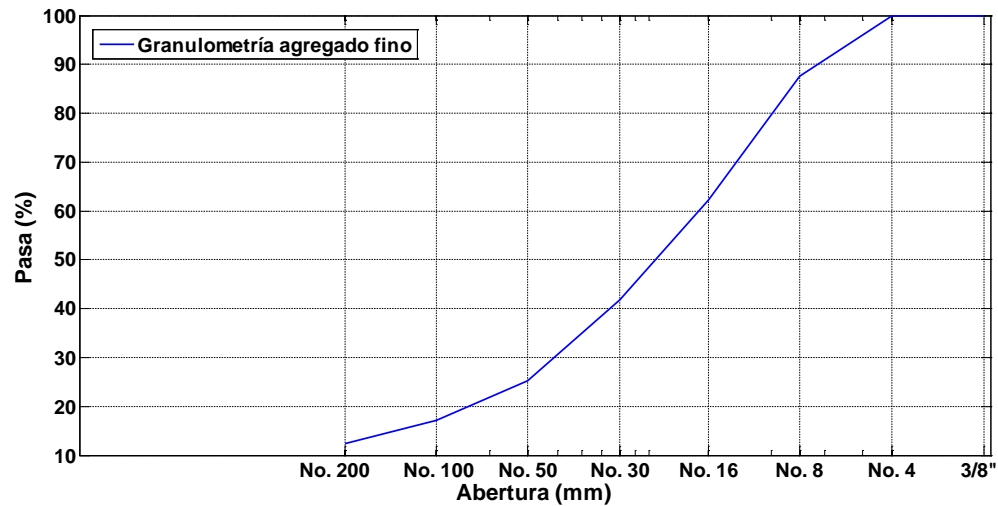


Figura 3.3- Granulometría agregados fino designación de mallas ASTM C 33.

2.2 PESO VOLUMÉTRICO

Este se define, según la norma ASTM C 125, como la masa por unidad de volumen de material de agregado grueso, en donde la unidad de volumen incluye el volumen de las partículas individuales de vacíos entre las partículas sólidas. Esta característica depende de que tan densamente el agregado esta empacado, además, para un material de peso específico dado, la densidad aparente depende de la distribución de tamaño y de la forma de las partículas.



Siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C 29 se llevó a cabo la determinación del peso volumétrico suelto y compacto (ver Tabla 2.3).

Tabla 3.4- Pesos volumétricos del agregado pétreo.

Condición	Peso volumétrico (kg /m ³)	
	Agregado fino	Agregado grueso
P.V.S.S.	1657	1861
P.V.S.C.	1866	1960

2.2.1 Peso específico y absorción de los agregados pétreos

El peso específico absoluto puede definirse como la relación de la masa del sólido, referido a vacío, respecto de la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gases tomadas ambas a una temperatura dada. El peso específico obtenido en el agregado grueso fue de 2.7 y el del agregado fino de 2.64, ambos resultados fueron obtenidos siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C 127 y ASTM C 128 respectivamente.

2.2.2 ABSORCIÓN

La absorción se conoce como el aumento de masa del agregado resultado de la penetración de un líquido en los vacíos permeables. La absorción del agregado grueso fue de 0.37 %, y para el agregado fino fue de 2.53 %, ambos resultados fueron obtenidos siguiendo las normas ASTM C 127 y ASTM C 128 respectivamente.

2.3 AGUA

La calidad del agua desempeña un papel importante en la elaboración y desempeño del concreto hidráulico. Las impurezas del agua pueden interferir con el fraguado del cemento, pueden afectar



adversamente la resistencia del concreto o causar manchas en sus superficie, y también pueden conducir a la corrosión del refuerzo (Neville, 1999). En esta investigación se usó agua potable que cumple con la norma ASTM C 1602.

2.4 CEMENTO

El cemento usado para esta investigación fue CPO 30R, el cual cumple con la norma ASTM C 150. El cemento fue almacenado en bolsas de polietileno y mantenidas en un lugar fresco y seco dentro del Laboratorio de Materiales, Mecánica de Suelos y Asfaltos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, y mantenida sellada hasta la hora de ser pesado y puesto en una bolsa de polietileno nuevamente hasta la hora del mezclado del concreto.

2.5 DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO

Para elaborar las mezclas de concreto se usó el procedimiento estándar especificado por el Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés), establecido en el Comité 211 (ACI committee 211, 1991). En la Tabla 2.4 se muestran las proporciones teóricas usadas para la fabricación de un metro cúbico de concreto, para cada una de las variaciones hechas.

2.6 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE CONCRETO

La elaboración de los especímenes de concreto fue llevada a cabo mediante dos etapas principales. En la primera etapa, se llevó a cabo la realización de los especímenes de concreto para ser usados en la curva de calibración de madurez-resistencia. La segunda etapa, consistió en fabricar los especímenes de concreto a ser usados para simular la acción del medio ambiente y tipo de curado; además, se evaluó el porcentaje de error prediciendo las resistencias esperadas mediante el método de madurez y evaluando su resistencia a la compresión. La elaboración de los especímenes cilíndricos fue realizada bajo lo señalado en la norma ASTM C 192.

La primera etapa consistió en 12 muestras cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, mientras que en la segunda etapa se fabricaron 9 muestras cilíndricas de las mismas dimensiones que en la primera etapa.

Al momento de la elaboración de los especímenes, específicamente de la primera etapa, se llevó un registro de los siguientes datos: temperatura de mezclado, revenimiento, peso volumétrico fresco, tiempo de mezclado y tiempo de comienzo y término de elaboración de los especímenes. Los tiempos registrados se obtuvieron mediante el uso de un cronómetro de mano que fue usado a lo largo de todo el proceso de las dos etapas.

Esta información fue registrada al momento de la fabricación. Además, para las dos etapas el proceso de mezclado fue el mismo, llevándose a cabo con una mezcladora giratoria de tambor basculante eléctrica de capacidad de 50 kg de cemento, dentro del laboratorio de la Facultad.

En la Figura 2.3 se muestra la preparación de los componentes a usarse en la fabricación del concreto. En los contenedores plásticos, después de pesado cuidadosamente el material, se introdujo el material para evitar cambios de humedad o contaminación del mismo, asegurándose su almacenaje óptimo. Este procedimiento se usó tanto para la primera y segunda etapa.



Figura 3.4- Preparación de los componentes del concreto.

Las propiedades registradas al momento del mezclado para la fabricación de los especímenes de la primera y segunda etapa se muestran en la Tabla 2.5 y 2.7 respectivamente. Las cantidades usadas de componentes se muestran también en las Tablas 2.4 y 2.6 mostradas a continuación, donde se muestra el material usado para las variaciones de agua cemento 0.48, 0.46 y 0.44.

Tabla 3.5 - Cantidades de los componentes para un metro cúbico de concreto primera etapa.

Componentes (Kg)	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C
	A/C=0.48	A/C=0.46	A/C=0.44
Cemento tipo I, CPO 30R	421	439	459
Agua	202	202	202
Agregado Grueso	1105	1105	1105
Agregado Fino	634	619	602
Humedad agregado grueso (%)	0.17	0.36	0.07
Humedad agregado fino (%)	1.14	0.26	1.14
Reductor de Agua de Alto Rango (ml)	0	0	145

Tabla 3.6 - Propiedades del concreto fresco de la primera etapa.

Propiedades	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C
	A/C=0.48	A/C=0.46	A/C=0.44
Temperatura de mezclado (°C)	19	19	19
Revenimiento (cm)	12.5	13.5	12.5
Peso volumétrico (kg/m ³)	2410	2300	2407
Tiempo de mezclado (min)	03:00	03:20	03:00
Lapsos después del mezclado (min)			
Comienzo de elaboración de los especímenes	21:11	13:21	19:20
Finalización de elaboración de los especímenes	56:50	52:11	58:28

Tabla 3.7 - Cantidades de los componentes para un metro cúbico de concreto segunda etapa.

Componentes (Kg)	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C
	A/C=0.48	A/C=0.46	A/C=0.44
Cemento tipo I, CPO 30R	421	439	459
Agua	202	202	202
Agregado Grueso	1105	1105	1105
Agregado Fino	634	619	602
Humedad agregado grueso (%)	0.19	0.19	0.19
Humedad agregado fino (%)	0.48	0.48	0.48
Reductor de Agua de Alto Rango (ml)	0	0	145

Tabla 3.8-Propiedades del concreto fresco segunda etapa.

Propiedades	Mezcla A A/C=0.48	Mezcla B A/C=0.46	Mezcla C A/C=0.44
Temperatura de mezclado (°C)	20	19	19
Revenimiento (cm)	8	9.5	12.5
Peso volumétrico (kg/m ³)	2409	2416	2407
Tiempo de mezclado (min)	03:05	03:10	03:00
Lapsos después del mezclado (min)			
Comienzo de elaboración de los especímenes	16:40	18:08	19:20
Finalización de elaboración de los especímenes	57:31	52:11	56:30

2.7 EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO

La evaluación del tiempo de fraguado fue llevada a cabo mediante la norma ASTM C 403/C 403 M – 08. El concreto usado para la elaboración de los especímenes cilíndricos en la primera etapa de esta investigación, fue el mismo usado para la evaluación del tiempo de fraguado. La mezcla para la evaluación del tiempo de fraguado se obtuvo del mismo lote para la elaboración de las muestras cilíndricas. Los especímenes que fueron utilizados para este fin tenían 15 cm de diámetro y 15 cm de altura, esto logrado gracias a un molde metálico que tenía las dimensiones para este fin.

Para este procedimiento, la muestra de concreto se cribó por la malla #4 para después usar el material que pasa dicha malla. A continuación, se colocó el material cribado en un molde metálico para obtener el espécimen de las dimensiones mencionadas en la norma ASTM C 403/C 403 M – 08. Después de expulsar las burbujas de aire de la mezcla, se dejó reposar a temperatura ambiente, más tarde a intervalos de tiempo definidos, usando un cronómetro de mano se midieron los intervalos de tiempo para cada penetración con las agujas normalizadas, registrando el tiempo y la resistencia a la penetración. La resistencia a la penetración está definida por la Ecuación 3.1, se usó desde la aguja de mayor área hasta la menor. Graficando el tiempo transcurrido y la resistencia del mortero a la penetración, se determina el tiempo de fraguado inicial y final, mediante un ajuste potencial de los datos.



$$Rp = \frac{F}{A}$$

Ecuación 3-3

Donde,

R_p = Resistencia a la penetración, en psi.

F = Fuerza requerida para penetrar 25 mm, en kg.

A = Área de contacto de la aguja, pulg².

2.8 MÉTODO DE MADUREZ

En este trabajo se aplicó el método de madurez apoyándose de la norma ASTM C 1074.

El inicio de la aplicación de este método es el comienzo de la primera etapa, mencionada en el subcapítulo 2.5 elaboración de especímenes de concreto, en donde una relación entre la madurez del concreto y la resistencia a la compresión del mismo es obtenida. La misma dosificación de concreto será usada en lo que resta del trabajo, mismos materiales y mismas características. Se realizaron tres mezclas de concreto con variaciones en la relación agua-cemento, 0.48, 0.46 y 0.44, que tuvieron una mezcla hermana, la cual trató de simular el concreto en campo con sus condiciones de medio ambiente.

Siguiendo en la primera etapa, las muestras cilíndricas a usarse en este trabajo se mantuvieron a temperatura constante las primeras 24 horas después del proceso de mezclado, en un cuarto cerrado dentro del laboratorio de la facultad para evitar cualquier tipo de alteración o vibración a causa de agentes externos no deseados. Después de 24 horas las muestras fueron desmoldadas e introducidas en el cuarto de curado en donde se mantuvieron a temperatura y humedad controlada.

Después de 3 días se notó que las temperaturas de los cilindros no presentaban cambio alguno por lo que se optó por interrumpir la medición de la temperatura para dar paso a la segunda etapa, mientras que los especímenes de la primera etapa seguirían manteniéndose en las mismas condiciones esperando el mismo comportamiento como hasta el que en ese momento se presentaba.

Cabe mencionar que las edades que se requería ensayar los especímenes a la compresión, estos estaban dispuestos de tal manera que los demás se mantenían inmóviles en el mismo cuarto de curado sin alteración.



Después de lo mencionado en párrafo anterior, la segunda etapa dio comienzo con las mezclas a usarse para simular las condiciones en campo. Las variaciones con respecto a la primera etapa es que estas nuevas mezclas, 24 horas después del proceso de mezclado, se mantuvieron expuestos a las condiciones del medio ambiente, en el patio de materiales del laboratorio de la Facultad, las muestras se cubrieron con un material impermeable para evitar contaminación de materia extraña o pérdida excesiva de humedad en la parte superior de la muestra.

Al momento de desmoldar las muestras, se cubrieron en su totalidad con el mismo material impermeable y asegurándolo con ligas. El procedimiento de curado se explica más adelante en el subcapítulo referente al curado. Se dispusieron las muestras de tal manera que no sufrieran golpes o vibraciones externas, pero que estuvieran expuestas al medio ambiente en el patio de materiales del laboratorio de la Facultad, de igual manera para el medidor de madurez, se dispuso de tal manera que se mantuviera resguardado de golpes o vibraciones que pudieran afectar las lecturas que estaría llevando a cabo, sin dejar de mantener las lecturas de las muestras en las condiciones de medio ambientes que se presentarían.

De igual forma que en la primera etapa, cada vez que se requería apartar especímenes para su ensaye a la compresión, los demás no sufrían vibraciones o movimiento alguno.

Las edades que fueron escogidas para ensayar los especímenes fueron 7, 14 y 28 días, siendo escogidas por ser edades normalizadas a las que comúnmente se ensayan los especímenes de concreto. Sin embargo, dado que se esperan diferencias en relación a los especímenes de la primera etapa debido a la diferencia en el curado, el método de madurez fue adecuado para usarse en este trabajo.

Las temperaturas registradas para cada lote de especímenes se muestran en las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4, además de las temperaturas registradas en el cuarto húmedo.

Los cálculos del índice de madurez se realizaron con la ecuación 1.1.

2.9 MÉTODO DE CURADO

Para la primera etapa el tipo de curado después de desmoldarse los especímenes fue por medio del cuarto húmedo el cual cumple con lo estipulado en la norma ASTM C 511, Figura 2.4.



Figura 3.5-Disposición de los especímenes usados en la fabricación de la curva de calibración de la primera etapa.

Para la segunda etapa fue diferente, después de 24 horas y desmoldados los especímenes, se metió cada espécimen en una bolsa de plástico para tratar de simular el curado con rollos de polietileno que se tiene en obra para los pavimentos. Este dispositivo de curado se revisó para que ninguno de los especímenes presentara algún tipo de rasgadura y tuviera pérdida de humedad en relación a los demás especímenes. En la Figura 2.5 se muestra la disposición de los especímenes al momento de curado que fueron ensayados a compresión simple (parte de la segunda etapa), donde se nota el recubrimiento de polietileno abarcando todo el cuerpo del espécimen, a su vez se aprecia que se encuentra expuesto a las condiciones ambientales.

En la Figura 2.6 se muestra la disposición de los especímenes sujetos al registro de lecturas de sus temperaturas de la segunda etapa, se aprecia dentro del edificio el medidor de madurez y afuera los especímenes con su capa de polietileno para evitar pérdida de humedad del espécimen.



Figura 3.6-Curado especímenes segunda etapa.



Figura 3.7-Lectura y registro de temperatura especímenes de la segunda etapa.

Capítulo 3: Resultados y Análisis

El proceso de experimentación de esta investigación constó de dos etapas. En la primera etapa, se realizaron tres mezclas con relación agua-cemento de 0.44, 0.46 y 0.48. Para cada una de las mezclas se obtuvieron 12 muestras cilíndricas de concreto, siendo en total 36 cilindros, los cuales se curaron en condición estándar. De cada mezcla se tomó una muestra para el registro de la temperatura. Adicionalmente, se repitieron las mezclas, con las mismas proporciones, obteniendo 9 muestras por cada mezcla, pero se curaron a medio ambiente. Finalmente, se estimó la resistencia de las muestras curadas a medio ambiente y su variación con respecto a las muestras curadas en condición estándar.

3.1 MUESTRAS CURADAS A TEMPERATURA CONTROLADA

3.1.1 Resistencia del concreto

Los resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos, fueron obtenidos del promedio de dos cilindros, y si había una variación considerable (lo mencionado en la norma ASTM C 1074), se probaba un tercer cilindro para corregir o promediar los 3 resultados. En la Figura 3.1 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión.

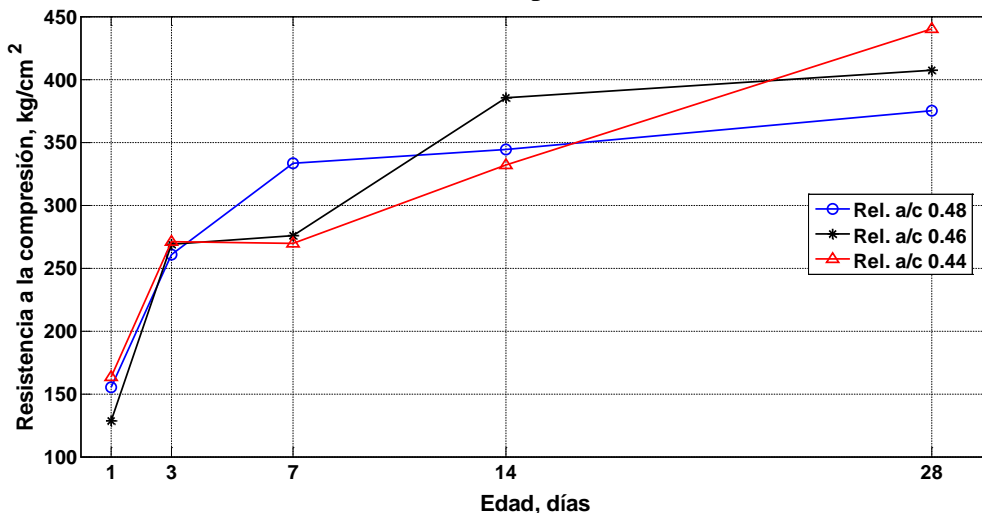


Figura 3.1 Resistencia a la compresión de los especímenes usados en la fabricación de la curva de calibración.

La variación en la resistencia a la compresión de las mezclas con diferente relación agua-cemento (0.44, 0.46 y 0.48) se aprecia en la Figura 3.1. Se puede apreciar que a edad temprana, esto es de 1 a 14 días, la resistencia a la compresión no sigue un patrón convencional como el que se tiene a los

28 días. Típicamente a menor relación agua-cemento mayor resistencia a la compresión. Este comportamiento puede deberse a la cercanía entre la cercanía de las relaciones agua-cemento estudiadas, además de varios factores tales como la baja trabajabilidad de la mezcla, aún con la incorporación del aditivo (reductor de agua de alto rango), y el tamaño máximo de agregado, pudieron afectar la compactación del concreto, quedando vacíos que cambiaron la resistencia a los especímenes.

3.1.2 Madurez del concreto

a) Registro de a temperatura de las muestras

En la Figura 3.2 se muestra el registro de temperatura de la mezcla con relación agua-cemento de 0.48. A partir de las 72 horas, se aprecia que la temperatura se vuelve constante, por lo cual se interrumpe su registro. Misma situación ocurre para la relación agua-cemento de 0.46 y 0.44 en las figuras 3.3 y 3.4 respectivamente.

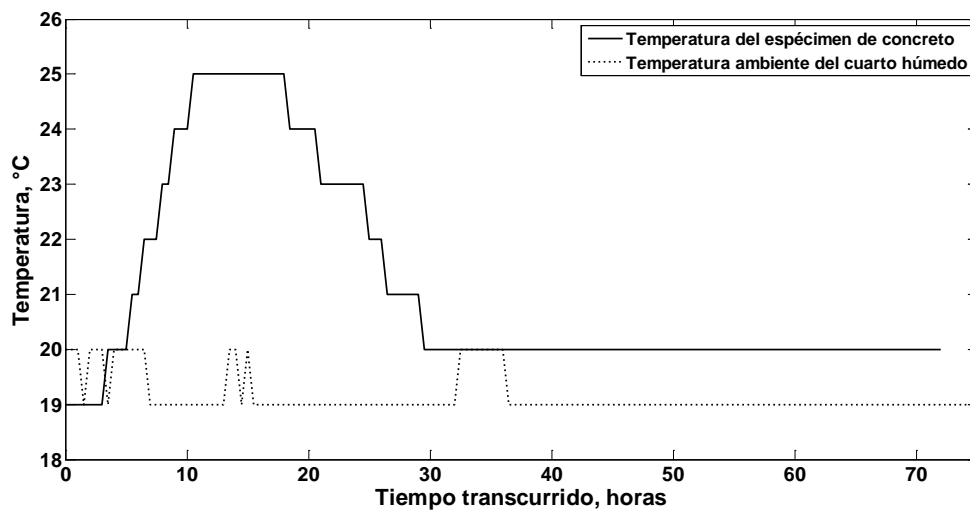


Figura 3.2- Registro de temperaturas de mezcla con relación agua-cemento de 0.48.

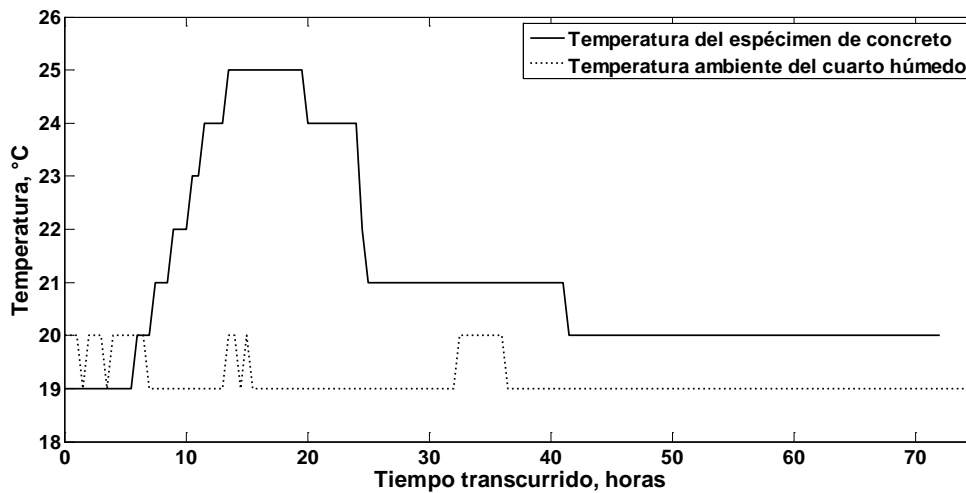


Figura 3.3- Registro de temperaturas de mezcla con relación agua-cemento de 0.46.

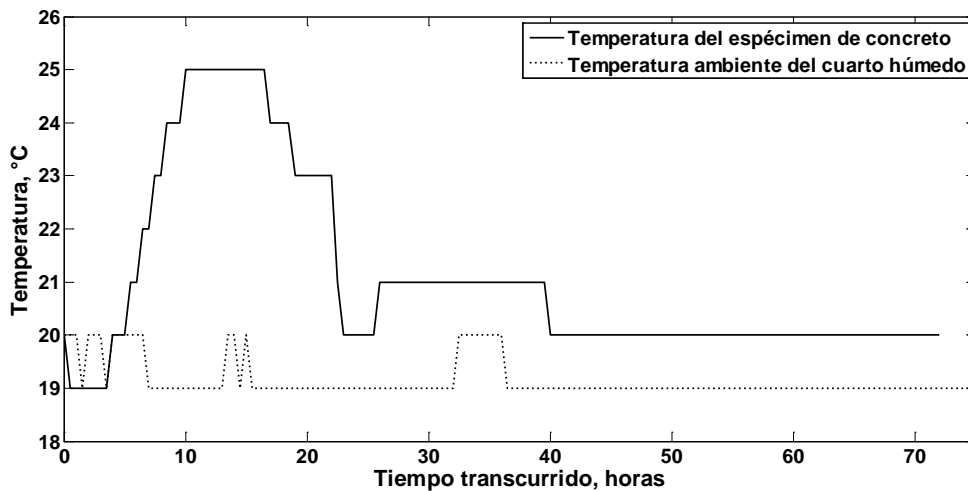


Figura 3.4- Registro de temperaturas de mezcla con relación agua-cemento de 0.44.

3.1.3 Curvas de calibración

Los registros de temperatura se utilizaron para obtener, basándose en la ecuación 1.1, el índice de madurez para las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. Con esto se elaboró una curva de calibración relacionando el índice de madurez del concreto con la resistencia a la compresión simple del mismo. No está de más decir que se fabricó una curva de calibración para cada variación de la relación agua-cemento las cuales se muestran en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7.

En la figura 3.5 se muestra la curva de calibración hecha para la mezcla con relación agua-cemento de 0.48, ajuste del tipo potencial de la dispersión entre el índice de madurez contra la resistencia a la compresión simple de los especímenes cilíndricos. Además, en la Figura se muestra su

coeficiente de determinación así como la ecuación de ajuste. En las figuras 3.6 y 3.7 se muestran los ajustes para las mezclas con relación agua-cemento de 0.46 y 0.44 respectivamente. De acuerdo a los coeficientes de determinación obtenidos se tiene un buen grado de ajuste.

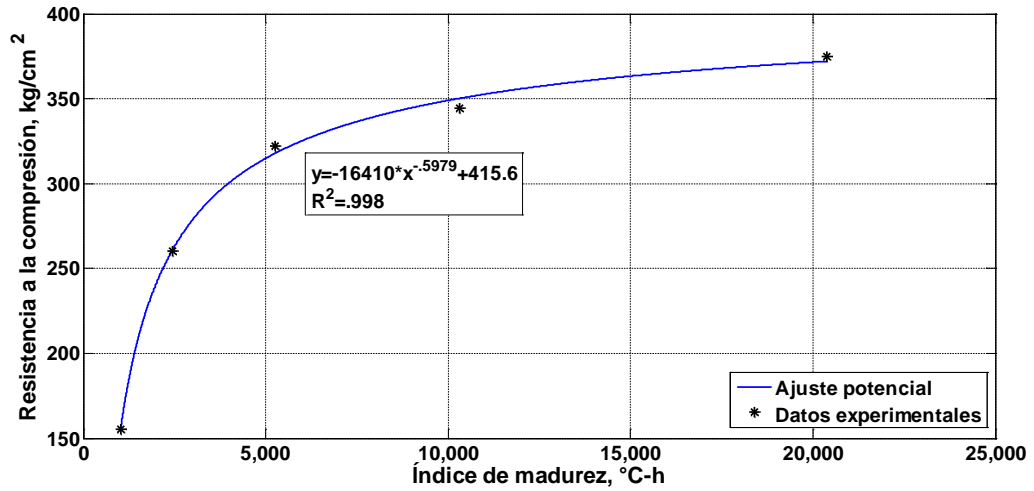


Figura 3.5-Curva de calibración de la mezcla con la relación agua-cemento de 0.48.

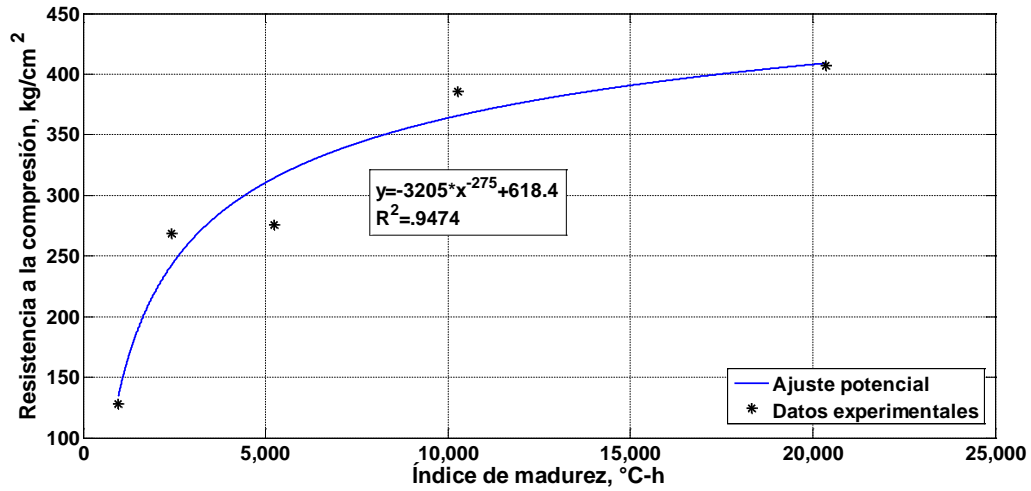


Figura 3.6- Curva de calibración de la mezcla con la relación agua-cemento de 0.46.

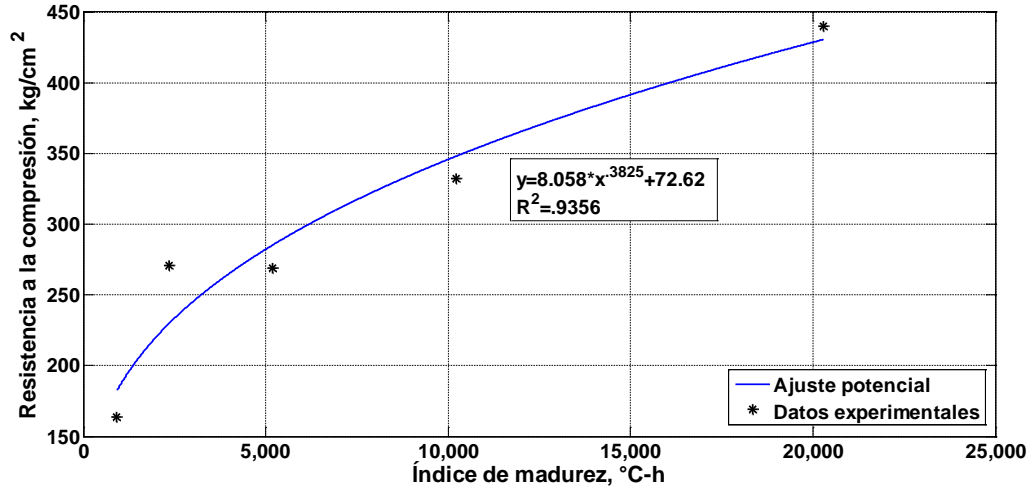


Figura 3.7- Curva de calibración de la mezcla con la relación agua-cemento de 0.44.

3.2 MUESTRAS CURADAS A TEMPERATURA AMBIENTE

Con las curvas de calibración para cada variación de mezcla, se procedió a iniciar con la segunda etapa, que consistió en la fabricación de cilindros que representaron elementos de concreto en obra. Estas muestras se fabricaron de la misma manera que en la primera etapa, pero con la diferencia en el lugar de almacenamiento y tipo de curado. Los cilindros, una vez desmoldados, se cubrieron con polietileno y se colocaron a la intemperie.

Las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11 muestran el progreso de la temperatura para las mezclas de la segunda etapa para las relaciones agua-cemento de 0.44, 0.46 y 0.48, respectivamente. Las lecturas fueron tomadas cada media hora durante las primeras 48 horas y después cada hora hasta los 28 días.

3.2.1 Resistencia del concreto

La resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de las mezclas sometidas al medio ambiente se presenta en la Figura 3.8. La resistencia a la compresión para cada día son el promedio de 3 especímenes, ensayados a los 7, 14 y 28 días, los cuales sirvieron para compararse con las estimaciones hechas con el método del índice de madurez.

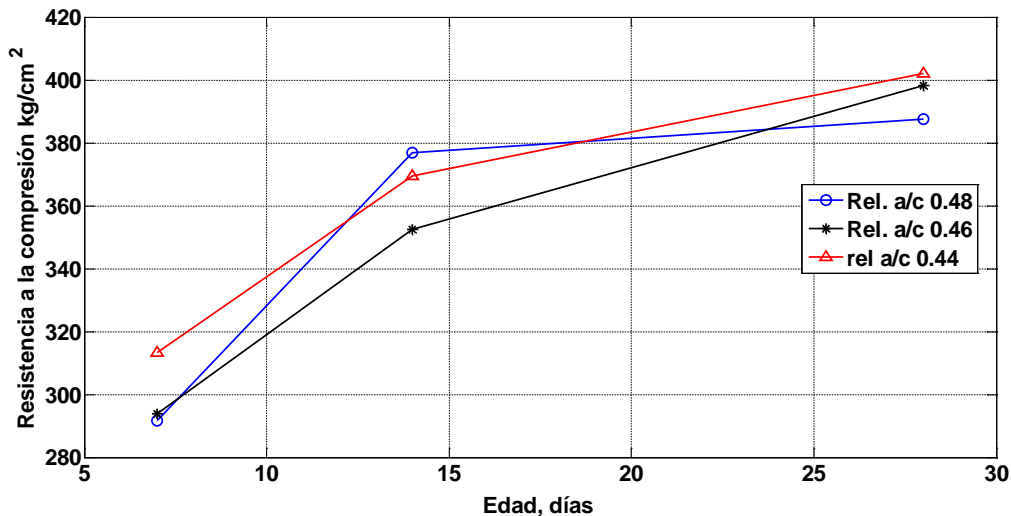


Figura 3.8-Resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos curados a la intemperie.

3.2.2 Madurez del concreto

a) Registro de temperaturas

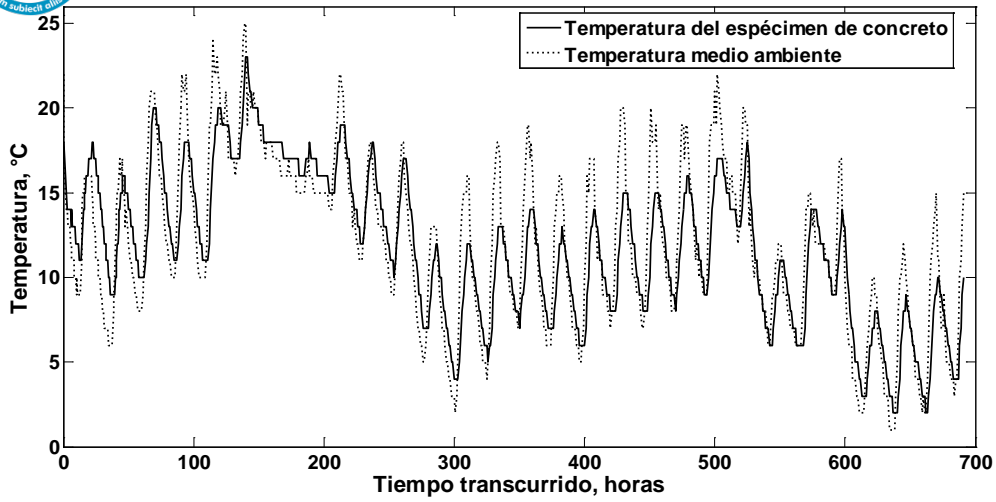


Figura 3.9-Registro de temperatura mezcla con relación agua-cemento de 0.48.

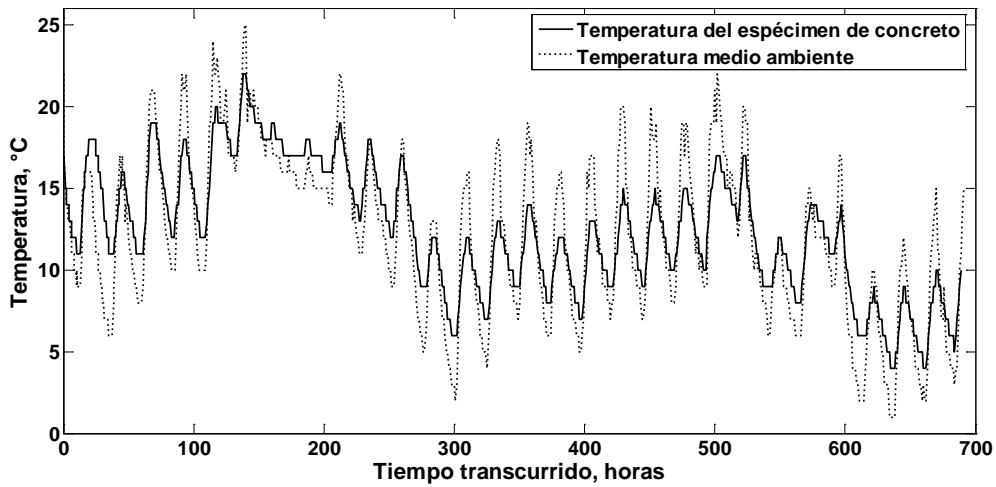


Figura 3.10- Registro de temperatura mezcla con relación agua-cemento de 0.46.

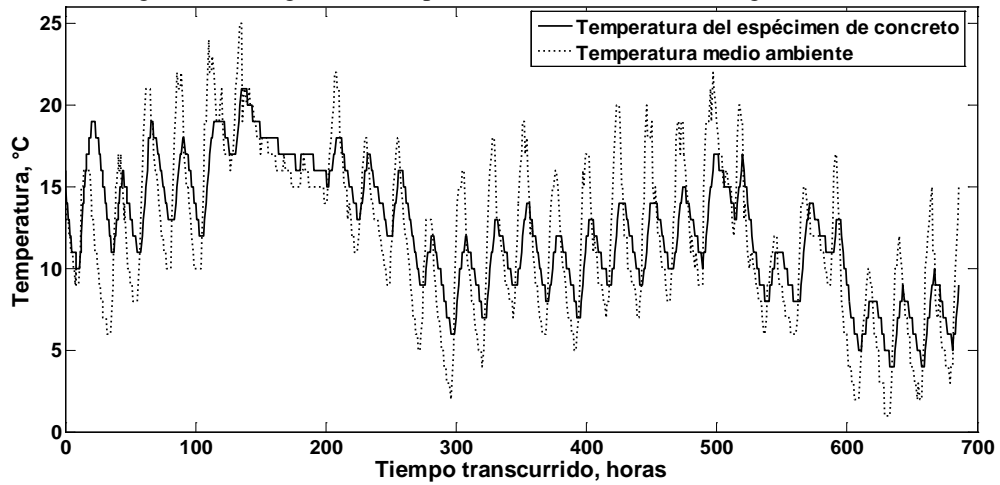


Figura 3.11- Registro de temperatura mezcla con relación agua-cemento de 0.44.

b) Índice de madurez



Usando las curvas de calibración (Figuras 3.5, 3.6 y 3.7) se estimó la resistencia a la compresión simple de los cilindros curados a la intemperie, basándose en el registro de temperatura y su índice de madurez. Posteriormente, se comparó la resistencia a la compresión estimada con la real obtenida de la prueba de resistencia a la compresión de los especímenes curados en campo, simulando las condiciones de un pavimento en condiciones de intemperie. Estas estimaciones junto con su error se muestran en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3. La estimación del índice de madurez se hizo con la Ecuación 1.1. Obteniéndose errores que van desde el 14.2 % hasta el -0.9 % (Ver tablas 3.1, 3.2 y 3.3). Cabe señalar que la variación obtenida en la estimación de la resistencia a la compresión correspondiente al índice de madurez de 8051.3, de la mezcla de concreto con relación agua cemento 0.48, presenta un valor de resistencia a la compresión de 376.8 kg/cm^2 , mayor que el dado por la estimación (339.8 kg/cm^2), lo cual representa un 14.2% mayor. Este incremento se atribuye a una serie registros de temperatura relativamente altos, ya que los especímenes se encontraban separados unos metros del espécimen al que se tomaban lecturas y hubo lecturas registradas que fueron diferentes a las que ocurrieron en el resto de los especímenes. Una de las razones a las que se atribuye este incremento de resistencia, es que la muestra sometida a lecturas de temperatura, tuvo menos exposición al sol que las otras muestras.

c) Análisis de temperaturas del concreto y el medio ambiente

Del registro de las temperaturas del medio ambiente, realizado para la aplicación del método de madurez, que se muestran en las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11, de los especímenes fabricados y curados en condiciones de campo, se desprende la Figura 3.12, la cual muestra una comparación entre la temperatura máxima y mínima en el día registrada por una estación meteorológica y la temperatura del medio ambiente obtenida por el equipo de madurez al registrar la temperatura de la muestra de concreto.

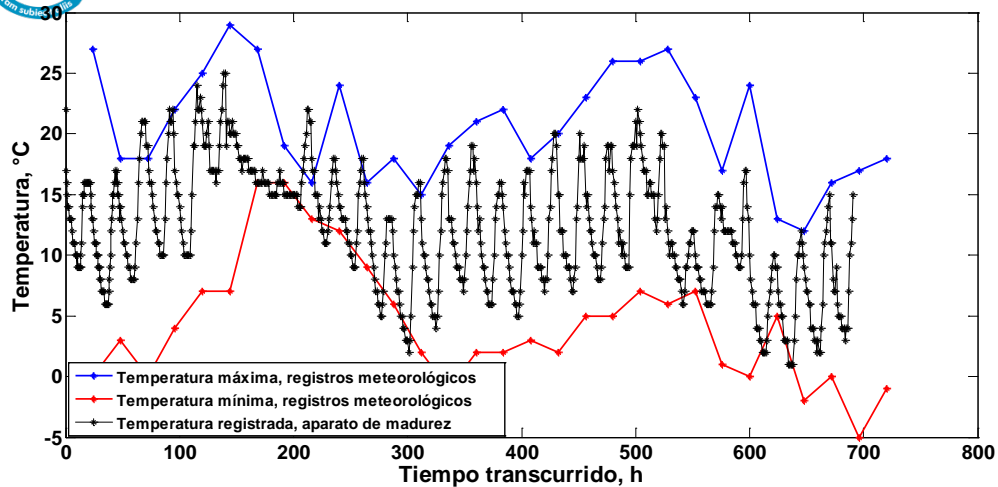


Figura 3.12- Comparación de los registros de temperatura con el aparato de madurez y la estación meteorológica.

La tendencia de los registros de temperatura del medio ambiente mostrados en la Figura 3.12, temperatura máxima y mínima, coincide con la tendencia de la temperatura registrada por el aparato de madurez. Esto explica el comportamiento de la temperatura en las muestras cilíndricas colocadas al medio ambiente, que se muestran en las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11.

Se analizó el comportamiento que sigue la diferencia de temperaturas entre el medio ambiente y la del espécimen de concreto, Figuras 3.9, 3.10 y 3.11.

En la Figura 3.13 se muestra la diferencia entre la temperatura a medio ambiente y la temperatura registrada por el espécimen de concreto para el tiempo de curado transcurrido. Se observa, que en términos generales, las 3 variaciones de la relación agua-cemento siguen la misma tendencia con respecto a la variación entre la temperatura ambiente y la temperatura del espécimen. Sin embargo, se alcanza a apreciar para las lecturas de la relación agua-cemento de 0.48 que sus diferencias, con respecto a las demás relaciones agua-cemento, son las mayores. Mientras que las correspondientes a la relación agua-cemento de 0.44, son las menores, con respecto a las demás relaciones agua-cemento.

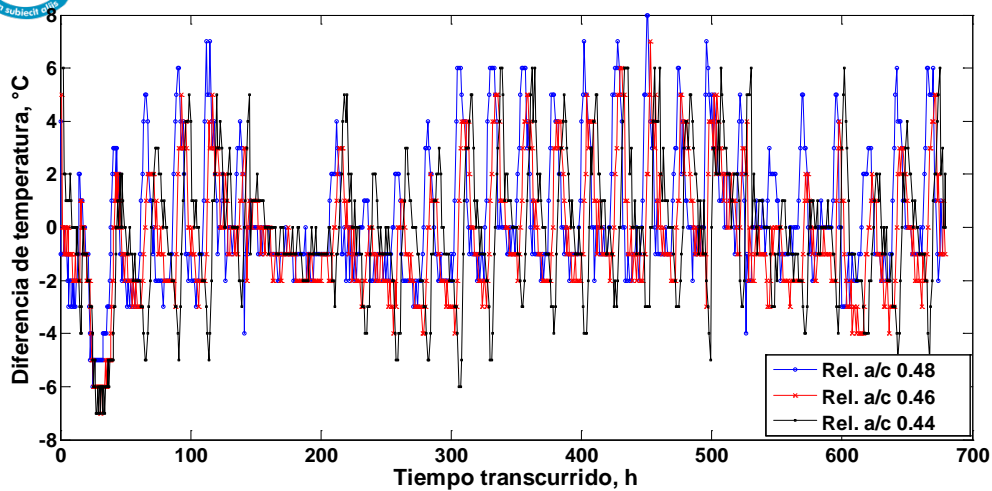


Figura 3.13-Diferencia de temperatura entre los especímenes de concreto y la temperatura al medio para las 3 variaciones en la relación agua-cemento.

Las variaciones de las diferencias de temperatura entre las mezclas pueden deberse a varios factores, como son: la variación de la relación agua-cemento, a la precisión del equipo de medición de temperatura, y/o a la diferencia entre el desarrollo de la temperatura del medio ambiente y el que experimenta la mezcla de concreto.

3.2.3 Estimación de la resistencia del concreto

En la Figura 3.14 se muestra la curva que representa el ajuste potencial que se hizo a los especímenes, elaborados con la mezcla con relación agua-cemento de 0.48, curados en condición estándar (curva de calibración), a partir de la cual se estiman los valores de resistencia de los especímenes cilíndricos curados a la intemperie. Además, se representan los valores de resistencia de los cilindros curados al medio ambiente para los 7, 14 y 28 días. Se aprecia una variación menor para la estimación a los 7 días (-4.3%) que para la estimación a los 14 y 28 días, de (9.8% y 6.4% respectivamente).

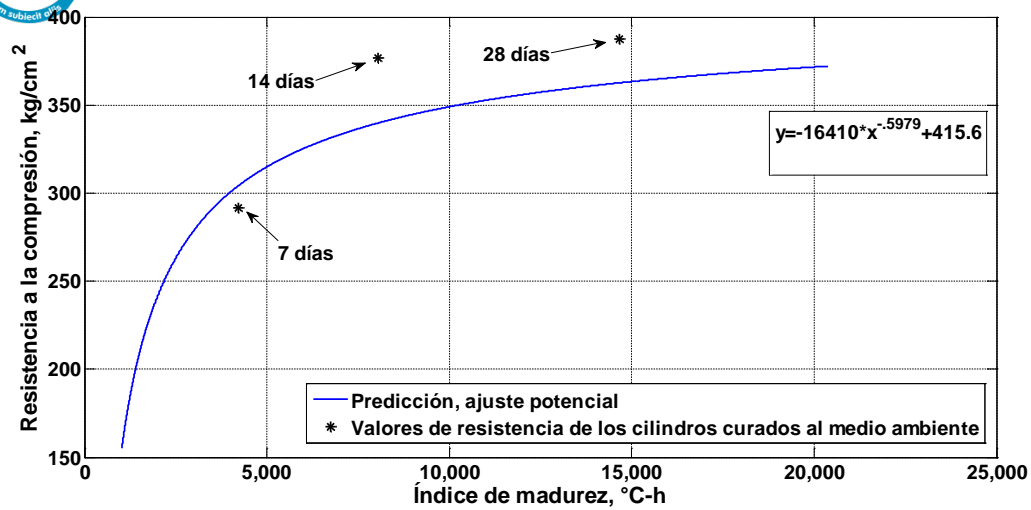


Figura 3.14-Estimación de la mezcla con relación agua-cemento 0.48 y valores de resistencia de los cilindros curados al medio ambiente.

En la Figura 3.15 se aprecia al igual que en la Figura 3.14 la curva que representa el ajuste potencial que se hizo a los especímenes, elaborados con la mezcla con relación agua-cemento de 0.46, curados en condición estándar (curva de calibración), a partir de la cual se estiman los valores de resistencia de los especímenes cilíndricos curados a la intemperie. A diferencia de la Figura 3.14, las estimaciones de los resultados estuvieron más cercanas a las esperadas con la predicción (curva de calibración).

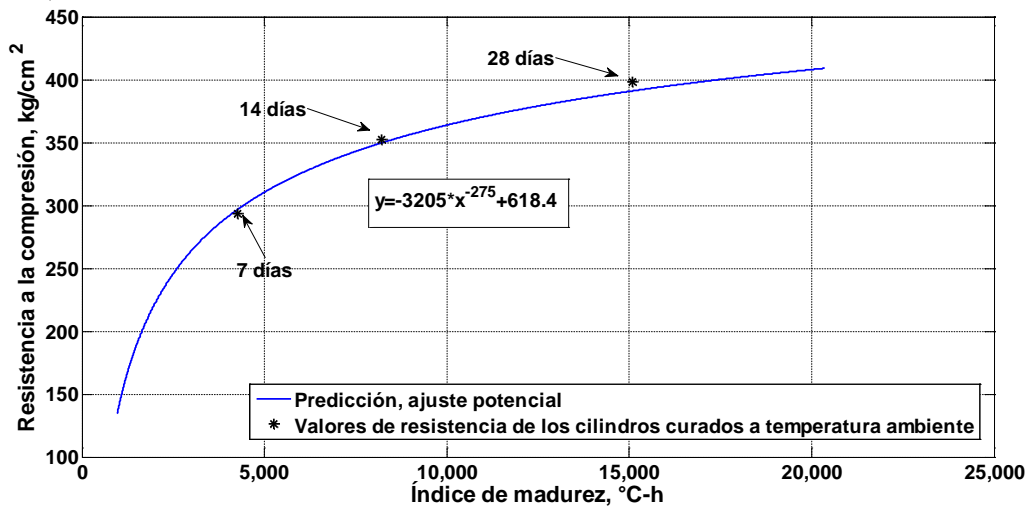


Figura 3.15- Estimación de la mezcla con relación agua-cemento 0.46 y valores de resistencia de los cilindros curados al medio ambiente.

En la Figura 3.14 se denotan una serie de valores obtenidos con la prueba de resistencia a la compresión (376.8 kg/cm² y 387.4 kg/cm²) que superan los estimados con el método del índice de madurez, pero que no se alejan demasiado de los valores estimados, estos valores pudieron deberse a

inconsistencias en la colocación del concreto en los moldes cilíndricos que afecta la resistencia del concreto.

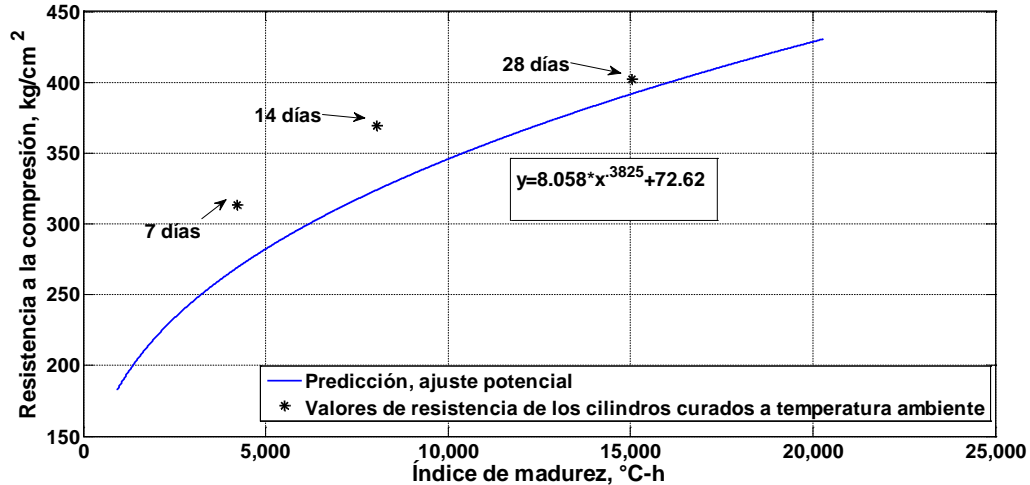


Figura 3.16- Estimación de la mezcla con relación agua-cemento 0.44 y valores de resistencia de los cilindros curados al medio ambiente.

Un resumen de los resultados donde se muestra los errores y valores numéricos de los resultados se muestra en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 junto con las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19 para ayudar a visualizar la naturaleza de los resultados.

3.3 VARIACIÓN EN LA PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

En las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestra en la primera columna la edad en días alcanzada por el espécimen a la hora de ensayarse a la compresión, en la segunda columna se muestra el índice de madurez que alcanzó el espécimen, en la tercera columna se muestra el promedio de la resistencia a la compresión obtenida de los especímenes que se estimó la resistencia por el método de madurez expuestos a intemperie, la cuarta columna contiene las predicciones de resistencia a la compresión con el criterio de índice de madurez, por último en la quinta columna se muestran los errores de las estimaciones de la resistencia de la cuarta columna con respecto el valor obtenido del ensaye de la resistencia a la compresión de la columna 3.

Tabla 3.1-Resultados del método de madurez y la resistencia a la compresión para la mezcla con relación agua-cemento de 0.48.

Edad	Índice de madurez, °C-h	Resistencia, kg/cm ²	Predicción I.M.	Error I.M.
7	4226.7	291.6	304.1	-4.3%
14	8051.3	376.8	339.8	9.8%
28	14655	387.4	362.6	6.4%

Tabla 3.2- Resultados del método de madurez y la resistencia a la compresión para la mezcla con relación agua-cemento de 0.46.

Edad	Índice de madurez, °C-h	Resistencia, kg/cm ²	Predicción I.M.	Error I.M.
7	4256	293.8	296.4	-0.9%
14	8206	352.6	349.6	0.9%
28	15083.3	398.1	391.0	1.8%

Tabla 3.3- Resultados del método de madurez y la resistencia a la compresión para la mezcla con relación agua-cemento de 0.44.

Edad	Índice de madurez, °C-h	Resistencia, kg/cm ²	Predicción I.M.	Error I.M.
7	4212.25	313.3	268.8	14.2%
14	8034.5	369.5	323.7	12.4%
28	15045.8	402.0	391.8	2.5%

Al igual que en las Figuras 3.14, 3.15 y 3.16 en las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19 se muestra en una gráfica de barras la diferencia entre la estimación de la resistencia con el índice de madurez comparado con el valor promedio de la prueba de resistencia a la compresión.

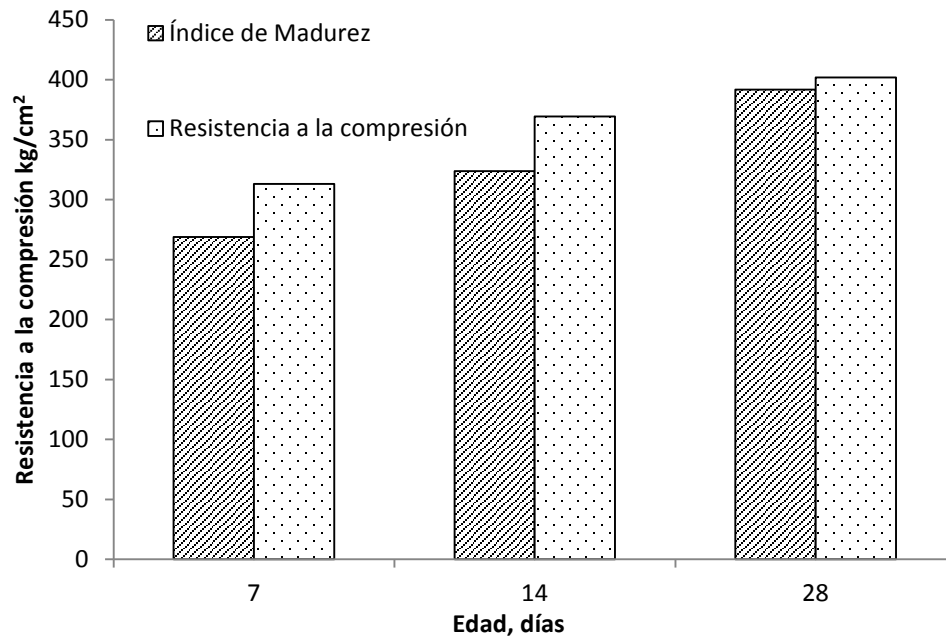


Figura 3.17-Comparación de la estimación de la resistencia a la compresión con el índice de madurez con el valor del ensaye de resistencia a compresión de la mezcla con relación agua-cemento de 0.48.

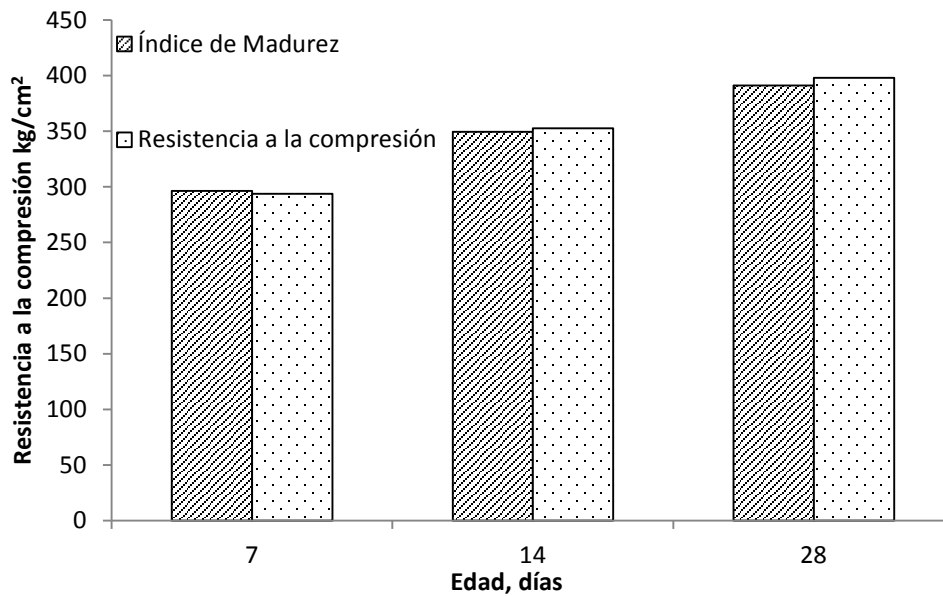


Figura 3.18- Comparación de la estimación de la resistencia a la compresión con el índice de madurez con el valor del ensaye de resistencia a compresión de la mezcla con relación agua-cemento de 0.46.

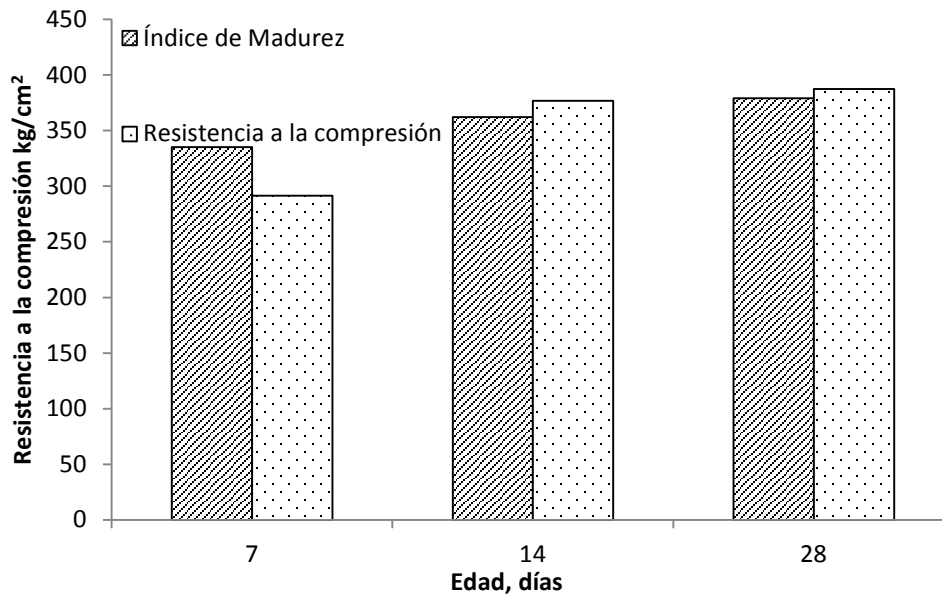


Figura 3.19- Comparación de la estimación de la resistencia a la compresión con el índice de madurez con el valor del ensaye de resistencia a compresión de la mezcla con relación agua-cemento de 0.44.

Las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19 representan de manera más visible las predicciones de la resistencia a la compresión contra su valor real por medio de gráfica de barras.

El tiempo de fraguado también se obtuvo de las mezclas con relación agua-cemento de 0.48, 0.46 y 0.44 que se muestran en las Figuras 3.20, 3.21 y 3.22 respectivamente. Para esto se ajustó a la curva que mejor representara los valores que se tenían, siendo la ecuación potencial de la forma “ $y=ax^b$ ” la que mayor coeficiente de determinación presentó. La ecuación potencial que gobierna cada uno de los ajustes se presenta en cada figura, además de marcadores que señalan el tiempo inicial y tiempo final de fraguado. El tiempo de fraguado es cuando el mortero obtenido de la muestra de concreto obtiene después de determinado tiempo una resistencia a la penetración de 500 y 4000 psi para encontrar así su tiempo inicial y final de fraguado respectivamente. La explicación de la prueba de evaluación del tiempo de fraguado se explica mejor en el subcapítulo 2.6 “Evaluación del tiempo de fraguado”.

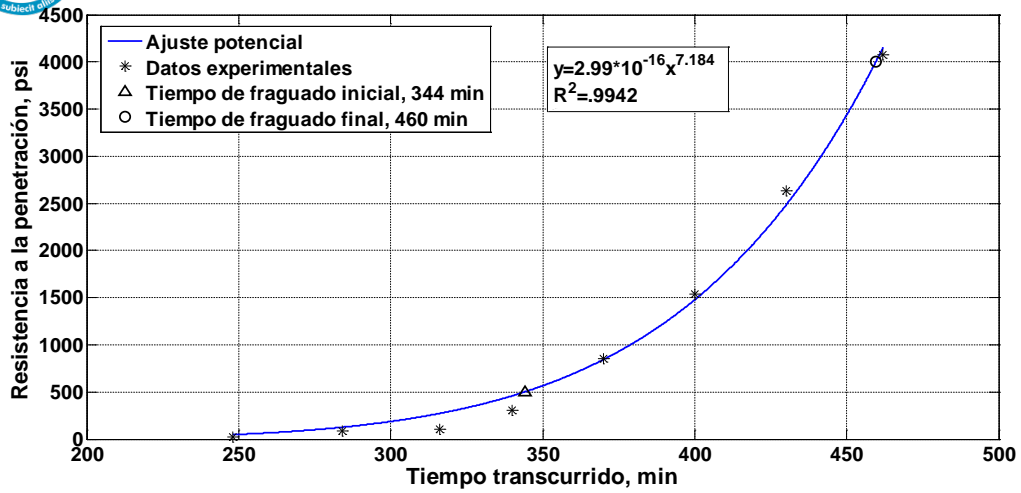


Figura 3.20-Tiempo de fraguado inicial y final junto con el ajuste potencial para la mezcla con relación agua-cemento de 0.48.

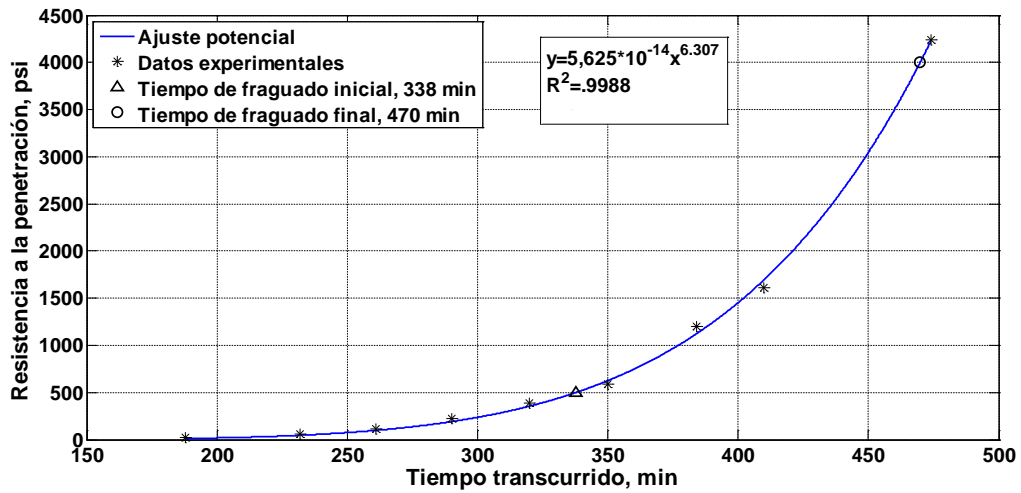


Figura 3.21- Tiempo de fraguado inicial y final junto con el ajuste potencial para la mezcla con relación agua-cemento de 0.46.

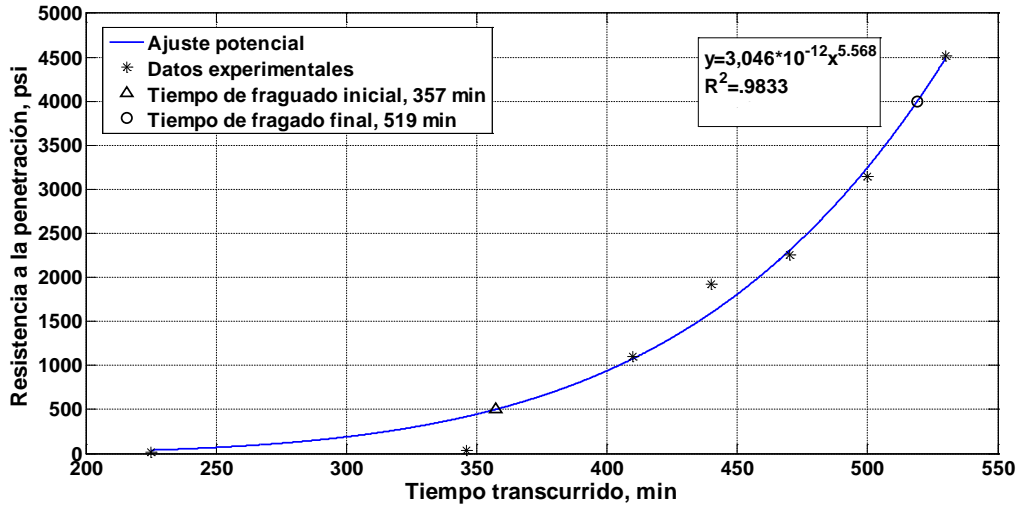


Figura 3.22- Tiempo de fraguado inicial y final junto con el ajuste potencial para la mezcla con relación agua-cemento de 0.44.

Se hizo un ajuste de la variación del tiempo de fraguado contra la relación agua-cemento de la mezcla de concreto, que se muestra en la Figura 3.23. La ecuación que gobierna la curva se muestra en la figura junto con su coeficiente de determinación.

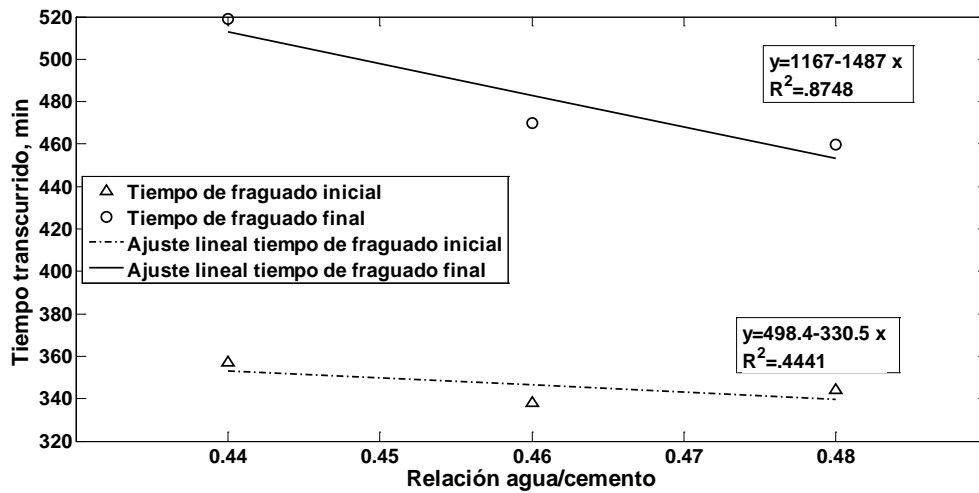


Figura 3.23-Dispersión de relación agua-cemento contra tiempo de fraguado inicial y final que se obtuvo de las tres pruebas de evaluación del tiempo de fraguado.

En la Figura 3.23 se puede apreciar una tendencia lineal que rige el comportamiento de los resultados tanto para el tiempo de fraguado inicial como para el tiempo de fraguado final. Es posible mediante el ajuste que se hizo, estimar el tiempo de fraguado inicial y final de una mezcla posterior que se quisiera hacer con otra relación agua-cemento con ayuda del ajuste hecho en la Figura 3.23.



Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones

Un buen estimador de la resistencia a la compresión simple del concreto hidráulico es el método de madurez, el cual es de gran ayuda cuando se desea saber los valores de resistencia en campo.

Se tuvieron 3 diferentes variaciones en la relación agua-cemento para llevar a cabo las estimaciones de resistencia a la compresión por medio del método de madurez, en donde sus estimaciones fueron cercanas que van desde el -0.9% para la relación agua-cemento de 0.46 a los 7 días, hasta el 14.2% para la relación agua-cemento de 0.44 a los 7 días. En general, los valores de error estuvieron por debajo del 10% (exceptuando los errores de 12.4 y 14.2 %), que se considera buenas estimaciones y óptimas para usarse en el control de calidad en el concreto hidráulico de pavimentos para carreteras.

La evaluación del tiempo de fraguado se realizó para las 3 variaciones de la relación agua-cemento, en donde se obtuvieron diferencias entre el tiempo inicial de fraguado que van del orden de 344, 338 y 357 minutos para las relaciones agua-cemento 0.48, 0.46 y 0.44 respectivamente. Para el tiempo final de fraguado se tuvieron valores de 460, 470 y 519 minutos para las relaciones agua-cemento 0.48, 0.46 y 0.44 respectivamente. Los valores de tiempo de fraguado inicial y final, muestran que entre menor sea la relación agua-cemento de las mezclas, mayor es el tiempo en que se alcanza los valores de tiempo inicial y tiempo final de fraguado. Los resultados mostrados para la evaluación del tiempo de fraguado en esta investigación se concluyen que son adecuados para usarse en las aplicaciones convenientes para la construcción de pavimentos para carreteras con concreto hidráulico.

Se recomienda para trabajos posteriores seguir la línea de investigación del método de madurez para concreto con propiedades adecuadas o comunes en el concreto para pavimentos de carreteras, con ciertas variaciones que se consideran adecuadas como son un número superior de especímenes, diferentes relaciones agua-cemento, el uso de aditivos para concreto que mejoren sus propiedades, uso de concreto de alta resistencia así como someter los especímenes a diferentes temperaturas de curado tanto para la etapa de calibración como para el curado simulando condiciones de intemperie.

Para la evaluación del tiempo de fraguado se recomienda además de las variaciones mencionadas en el párrafo pasado, el uso de diferentes temperaturas en el momento de la prueba.



Referencias

ACI committee 211, 1991. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, s.l.: s.n.

ACI Committee 228, 1998. *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*, s.l.: s.n.

ACI, 2013. *ACI Concrete Terminology*.

Alabama Department of Transportation, 2006. *Evaluation of the maturity method to estimate concrete strength*, ALABAMA, EU.: HIGHWAY RESEARCH CENTER.

American Concrete Institute 325.9R-91, 1997. *Guide for Construction of Concrete Pavements and Concrete Bases*, s.l.: s.n.

American Concrete Institute 363R, 2010. *Report on High Strength Concrete*, Farmington Hills, MI.: s.n.

American Concrete Institute, 1980. *ACI Manual of Concrete Practice - Part I*, Detroit, Michigan: s.n.

American Concrete Pavement Association, 2002. *Maturity Testing of Concrete Pavements: Applications and Benefits*, Skokie, IL: s.n.

Antico, F. C. y otros, 2015. Using accelerated pavement testing to examine traffic opening criteria for concrete pavements. *Elsevier*.

Atkins, H. N., 1997. *Highway Materials, Soils and Concretes*. 3ra. ed. Columbus(Ohio): Prentice Hall.

Carino, N. J. & Lew, H. S., 2001. *The maturity method: from theory to application*, s.l.: s.n.

CMIC, 2012. *Infraestructura*, s.l.: s.n.

Crawford, G. I., 1997. *Guide to Nondestructive Testing of Concrete*, Washington, DC.: s.n.

Croney, P. & Croney, D., 1998. *The Design and Performance of Road Pavement*. s.l.:Mc Graw-Hill.



Ding, X. y otros, 2016. Experimental study on long-term compressive strength of concrete with manufactured sand. *Elsevier*, 28 Enero.

Farny, J. A. & Panarese, W. C., 1994. High-Strength Concrete. *Portland Cement Association*.

Federal Highway Administration, 2005. *Maturity Testing for Concrete Pavement Applications*, s.l.: s.n.

Freiesleben, H. P. & Pedersen, J., 1977. *Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete*, s.l.: s.n.

Freiesleben, H. P. & Pedersen, J., 1977. *Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete*, s.l.: s.n.

Ghafoori, N. & Tays, M. W., 2010. Resistance to wear of fast-track Portland cement concrete. *Elsevier*.

Holland, T. C., 1987. Using the maturity method to predict concrete strength.

IMCYC, 2006. Pruebas de resistencia a la compresión del concreto. *Construcción y tecnología*, Junio.

Lew, H. S. y otros, 1979. *Investigation of construction failure of reinforced concrete cooling tower at willow island west virginia*, Washington, D.C.: s.n.

Malek, J. & Kaouther, M., 2014. Destructive and Non-destructive Testing of Concrete Structures. *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volumen 8(No. 4).

Neville, A. N., 1999. *Tecnología del concreto*. Cd. de México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Saul, A., 1951. Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure. *Magazine of concrete Research*, 2(6), pp. 127-140.

Schmidt, W. & Fehling, E., 2004. *Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe*, Kassel, Alemania.: s.n.

Tahsin, A. Y. & Hung-Liang, C., 2015. *Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete*, Morgantown, Estados Unidos.: s.n.



Tepke , D. & Tikalsky, P., 2001. *Concrete Maturity Progress: Survey of Departments of Transportation*, Washington, DC.: s.n.

Waller , V., d'Aloia, L., Cussigh, F. & Lecrux, S., 2004. Using the maturity method in concrete cracking control at early ages. *ELSEVIER*.

Zárate, A. M. & Tena, C. J. A., 2001. *Pavimentos de concreto para carreteras*. s.l.:s.n.

Zhang, J., Cusson, D., Monteiro, P. & Harvey, J., 2008. New perspectives on maturity method and approach for high performance concrete applications. *Elsevier*.



Anexo A: Recursos y materiales

1. 300 kg de agregado fino triturado
2. 500 kg de grava triturada
3. 5 bultos de cemento Portland CPO 30R
4. Revolvedora de un bulto de capacidad
5. 3 Artesas metálicas de 150x120x15 cms
6. Cucharón de metal
7. Llana de albañil
8. Pala de albañil
9. Esponja de limpieza
10. Termómetro de mercurio
11. Bascula de capacidad de 100 kg
12. Balanza de capacidad de 500 g
13. Aparato de medición de madurez
14. Prensa hidráulica para prueba de compresión de capacidad mínima de 120000 kg.
15. 1 l de súper-fluidificante de alto rango
16. Penetrómetro para determinar el tiempo de fraguado.
17. Recipientes de polietileno.