

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“Determinación de la resistencia del hormigón en obra a partir de la madurez y estudio de factibilidad en su implementación basándonos en la correlación temperatura – tiempo – resistencia”

TESIS DE GRADO

Previo al título de

INGENIERO CIVIL

Presentado por:

STEFFANY GABRIELA COLINA CAMACHO

EVELYN ELIZABETH GARCÍA LEÓN

JOSE RICARDO REYES SERRANO

Guayaquil- Ecuador

Año: 2014

AGRADECIMIENTO

Agradecemos primero a Dios, a nuestras familias, a nuestros amigos, a nuestros docentes y a todo el personal del Centro Técnico del Hormigón de Holcim Planta San Eduardo en especial al Ing. Cristian Velasco Ochoa por haber guiado esta investigación y brindarnos su apoyo durante cada etapa de la misma.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios que con su inmensa misericordia me permitió llegar hasta aquí, a mi fallecido abuelo a quien extraño cada día que desde el cielo ha continuado siendo mi inspiración, a mi padre cuyo apoyo y cariño siempre han estado presentes a lo largo de mi vida, a mi madre que me ha brindado su confianza y amor, a mi hermano por su amistad, a mi abuela por su ternura, a mi tía y primos por ser mi apoyo constante y a todos mis amigos y compañeros de la universidad que estuvieron a mi lado en las buenas y en las malas durante esta bella etapa de mi vida.

STEFFANY COLINA CAMACHO

DEDICATORIA

Dedicado a todas las personas que han formado parte de mi vida durante todos estos años compañeros, profesores, amigos y familiares. Y una dedicatoria especial para mis padres que gracias a su convicción y esfuerzo he llegado a alcanzar esta meta tan anhelada.

JOSE RICARDO REYES SERRANO

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis con mucho cariño y amor primero a DIOS porque siempre está conmigo en cada paso que doy, cuidándome, guiándome y dándome fortaleza para seguir adelante; a mi MAMI por ser mi ejemplo de superación y fuerza, por siempre darme su apoyo incondicional, porque siempre hace todo lo que está a su alcance para que mi hermano y yo logremos nuestras metas, porque ella ha sido más que una madre, es mi amiga, mi fortaleza e inspiración; a mi HERMANO por ser mi defensor, mi apoyo y también inspiración para cada logro en mi vida; a ustedes siempre mi corazón y agradecimiento.

EVELYN ELIZABETH GARCÍA LEÓN

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Heinz Terán M.
DECANO DE FICT

Dra. Carmen Terreros
DIRECTORA DE TESIS

Ing. Natividad García
VOCAL

Dr. Carlos Rodríguez D.
VOCAL SUPLENTE

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesis, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

RESUMEN

Debido a que los métodos constructivos que se utilizan actualmente requieren de una ejecución más rápida para que los elementos estructurales puedan entrar en servicio lo antes posible y de manera segura, es necesario, que dichos métodos aumenten su velocidad pero tomando en cuenta que el resultado que se alcance sea estructuralmente adecuado. Esto se logra llevando un control de cómo va aumentando la resistencia del hormigón desde edades tempranas de tal manera que se llegue a resultados confiables.

La propiedad exotérmica es una característica del hormigón, es decir genera calor debido a las reacciones químicas producto de la hidratación

del cemento y que usualmente no es aprovechada para obtener beneficios en la estructura tales como un curado acelerado y ganancia de resistencia en corto tiempo, ya sea para la remoción de los encofrados o para que la estructura sea usada a edades tempranas. Sin embargo, gracias a esta propiedad se han desarrollado varios métodos, que en la mayoría de los casos se basan en curvas obtenidas mediante ensayos de resistencias vs edad, las cuales determinan de qué manera evoluciona la resistencia del hormigón en el tiempo y se obtienen mediante un procedimiento ya normalizado.

A partir de este procedimiento se obtienen curvas que no requieren de datos de temperatura, por esta razón los cambios en la temperatura que pudieran haber dentro del hormigón no son registrados, y es exactamente la temperatura uno de los principales factores que afectan la resistencia del concreto en una estructura; por lo que se hace necesario que sean

desarrollados modelos matemáticos no destructivos, a diferencia del caso de la rotura de especímenes, que nos permitan evaluar la resistencia del hormigón de manera rápida, y obviamente del cual podamos obtener resultados que se ajusten a las condiciones a las que normalmente está sometida la estructura de hormigón tales como los cambios de clima, el tipo de cemento a usarse y el proceso de curado que se le dé al concreto, así como cualquier otro factor relevante que produzca cambios en la calidad del hormigón en el elemento fundido.

Es así como surge la necesidad de desarrollar y obtener información del método de madurez a partir de ensayos que hemos realizado en el Centro Técnico del Hormigón para el desarrollo de este proyecto.

La presente tesis combina información técnica junto a ensayos de laboratorio y datos que se obtendrán en obra, de tal forma que el análisis

se convierte en una herramienta que ayudará a caracterizar de mejor forma la madurez del hormigón.

En los métodos de madurez se usa el concepto fundamental de que el hormigón desarrolla sus propiedades a medida que se hidrata y libera calor. La medida en que se desarrolla la resistencia en el hormigón a edades tempranas está directamente relacionada con la medida en que el cemento se hidrata. El calor generado por la reacción de hidratación se registra como un aumento de temperatura del concreto. La principal ventaja que nos ofrece el método de madurez es que usa el perfil de temperatura actual de la estructura de hormigón para estimar su resistencia en sitio.

La práctica tradicional de utilizar los especímenes curados en obra no resulta en el mismo perfil de temperatura del concreto colocado en el

sitio, y probablemente no estima su resistencia con precisión, por lo que el método de madurez se hace indispensable.

ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
ASTM	American Society of Testing and Materials.
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización.
HE	High Early Cement (Cemento de Resistencias Tempranas).
a/c	Relación Agua/Cemento.
CTH	Centro Técnico del Hormigón

SIMBOLOGIA

m	metros
cm	Centímetro
mm	Milímetro
in	Pulgada
°C	Grados Celsius
MPa	Mega Pascal
f'c	Resistencia a la compresión
s	Segundo
T	Temperatura
t	tiempo
T ₀	Temperatura Datum
M	Índice de Madurez
Kg	Kilogramo
Kg/cm ³	Kilogramo por metro cúbico
KN	Kilo Newton
KN / s	Kilo Newton/ segundo
KHz	Kilo-hertz

Contenido

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

DECLARACIÓN EXPRESA

RESUMEN

ABREVIATURAS.....I

SIMBOLOGÍA.....II

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	4
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo General	6
1.2.2 Objetivos Específicos	7
1.3 Antecedentes Generales	8
1.4 Aplicación Técnica	9
1.5 Planteamiento del Problema	11
1.6 Propiedades del hormigón	13
1.6.1 Propiedades del Hormigón Fresco	13
1.6.2 Propiedades del Hormigón Endurecido	16
2. MADUREZ DEL HORMIGÓN	20
2.1 Introducción	20
2.2 Concepto de Madurez del Hormigón	24
2.3 Por qué utilizar un Método de Madurez	27
2.4 Cómo se utilizan los Métodos de Madurez	34
3. PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA A EMPLEAR	42
3.1 Introducción	42
3.2 Desarrollo analítico de la metodología.	44
3.2.1 Calor de hidratación del hormigón	44
3.2.2 Influencia De Los Factores Externos	49

3.2.3	Temperatura Ambiente	51
3.2.4	Temperatura Del Hormigón	54
3.3	Metodología a implementar	59
3.3.1	Variables estudiadas y procedimiento a evaluar.	60
3.3.2	Dosificación del hormigón	63
3.3.3	Procedimiento para prueba en laboratorio y campo	68
3.4	Secuencia, procedimiento y protección de especímenes en laboratorio.....	76
3.4.1	Proceso para Fabricación de Probetas de Hormigón (Calculo de Índice de Madurez).	77
3.4.2	Mortero equivalente (Ensayo de tiempo de fraguado y Temperatura Datum).	82
3.5	Procedimiento para el Registro de Temperatura de especímenes de Hormigón y Losa de Pavimento.....	92
3.5.1	Pasos para programar el dispositivo de registro de temperaturas “EasyLog®”	93
3.5.2	Pasos para descargar los datos registrados por “EasyLog®”	99
4.	RESULTADOS OBTENIDOS	141
4.1.	Introducción	141
4.2.	Resultados de ensayos para obtener la Temperatura Datum.....	142
4.2.1.	Tiempo de Fraguado	142
4.2.2.	Resistencia a la compresión de cubos de 50x50x50 mm.....	150
4.2.3.	Obtención de Factor K y Temperatura Datum.....	154
4.3.	Resultados de Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón curados bajo condiciones estándar.	160
4.4.	Obtención de la Curva de Madurez	163
5.	APLICACIÓN EN UNA OBRA CIVIL	178
5.1.	Introducción	178
5.2.	Diseño del Hormigón	179
5.3.	Metodología Empleada	180
5.3.1.	Muestreo.....	180
5.3.2.	Ensayos en estado fresco del hormigón	181

5.3.3.	Fundición de paño de losa de hormigón.....	188
5.3.4.	Ensayos en estado endurecido del hormigón	191
5.4.	Comprobación de resultados	198
5.4.1.	Especímenes curados en Obra	198
5.4.2.	Control de Calidad	200
5.4.3.	Núcleos de Pavimento.....	202
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	213
6.1.	CONCLUSIONES	213
6.2.	RECOMENDACIONES	217
	BIBLIOGRAFÍA.....	221

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1	21
Gráfica 2.2	25
Gráfica 2.3	26
Gráfica 2.4	29
Gráfica 2.5	30
Gráfica 2.6	31
Gráfica 2.7	33
Gráfica 2.8	39
Gráfica 3.1	47
Gráfica 3.2	55
Gráfica 3.3	58
Gráfica 3.4	75
Gráfica 3.5	76
Gráfica 3.6	79
Gráfica 3.7	81
Gráfica 3.8	82
Gráfica 3.9	83
Gráfica 3.10	84
Gráfica 3.11	84
Gráfica 3.12	85
Gráfica 3.13	86
Gráfica 3.14	87
Gráfica 3.15	88
Gráfica 3.16	89
Gráfica 3.17	89
Gráfica 3.18	90
Gráfica 3.19	91
Gráfica 3.20	92
Gráfica 3.21	93
Gráfica 3.22	94
Gráfica 3.23	95
Gráfica 3.24	96
Gráfica 3.25	96
Gráfica 3.26	97
Gráfica 3.27	98
Gráfica 3.28	99
Gráfica 3.29	100
Gráfica 3.30	101
Gráfica 4.1	145
Gráfica 4.2	147
Gráfica 4.3	149

Grafica 4.4	154
Grafica 4.5	158
Grafica 4.6	159
Grafica 4.7	162
Grafica 4.8	163
Grafica 4.9	167
Grafica 4.10	174
Gráfica 5.1	183
Gráfica 5.2	184
Gráfica 5.3	185
Gráfica 5.4	186
Gráfica 5.5	187
Gráfica 5.6	188
Gráfica 5.7	189
Gráfica 5.8	190
Gráfica 5.9	190
Gráfica 5.10	191
Gráfica 5.11	193
Gráfica 5.12	195
Gráfica 5.13	197
Gráfica 5.14	199
Gráfica 5.15	201
Gráfica 5.16	201
Gráfica 5.17	203
Gráfica 5.18	203
Gráfica 5.19	206
Gráfica 5.20	206
Gráfica 5.21	207
Gráfica 5.22	208
Gráfica 5.24	211
Gráfica 5.25	212
Gráfica 5.26	212
Gráfica 5.27	213

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.....	46
Tabla II.....	66
Tabla III.....	67
Tabla IV.....	77
Tabla V.....	78
Tabla VI.....	80
Tabla VII.....	91
Tabla VIII.....	143
Tabla IX.....	145
Tabla X.....	147
Tabla XI.....	150
Tabla XII.....	151
Tabla XIII.....	152
Tabla XIV.....	153
Tabla XV.....	155
Tabla XVI.....	156
Tabla XVII.....	157
Tabla XVIII.....	158
Tabla XIX.....	159
Tabla XX.....	162
Tabla XXI.....	165
Tabla XXII.....	166
Tabla XXIII.....	170
Tabla XXIV.....	172
Tabla XXV.....	173
Tabla XXVI.....	174
Tabla XXVII.....	176
Tabla XXVIII.....	176
Tabla XXIX.....	177
Tabla XXX.....	192
Tabla XXXI.....	200
Tabla XXXII.....	202
Tabla XXXIII.....	204
Tabla XXXIV.....	214

CAPITULO I

1. INTRODUCCION

El hormigón, llamado también concreto, es el resultado de mezclar cemento, áridos y agua; en algunos diseños se suelen utilizar aditivos¹. El hormigón posee propiedades que no solo dependen de las cantidades de los componentes de la mezcla y su calidad, sino también del medio al que está expuesto durante el proceso de moldeo, fraguado y endurecimiento.

La importancia que el hormigón ha alcanzado en la actualidad se debe a que es un material estructural que puede adaptarse de manera rápida a diferentes tipos de moldes ya que tiene una consistencia plástica en estado fresco, tomando así la forma que el constructor desee darle.

¹ Los aditivos son productos químicos que se incorporan al hormigón en estado fresco para de esta forma mejorar sus propiedades físicas. Se añade en proporciones no superiores al 5% del peso de cemento del diseño. Se presentan en forma líquida o en polvo.

Se conoce que el hormigón es un material sumamente resistente a la compresión, aunque débil a la tracción, para lo que se utiliza acero de refuerzo que es resistente a esta fuerza, obteniendo lo que se conoce como Hormigón Armado. Este producto final es muy resistente no solo a las cargas de diseño, sino también que no sufre mayor deterioro debido a las acciones del intemperismo.

Cuando el cemento y el agua entran en contacto se producen varias reacciones químicas que provocan el fraguado y endurecimiento de la mezcla. Del tiempo que transcurre mientras se dan estos procesos dependen muchos factores entre ellos la temperatura que experimenta el hormigón debido al proceso de hidratación del cemento. El proceso de hidratación es un proceso exotérmico, que provoca el aumento de temperatura del hormigón durante el fraguado y endurecimiento. La temperatura es una variable muy influyente no sólo sobre la tasa de evaporación del agua de mezclado, sino también, sobre las características físicas de los agregados y la velocidad de hidratación del cemento. La velocidad de hidratación del cemento aumenta de manera proporcional con la temperatura.

La resistencia del hormigón se ve afectada por la velocidad de hidratación, ya que aumenta con la edad, pero depende de las condiciones de humedad y temperatura dentro del mismo. Es así como la resistencia aumenta a medida que el hormigón sea hidratado, y debido a esto se recomienda el curado húmedo de forma continua desde que el hormigón es colocado hasta que alcance la resistencia requerida.

Aun cuando al realizar un diseño de hormigón se toman en cuenta varios aspectos como son la relación agua/cemento, tamaño máximo de agregado, asentamiento requerido, humedad y absorción de los agregados; para obtener un desempeño mecánico deseado, este diseño se realiza bajo condiciones ideales. Debe hacerse un seguimiento en obra, el cual requiere cierto número de especímenes que se ensayan a edades establecidas, lo que conlleva tiempo, dinero y esfuerzo.

Con todo lo descrito se observa que la resistencia del hormigón no solo depende de sus componentes sino también del entorno en el que se encuentra y es proporcional a la hidratación del cemento, la cual se ve influenciada por la relación agua/cemento de la mezcla, el tipo de curado y de las condiciones ambientales.

Es por esto que el presente trabajo se basa en el método Nurse-Saul² del ensayo de Madurez Del Hormigón descrito en la norma ASTM C1074-11³ ya que estima la resistencia del hormigón de forma rápida y confiable a partir de una curva Resistencia vs Madurez basada en el historial de temperatura del mismo, lo que ahorraría tiempo, dinero y esfuerzo.

1.1 Justificación

En nuestro país y alrededor del mundo los procesos constructivos se han ido incrementando en forma considerable al pasar de los años; en la actualidad es tanta la demanda constructiva que estos procesos deben de realizarse de tal manera que el hormigón sea puesto en servicio lo más pronto posible. La velocidad de construcción se ha acelerado; determinar la resistencia del hormigón a edades tempranas y obtener resultados confiables se ha vuelto indispensable para el constructor. Entonces surge la necesidad de desarrollar un modelo mediante el cual se pueda obtener datos del hormigón que permitan conocer su resistencia de manera rápida, veraz y a edades tempranas.

² Nurse desarrollo sus teorías en 1949, Saúl presentó sus investigaciones en 1951, ambos relacionan los efectos que tiene la temperatura y la edad del hormigón en sitio sobre la resistencia del mismo.

³ Norma ASTM C1074: Práctica estándar para estimar la resistencia del hormigón por el método de madurez

Para monitorear la resistencia del hormigón vaciado en sitio, es común utilizar especímenes curados en obra, esta práctica es empleada frecuentemente. Sin embargo, el resultado de los ensayos dependen de un gran número de variables⁴ que influyen en la calidad del hormigón, entre estas variables están: adición de agua mala, toma de muestras para los diferentes ensayos, moldeo inadecuado de los especímenes, mala compactación, golpes a probetas, cilindros deformables, calibración de prensa, velocidad de carga, temperatura, tipo de curado, entre otros factores que afectan de manera negativa los resultados de resistencia del hormigón. De todas formas, no se podría asegurar que todos los especímenes ensayados hayan sido curados de la misma manera en que han sido curados los elementos de la estructura a la que representan. Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón no dependen únicamente del diseño de mezcla y el moldeo de los especímenes, esta resistencia depende también de la edad y la temperatura a la cual han estado sometidas las muestras durante el proceso de fraguado, curado y endurecimiento.

⁴ El procedimiento correcto para las variables mencionadas que se deben considerar para obtener resultados confiables se sujetan a las siguientes Normas: ASTM C94 – ASTM C31 – ASTM C172 – ASTM C1231 – NTE INEN 1855 – NTE INEN 1576 – NTE INEN 1763

El método de madurez es un método sencillo que actualmente es aplicado por algunos países entre los cuales está Estados Unidos que comúnmente utiliza el método Nurse-Saul; es un método no destructivo y concede al constructor estimar resistencias del hormigón en sitio de forma inmediata a cualquier edad de una manera eficiente, reduciendo así el número de probetas que se ensayan con métodos convencionales. De esta forma se ahorra tiempo y costo evitando que estas probetas sean curadas en condiciones distintas a las reales.

1.2 Objetivos

El objetivo que se desea alcanzar con la aplicación del método de madurez es verificar la aplicabilidad del método localmente mediante la obtención de datos del historial de temperatura en diversas partes de la estructura y de manera simultánea realizar mediciones directas en obra de la resistencia del hormigón. En base a esto se ha desarrollado los siguientes objetivos.

1.2.1 Objetivo General

1. Establecer una correlación entre la Resistencia, la Temperatura y Tiempo (Edad).

2. Analizar factores que puedan influir para que el hormigón de la estructura no alcance la resistencia estimada.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Establecer una relación Resistencia-Madurez de un diseño de hormigón en el laboratorio obteniendo un historial de Temperaturas y la Resistencia a edades establecidas.
2. Estimar resistencias de muestras de laboratorios curados bajo condiciones no estándares a partir del Método de Madurez.
3. Estimar la resistencia en sitio del hormigón que permitan el comienzo de otras actividades en la construcción.
4. Corroborar que la resistencia estimada a partir de la curva obtenida con el método de madurez sea aplicable en el campo, comparándola con la resistencia obtenida en el laboratorio.

1.3 Antecedentes Generales

El hormigón posee propiedades que se dan en función del tiempo, humedad y temperatura del ambiente en que se encuentra, es por esta razón que las pruebas que deban realizarse al hormigón deben ser en condiciones normalizadas y conocidas. A lo largo de los años se han puesto en práctica varias técnicas y métodos de ensayo, pero la mayoría de estos se los realizan en laboratorios, es decir, en una condición estándar, diferente a las condiciones de obra.

Hay que tener siempre presente que las condiciones en que se realizan los ensayos no son siempre las mismas condiciones a las que estará expuesta la estructura, por lo que es necesario distinguir los resultados que se obtendrán en distintas condiciones de prueba. Además, también se debe tener en cuenta las diferencias intrínsecas de los diseños de hormigones que se investigan.

Los ensayos que se realizan, se pueden clasificar de manera general en ensayos mecánicos destructivos y no destructivos. Los ensayos no destructivos como el de esclerómetro o ultrasonido, permiten evaluar cualitativamente al hormigón en servicio, es decir, en una estructura real. A pesar que los ensayos con esclerómetro y

ultrasonido son satisfactorios, en su mayoría, estos no pueden ser utilizados a edades tempranas.

El método de madurez, es un método no destructivo que a pesar de tener décadas de haber sido expuesto y aplicado por varios países, no es muy usual en el nuestro, debido a la falta de investigación y difusión del mismo.

El método busca determinar en el laboratorio, mediante ensayos y datos de temperatura, una curva patrón de Resistencia – Madurez para cada diseño diferente de hormigón que se vaya a emplear, que pueda estimar con precisión la resistencia que el hormigón ha alcanzado, independiente de las condiciones ambientales a las que vaya a estar expuesto. Esta curva puede bien ser para estimar Resistencias a la compresión o Resistencias a la flexión. Lo interesante del método es que se puede emplear desde edades tempranas en la estructura de interés.

1.4 Aplicación Técnica

El método de madurez tiene particulares ventajas frente a otros métodos para estimar la resistencia de hormigón en obra, los demás

métodos, tanto los destructivos como los no destructivos, presentan ciertos inconvenientes; en el caso de los métodos destructivos muchos de ellos no pueden ser usados en obra cuando el hormigón se encuentra a temprana edad, lo cual no es muy factible tomando en consideración que en una obra mientras más rápido se pueda estimar la resistencia de la estructura, más rápido se podrá poner en servicio. Por otro lado, en el caso de los métodos no destructivos, se presentan otro tipo de inconvenientes, uno de los principales es que los especímenes recuperados por los laboratorios son mantenidos bajo condiciones ideales, a una temperatura y humedad constante, lo cual al final no será capaz de entregar datos cien por ciento reales, sino que por el contrario, estos resultados serán diferentes a los que se obtienen realmente en obra y su objetivo es diferente.

Comparado con otros métodos, el método de madurez resulta bastante eficiente, dado que posee una interesante ventaja frente a los demás métodos, la cual es que trabaja con el perfil de temperaturas real de la estructura de hormigón a la hora de estimar la resistencia, esto optimiza el proceso de construcción gracias a una información de resistencias más precisas en tiempo real, esto permite mejorar la productividad en obra; de la misma manera es

aplicable a nuevos métodos de sistemas constructivos y a la producción de elementos prefabricados.

Solo por dar un ejemplo, los resultados más precisos que ofrece el método de madurez permiten entre otras cosas programar con gran precisión el momento indicado para trabajos críticos tales como el desencofrado , pos-tensado, corte de juntas en el caso de pavimentos, apertura al tráfico, retiro de protecciones en clima frio, izaje, etc.

1.5 Planteamiento del Problema

Para la realización de investigaciones es importante conocer la influencia que tiene el método estudiado sobre la propiedad que se investiga. La industria de la construcción es un área de gran actividad e importancia dentro del desarrollo económico del país, adicional a esto, es uno de los sectores productivos con mayor potencial de desarrollo ya que siempre se pueden mejorar los procesos y sus efectividades a través de distintos factores, tales como, obtener ganancia en el factor tiempo para mejorar los plazos de la planificación y organización.

Se sabe que, la resistencia del hormigón a distintas edades se obtiene, generalmente, mediante ensayos normalizados a la compresión de muestras cilíndricas o cúbicas, curadas en un laboratorio mediante un proceso estándar, el cual requiere de gran trabajo y de tiempo, que a su término resulta complicado deducir la resistencia real de los elementos en obra. En las últimas décadas, varios investigadores han desarrollado procedimientos de ensayos acelerados de resistencia, de donde nace el concepto de madurez.

El método de madurez es utilizado durante la construcción como un indicativo complementario de mayor confianza en la resistencia del hormigón, reemplazando los ensayos a la compresión de muestras cilíndricas curadas en obra en las mismas condiciones de la estructura, principalmente para poder determinar a edades tempranas el mayor desarrollo de resistencia que puede tener un elemento, a causa de las mayores temperaturas generadas exotérmicamente y por el clima, respecto al proceso estándar de curado.

1.6 Propiedades del hormigón

1.6.1 Propiedades del Hormigón Fresco

El hormigón es una mezcla heterogénea, en él se presentan dos estados esenciales los cuales son el estado plástico o estado fresco y el estado endurecido. El hormigón en estado fresco es el resultado que se consigue inmediatamente después de mezclar áridos, cemento y agua, obteniéndose una masa heterogénea en el que se encuentran tres fases, la fase sólida (árido y cemento), la fase líquida (agua), y la fase gaseosa (aire incorporado). La fase sólida, a su vez, es heterogénea entre sí, ya que los áridos son de origen y tamaño variables. El hormigón fresco posee propiedades relevantes como: la trabajabilidad, la consistencia, la homogeneidad y la masa específica o densidad.

1.6.1.1 Trabajabilidad

La trabajabilidad en el hormigón fresco se define como la capacidad para ser transportado, colocado y compactado sin segregación dañina alguna, ni exudación. Además, se mide la capacidad para darle un buen acabado, un hormigón con poca trabajabilidad da como resultado superficies rugosas y antiestéticas.

Que tan trabajable sea un hormigón depende básicamente de la cantidad de agua y la granulometría de la mezcla. La trabajabilidad de un hormigón tiene que ver también con la forma y tamaño del molde y a su vez del método de compactación.

1.6.1.2 La consistencia

La consistencia es la facilidad que tiene el hormigón en estado fresco para adaptarse a una forma específica. Un hormigón satisfactorio debe rellenar cada rincón de los encofrados y cubrir perfectamente todo el acero de refuerzo que pueda tener el elemento. Para medir que tan consistente es un hormigón el método más usado a nivel mundial es el ensayo de asentamiento utilizando el cono de Abrams, este procedimiento se encuentra en casi todas las normas para el control de calidad del hormigón. La consistencia varía según la cantidad de agua de la mezcla.

1.6.1.3 La homogeneidad

A pesar de que el hormigón es heterogéneo los materiales deben estar correctamente distribuidos en toda su masa; un hormigón con la mayoría de sus agregados concentrados en una zona no cumplirá con los requerimientos para los cuales se diseñó. Sin embargo, estos deben distribuirse por toda la masa en las mismas proporciones y a esto se llama homogeneidad.

Existen muchos factores por los cuales la homogeneidad de un hormigón se puede ver afectada, la de mayor importancia es la cohesividad que se ve influenciada por el tamaño del agregado y hasta por la relación agua/cemento. Los parámetros que pueden utilizarse para comprobar la homogeneidad son, entre otros, el peso volumétrico, el contenido de aire, y la resistencia a compresión.

1.6.1.4 Masa específica o densidad

La masa específica también llamada densidad, peso volumétrico o masa unitaria en el hormigón fresco se define como la masa por metro cúbico de hormigón y es utilizada para evaluar la calidad del hormigón recién mezclado, lo que se considera de gran interés en el transcurso de una obra.

Esta propiedad se ve influenciada por la densidad del agregado, el contenido de aire y la cantidad de agua y cemento de la mezcla. Pero, cabe recalcar que un cambio en la masa específica modificará también el desempeño del hormigón en cuanto a la trabajabilidad, colocación, acabado y resistencia.

1.6.2 Propiedades del Hormigón Endurecido

Las propiedades del hormigón endurecido se alcanzan a partir del fraguado final. El hormigón endurecido se compone del agregado, la pasta de cemento endurecida y contenido de aire provocado de forma natural o por un aditivo. Entre las propiedades del hormigón endurecido más importantes se tiene:

1.6.2.1 Permeabilidad

Se define como el grado en que un hormigón es accesible a los líquidos o a los gases. El factor que más influye en esta propiedad es la relación agua/cemento. Cuanto mayor es esta relación mayor es la permeabilidad y por tanto más expuesto el hormigón a potenciales agresiones.

1.6.2.2 Resistencia

El hormigón endurecido presenta resistencia a los esfuerzos de compresión, tracción y desgaste. La más importante es la resistencia a compresión que se mide en Megapascuales (MPa) y llegan hasta 50 MPa en hormigones normales y 100 MPa en hormigones de alta resistencia. La resistencia a la tracción y al desgaste, es de gran interés en los pavimentos y se obtiene utilizando áridos muy resistentes y relaciones agua/cemento muy bajas.

La resistencia a la compresión normalmente se calcula a los 28 días de colocado el hormigón, aunque en

estructuras especiales como túneles y presas o cuando se emplean cementos especiales, pueden definirse tiempo menores o mayores a esos 28 días; en túneles es frecuente utilizar la resistencia a los 7 días o menos, mientras en presas se suele requerir a los 56 días o más.

1.6.2.3 Dureza

Es una propiedad superficial en el hormigón que cambia con el paso del tiempo debido al fenómeno de carbonatación. Un método de medirla es con el índice de rebote que proporciona el esclerómetro.

1.6.2.4 Retracción

Se define como el acortamiento del hormigón debido a la evaporación progresiva del agua absorbida. Estas pérdidas producen tensiones internas que dan lugar a las fisuras por retracción. Los factores que influyen directamente en esta propiedad son: cantidad de finos, cantidad y tipo de cemento, relación agua/cemento, dimensiones del elemento y la temperatura ambiental.

1.6.2.5 Velocidad de fraguado

El fraguado se define como el endurecimiento del hormigón causado por la cristalización de las partículas a partir de la reacción química entre el material cementante y el agua. Generalmente la necesidad de aumentar o disminuir la velocidad de fraguado depende de la estructura que se está construyendo, para lograr estos propósitos se pueden utilizar diferentes tipos de cementos o aditivos acelerantes y retardantes. El hormigón utilizado para la construcción de túneles requerirá de hormigones de fraguado muy rápido, mientras que el hormigón colocado en grandes volúmenes, como en pilotes, necesitará tiempos de fraguado prolongado mientras dure la colocación del hormigón.

CAPITULO II

2. MADUREZ DEL HORMIGÓN

2.1 Introducción

En los años sesenta, los investigadores daneses del Instituto de Tecnología de Dinamarca, P. Fresleben, Hansen y J. Pedersen, realizaron un modelo matemático y termodinámico en el que relacionaban la resistencia y la madurez del hormigón, un modelo que resultaba más conveniente que los métodos que se utilizaban en aquella época, es así como se llega al método de madurez, entendiéndose como madurez del hormigón a la velocidad con la que se hidrata el cemento.⁵

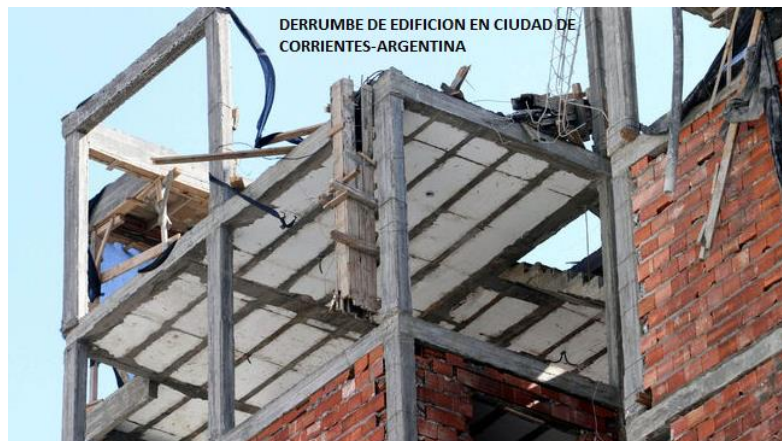
La aplicación de este método evita accidentes ocasionados por la remoción de encofrados antes que el elemento estructural alcance la resistencia suficiente para entrar en servicio. En épocas pasadas no se contaba con procedimientos o equipos que permitieran obtener la

⁵ Paper :Adecuada aplicación del control térmico y de madurez del concreto (calorimetrías del concreto) en la determinación de tiempos de desmolde y descimbre en vivienda.

Autor : Rodrigo N. Quimbay Herrera, Msc

resistencia en sitio, y se debía estimar la resistencia mediante ensayos con probetas curadas en laboratorios, es por esto que los investigadores llegaron así a la conclusión de que era necesario tener un registro continuo de la evolución de la resistencia del hormigón, cosa que hasta esa época, no era posible con los demás procedimientos.

Gráfica 2.1 Derrumbe de edificio en Ciudad Corrientes, Argentina.



Fuente: Periódico La Razón, Argentina⁶.

Con el pasar de los años se desarrollaron varios sistemas de control de calidad basados en la teoría de la madurez del hormigón ya que resultaba más confiable que otros métodos. Estos sistemas de control eran aplicados en las áreas de Producción de Hormigón de planta y en control en obra.

⁶ Diario "La Razón" Argentina 22 de marzo del 2012, Título del Artículo 6 Obreros mueren en construcción.

Es difícil curar el hormigón en una probeta y en una estructura bajo las mismas condiciones ambientales. En clima frío, la estructura se cura más lentamente, mientras que en clima cálido se cura más rápidamente y la hidratación del cemento calienta el hormigón en los moldes.

Se debe esperar los resultados de los ensayos de resistencia para asegurarse que el hormigón haya alcanzado la resistencia necesaria para proceder con las actividades en la construcción que involucre el hormigón del espécimen ensayado. Cabe recalcar, que es necesaria una manera confiable para determinar la resistencia real del hormigón en la estructura; es allí en donde entra la prueba de madurez.

La madurez del hormigón puede indicar directamente la resistencia en el lugar y, puesto que la madurez puede leerse continuamente, se podrá conocer la resistencia en tiempo real, inclusive a una edad temprana. Las pruebas de madurez del hormigón proporcionan muchos beneficios, por ejemplo:

- Pueden permitir el tráfico en las superficies de hormigón tan pronto haya sido alcanzada la resistencia necesaria.

- Los cables de pos-tensados pueden ser tensados más pronto.
- Los moldes pueden desencofrarse más rápido y con la confianza de una operación segura.
- Puede monitorearse la resistencia en ubicaciones críticas y en el hormigón más joven en tiempo real.
- Los efectos del clima frío sobre la ganancia de resistencia pueden ser monitoreados y los sistemas de calentamiento detenidos de forma eficaz.
- La reducción del tiempo de trabajo permite que los contratistas reciban su pago de forma rápida al tiempo que se reducen las horas de trabajo.
- El número de los especímenes que tienen que hacerse y probarse se reduce en gran medida.

Algunos de los sistemas ahora disponibles proporcionan datos a prueba de manipulaciones para demostrar que el hormigón ha ganado

la resistencia apropiada y que no fue sometido a temperaturas inusualmente a altas o bajas.

2.2 Concepto de Madurez del Hormigón

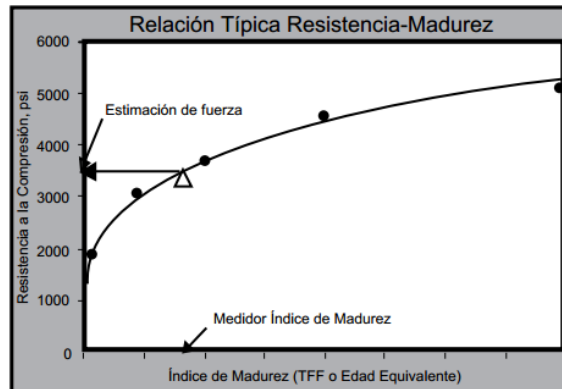
El concepto de madurez utiliza el principio de que la resistencia del hormigón está directamente relacionada con la edad y el desarrollo de su temperatura. Los métodos de madurez proveen una aproximación relativamente simple para estimar la resistencia a compresión del hormigón a edad temprana en el sitio durante la construcción.

El concepto de madurez asume que las muestras de hormigón que tenga la misma madurez, tendrán resistencias similares, independientemente de la combinación de tiempo y temperatura con la que se alcance la madurez.⁷

El índice de madurez medido en el sitio, en función de su desarrollo de temperatura y edad, es utilizado para estimar el desarrollo de la resistencia, basado en una gráfica de la relación madurez-resistencia desarrollada sobre ensayos de laboratorio para esa mezcla.

⁷ Paper: Adecuada aplicación del control térmico y de madurez del concreto (calorimetrías del concreto) en la determinación de tiempos de desmolde y descimbre en vivienda.
Autor : Rodrigo N. Quimbay Herrera, Msc

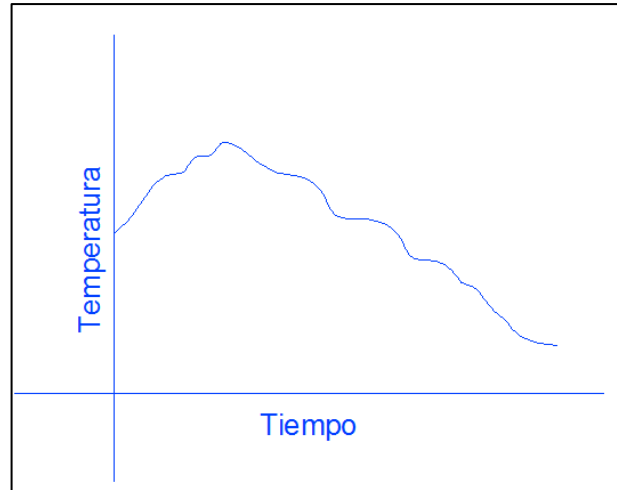
Gráfica 2.2 Relación Resistencia vs. Madurez.



Fuente: “CIP 39 MADUREZ DEL HORMIGÓN”

Autor: National Ready Mixed Concrete Association en convenio con Federación Iberoamericana de Hormigón Premezclado

Los índices de madurez se miden tomando los diferenciales de la curva tiempo-temperatura, para la obtención de esta curva se realiza un procedimiento ayudado por termocuplas (sensores de temperatura) y/u otros dispositivos diseñados para obtener estos índices, y así obtener los datos temperatura-tiempo cada hora, o según se recomiende, para después graficar dichos datos, y así obtener una curva parecida a la figura presentada a continuación.

Gráfica 2.3 Variación de la temperatura en el transcurso del tiempo

Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Para la primera parte de la curva, la temperatura se eleva desde su temperatura inicial debido al calor generado por la hidratación del hormigón al momento de agregar agua a la mezcla. En la segunda parte de la curva, el hormigón se enfría con la temperatura ambiente elevándose y disminuyendo, en gran medida dependiendo del lugar en el que se halle el hormigón. La madurez en cualquier momento es simplemente el área bajo la curva. Puede usarse dos fórmulas para calcular esta área para proporcionar un valor de madurez (un índice de madurez), la función de Arrhenius y la función de Nurse-Saúl, de las cuales se hablará detalladamente en los posteriores capítulos.

El concepto de madurez refleja el tiempo que demora un cuerpo en alcanzar ciertas características, en el caso del hormigón se puede hablar del tiempo en que este tarda en alcanzar cierta resistencia y a que temperatura lo logra. En términos más sencillos, se comprende por madurez a la velocidad con la que el cemento experimenta un proceso de hidratación en la mezcla de hormigón en función del tiempo y del historial de temperaturas del mismo.

El índice de madurez medido en sitio, se utiliza para estimar el desarrollo de la resistencia del hormigón, se obtiene mediante cálculos de laboratorio que se basan en la relación tiempo - temperatura – resistencia para determinada mezcla. Lo interesante del método es que puede aplicarse inmediatamente después de la fundición de la estructura, a diferencia de otros métodos en que no se puede tener resultados a edades tempranas, además de casos en el que el proceso de curado o la calidad del agua no estén garantizados.

2.3 Por qué utilizar un Método de Madurez

De acuerdo con las normas de construcción alrededor del mundo, los ingenieros deben garantizar que los elementos de hormigón sean estructuralmente adecuados para desempeñar la función para la que

fueron construidos, uno de los parámetros que los ingenieros deben verificar para determinar si un hormigón es satisfactorio es la resistencia a compresión simple ($f'c$), para determinar la resistencia existen varios métodos, de entre todos estos procedimientos, esta investigación resalta las bondades que resultarían de utilizar el método de Madurez para la determinación de la resistencia del hormigón, un método usado con más frecuencia en los Estados Unidos, frente a los métodos que se utilizan comúnmente en nuestro país.

El método de madurez tiene particulares ventajas frente a otros métodos para estimar la resistencia de hormigón en obra, los demás métodos, tanto los destructivos como los no destructivos, presentan ciertos inconvenientes tanto en precisión, como facilidad y costo.

En el caso de los métodos destructivos muchos de ellos no pueden ser usados en obra cuando el hormigón se encuentra a temprana edad, tal es el caso del Calado de Núcleos en el cual se utiliza un equipo de calado que tiene como herramienta de corte una broca con bordes de diamante y cuyo diámetro se cambia de acuerdo a las necesidades, así mismo posee un dispositivo que limpia la broca a

medida que está perforando y evita que la broca se sobrecaliente. Este procedimiento cuenta con grandes desventajas, ya que al momento de ensayar los cilindros calados se debe aplicar varios factores de corrección a la resistencia que se obtiene, y en caso de obtener bajas resistencia, es muy difícil determinar cuál de estos factores fue el que falló, sin olvidarse que el calado de núcleos en el hormigón deja al mismo con zonas débiles donde es muy posible que falle con el tiempo, sin contar en el elevado costo del equipo necesario para realizar este procedimiento.

Gráfica 2.4 Ensayo de Calado de Núcleos



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los autores

Por otro lado, para el caso de los métodos no destructivos se elaboran probetas de hormigón, pero tampoco arroja datos ciento por ciento

verdaderos, pues el ensayo se realiza en condiciones diferentes a las condiciones en las que se encuentra la estructura en obra, y aunque se fabriquen probetas para mantenerlas junto a la estructura, el volumen de las mismas comparado con el volumen de la estructura hará que los valores de resistencia sean distintos, ya que a mayor volumen, el hormigón libera más calor de hidratación lo que hace que desarrolle resistencia de manera diferente a las probetas, y así también se debe considerar que los especímenes son manipulados y transportados del lugar de la obra hasta el laboratorio, por ende una mala manipulación de los mismos traerá consigo valores equivocados sobre la resistencia.

Gráfica 2.5 Cilindros ensayados a Compresión Simple



Fuente: Laboratorio Insitu, Chile.

Sin embargo, cabe aclarar que los métodos no destructivos también se llevan a cabo en obra, así se encuentra el caso del Esclerómetro (medidor de durezas), que con valor de Rebote permite medir la dureza del hormigón y a pesar de ser uno de los métodos más usados a nivel mundial, es muy dependiente de quien, como y donde se lo realice, y según esto hay ciertas variaciones en los valores que arroja esta herramienta, entre los inconvenientes más frecuentes están:

Gráfica 2.6 Esclerómetro



Fuente: Direct Industry

- Si al momento de utilizar el esclerómetro, este no se encuentra perpendicular a la superficie que se quiere ensayar, el valor que arroje será menor al valor verdadero.

- Si la superficie que se va ensayar tiene alguna capa de pintura, esta amortiguara el golpe y el valor obtenido por el esclerómetro se verá afectado.

- Cabe señalar que el hormigón no es una mezcla homogénea, lo que significa que si se ensaya con el esclerómetro en un lugar donde existe gran concentración de agregados arrojará un valor mayor a que si se ensaya en otra superficie. Así mismo si se trata por ejemplo de una viga de hormigón armado, se corre el riesgo de golpear un lugar donde este una varilla de acero, lo que dará un resultado erróneo de la resistencia.

Otro método no destructivo que se utiliza frecuentemente es el Ultrasonido, el cual consiste en emitir pulsos al hormigón y de esta manera detectar fallas, tales como fisuras, ratoneras y cualquier daño. Sin embargo, los resultados que arroja este método se ven afectados si hay presencia de acero de refuerzo y si las condiciones climáticas tales como la humedad varían, sin contar que se necesita personal calificado para realizar el ensayo y el equipo es costoso.

Gráfica 2.7 Ensayo de Ultrasonido



Fuente: COTCA Asistencia Técnica, Patología y Control de Calidad⁸

Comparado con otros métodos, el método de madurez (el cual también es un método no destructivo) resulta bastante eficiente, dado que posee una interesante ventaja frente a los demás métodos, pues trabaja con el perfil de temperaturas real del hormigón en la estructura para estimar la resistencia sin la necesidad de causarle daños a la estructura como es el caso del calado de núcleos. A diferencia de este último método, la madurez permite obtener la resistencia en lugares críticos donde normalmente sería difícil llegar si se utiliza otros procedimientos; esto optimiza el proceso de construcción gracias a una información de resistencias más precisas y permite mejorar la productividad en obra.

⁸ COTCA Asistencia Técnica, Patología y Control de Calidad Ensayos Especiales y Sistemas de Instrumentación

Cabe señalar que el Método de Madurez del Hormigón trabaja con un índice de madurez, el mismo que se obtiene del historial de temperaturas desarrolladas por el hormigón y que es único para cada diseño. Por otro lado también se conoce que mientras en otros métodos es necesario tener equipos complejos costosos como la caladora de núcleos, ultrasonido, esclerómetro y/o prensas, el método de madurez necesita básicamente un sensor de temperatura y una hoja de cálculo donde almacenar los datos.

2.4 Cómo se utilizan los Métodos de Madurez

Los conceptos y métodos que se utilizan para la determinación de la relación Resistencia vs. Madurez se los encuentra en la norma ASTM 1074 bajo el título de Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method (Práctica estándar para la estimación de la resistencia del hormigón por el método de Madurez), esta práctica ofrece básicamente dos métodos para hallar dos funciones de madurez, la función de Nurse-Saúl y la función de Arrhenius.

La función de Arrhenius, asume que la resistencia se desarrolla siguiendo una relación exponencial y a diferencia del método de Nurse-Saúl, el índice de madurez se expresa en términos de una

Edad Equivalente que representa la duración equivalente de curado a una temperatura de referencia. Los instrumentos de madurez utilizados para calcular la edad equivalente se basan en valores específicos de energía de activación y las lecturas mostradas no pueden corregirse para otro valor de energía de activación adecuada del hormigón que se utiliza en el lugar, la cual puede ser muy diferente a la incorporada en el instrumento de lectura. Este método se utiliza con más frecuencia en países europeos.

Es por eso que esta investigación se enfoca en la función de Nurse-Saúl, la cual asume que la resistencia se desarrolla linealmente en función de la temperatura y el índice de madurez, el cual es expresado como un factor de Temperatura-Tiempo; así mismo este método requiere de un valor de temperatura para el cual el proceso de hidratación se detiene, conocido como Temperatura Datum, para el que la ASTM C 1074 propone un método o bien sugiere asumirla 0°C . Esta función no se recomienda cuando se prevé que el hormigón soportará un amplio rango de temperatura.

La relación de madurez de Nurse-Saúl es el producto acumulado de tiempo y temperatura. La norma brinda la siguiente ecuación para este método:

$$M = \sum(T_a - T_0) * \Delta t \quad \text{Ecuación 1. Factor Tiempo-Temperatura.}$$

Dónde:

M= Madurez (factor tiempo y temperatura) a la edad t.

T_a= Temperatura promedio del hormigón durante el intervalo de tiempo Δt .

T₀ =Temperatura Datum.

Δt = Intervalo de Tiempo

La ecuación 1 se usa para calcular el factor tiempo-temperatura. Para calcularlo, es necesario conocer el valor apropiado de la temperatura datum para los materiales y condiciones específicas. La temperatura datum puede depender de:

- El tipo de cemento,
- El tipo y dosificación de los agregados,
- El uso de aditivos que afecte el proceso de hidratación,
- El rango de temperaturas que el hormigón experimentará mientras endurece.

Esta ecuación no reconoce que la madurez aumenta desproporcionadamente a elevadas temperaturas, esto hace relativamente inexacta la ecuación para temperaturas extremas y grandes cambios de temperatura. En la mayoría de los casos se subestima la resistencia a temperaturas elevadas y se sobreestima a bajas temperaturas.

La norma ASTM 1074 recomienda para el cemento tipo GU sin aditivos y un rango de temperatura de curado de 0 a 40°C, una temperatura datum de 0°C. Para otras condiciones y cuando se desea una máxima precisión de la estimación de la resistencia, la temperatura datum apropiada puede ser determinada experimentalmente conforme los procedimientos que se indicaran más adelante. Algunos tipos de instrumentos de madurez que calculan factor de temperatura-tiempo pueden no emplear la temperatura de referencia apropiada, pero puede ser corregida por la temperatura datum como sigue:

$M_C = M_d - (T_0 - T_d) * t$ Ecuación 2. Factor Tiempo-Temperatura corregido

Dónde:

M_c = Factor tiempo-temperatura corregido. Grado-días o grado-horas,

M_d =Factor tiempo-temperatura visualizado por el instrumento, grado-días o grado-horas,

T_0 = Temperatura datum apropiada para el hormigón, °C,

T_d =Temperatura datum incorporada en el instrumento, °C,

t = Tiempo transcurrido entre lecturas, días u horas.

Básicamente el método de madurez cumple con ciertos pasos, sea cual sea la función que se utilice para determinar la función de madurez el método busca encontrar una relación entre la resistencia y la madurez, registrando el desarrollo de la temperatura de las muestras mediante termocuplas introducidas en los cilindros de hormigón o bien colocadas en los miembros de la estructura que se quiere estudiar.

Gráfica 2.8 Dispositivos para Registrar temperaturas.



Fuente: HOBO® Data Loggers, Intellirock II™ Maturity, Temperature and Measurement System, Centro Técnico del Hormigón.

Es importante que durante todo el proceso los ingenieros estén pendientes de que se cumplan con todos los estándares de calidad, por ejemplo si no existe un control en el tiempo que se deja reposar el hormigón antes de fundirlo se producirá un aumento de temperaturas descontrolado, que afectara los resultados, y que posteriormente se reflejará en los sensores de temperatura. Además, es de gran relevancia que la curva de madurez obtenida sea verificada periódicamente para detectar las posibles anomalías en la curva y/o

problemas en la estructura. La norma recomienda que para monitorear los datos que arroja el método se fabriquen simultáneamente probetas de hormigón para ser ensayadas a compresión y de esta manera comparar esas resistencias con las resistencias que arroja la curva de madurez.

A pesar de las grandes ventajas que representa utilizar el método de madurez para estimar resistencias, existen ciertas desventajas y limitaciones al momento de usar este método, las principales son:

- Las muestras con las que se trabajan en los laboratorios, para desarrollar la curva, no son del todo representativas del hormigón con el que se trabaja en obra, estos poseen diferentes propiedades como densidad, contenido de aire, etc. Por lo que no es posible aplicar este procedimiento si se está recibiendo hormigón de diferentes proveedores.
- Cuando el hormigón se enfrenta a altas temperaturas en edades tempranas, la predicción de la resistencia suele dar valores incorrectos.
- La energía de activación y la temperatura Datum son valores complejos de obtener, y a pesar que la ASTM C 1074 recomienda

asumir ciertos valores, asumir siempre estos valores pueden arrojar finalmente errores en la estimación de la resistencia.

Cabe también mencionar que la energía de activación y la temperatura Datum, son propiedades muy particulares de cada tipo de hormigón, es decir que para cada diseño de hormigón es necesario establecer nuevos valores de temperatura Datum y energía de activación. Utilizado correctamente el método de madurez, permite ahorrar tiempo y dinero, pero principalmente agilizar el proceso constructivo.

CAPITULO III

3. PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA A EMPLEAR

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el desarrollo de la metodología que se ha propuesto para la determinación de la resistencia del hormigón en obra a partir del método de madurez. Los puntos principales que se tratan tienen relación con algunas bases teóricas sobre la dependencia de la resistencia que el hormigón tiene con la temperatura que desarrolla en estado fresco y endurecido, el calor de hidratación y la transferencia de temperatura de éste al ambiente.

Se define el plan de trabajo correspondiente para la implementación del método de madurez en un pavimento que se basa en la correlación temperatura-tiempo-resistencia con el objeto de validar la metodología planteada. Para llevar a cabo la prueba se hace el estudio de variables y se evalúan los procedimientos a seguir, así como las condiciones térmicas, los materiales y la dosificación de nuestro diseño de pavimento utilizado.

Referirse al método de madurez, es hablar del proceso exotérmico, el cual permite obtener una idea más clara de la velocidad con que se llevan a cabo las reacciones químicas por medio del parámetro llamado Factor Temperatura–Tiempo o Índice de madurez. A partir del método se puede conocer la resistencia aproximada en cualquier parte de la estructura; para lograr esto es necesario calcular una curva patrón de Resistencia a la compresión versus Madurez para el diseño de hormigón específico a usar y así poder monitorear continuamente el crecimiento de la madurez en el elemento o elementos de interés.

El objetivo de este capítulo es describir el desarrollo de la metodología propuesta, tomando en cuenta que deberá poder implementarse en los procesos constructivos de cualquier parte del país. De igual manera

verificar y validar la aplicación de dicha metodología sobre un hormigón elaborado en diferentes momentos y condiciones ambientales. Se evalúan los factores que puedan influir en el desarrollo de la resistencia del hormigón, para lo cual, se parte de las bases dadas en los capítulos anteriores y las experiencias aprendidas a lo largo de la tesis. El análisis es realizado por iniciativa propia, esta investigación no se limita solo a obtener resultados sino que se explican y formulan recomendaciones de interés sobre el tema analizado.

3.2 Desarrollo analítico de la metodología.

En este subcapítulo se explica cómo se aplican principios fundamentales para la solución de problemas que se presenten y de esta forma obtener respuestas significativas en un tiempo razonable. Se plantean las ecuaciones a utilizar en la metodología, para obtener resultados en función de los principios fundamentales.

3.2.1 Calor de hidratación del hormigón

El calor de hidratación se lo define como la cantidad de calor, en unidades de caloría por gramo, que libera el cemento producido después de una hidratación completa a cierta temperatura. En el

momento en que reaccionan químicamente el cemento y agua para formar la pasta se genera calor de hidratación. Estas reacciones son simultáneas e interdependientes e intervienen algunos compuestos, tales como silicatos cálcicos (C3S, C2S), aluminato tricálcico (C3A), ferroaluminato tetracálcico (C4AF), cal libre (óxido de calcio), sulfatos alcalinos, yeso y agua. La cantidad y la velocidad con que se desprende este calor depende principalmente del tipo de cemento que vaya a usarse, siendo el Silicato Tricálcico (C3S) y el Aluminato Tricálcico (C3A) los componentes que más influyen en la generación del calor.

A pesar de que ciertos cementos pueden mantenerse emitiendo calor por varios años, la mayor cantidad de calor de hidratación se libera a edades tempranas, siendo durante las primeras 24 horas donde se registra la más alta emisión de calor. En la siguiente Tabla se presentan diferentes tipos de cemento portland y la cantidad de calor de hidratación que se produce para diferentes edades.

Tabla I: Calor de hidratación para diferentes tipos de cemento portland

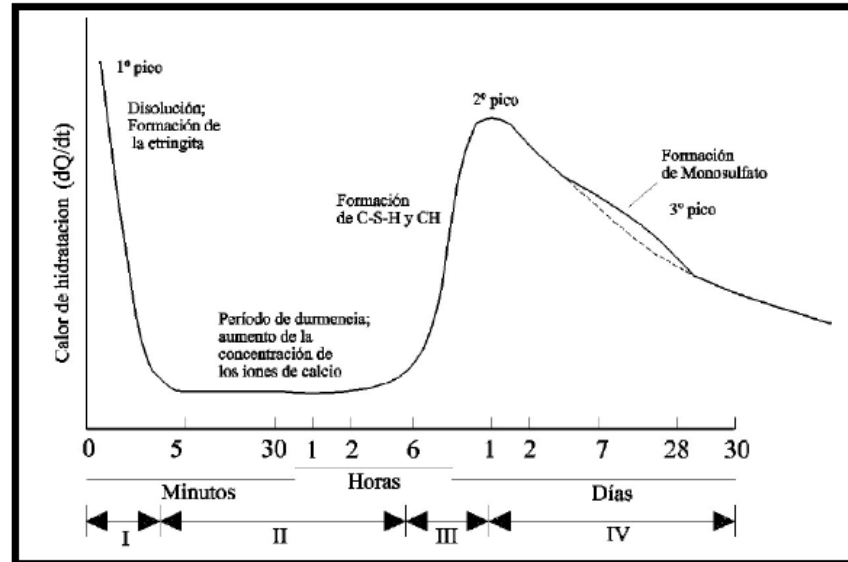
	Cemento tipo I		Cemento tipo II		Cemento tipo II– Moderado calor de hidratación	Cemento tipo III		Cemento tipo IV		Cemento tipo V
	7 días	28 días	7 días	28 días	7 días	7 días	28 días	7 días	28 días	7 días
No. de muestras	15	7	16	7	4	2	2	3	1	6
Promedio	349	400	344	398	263	370	406	233	274	310
Máximo	372	444	371	424	283	372	414	251	-	341
Mínimo	320	377	308	372	227	368	397	208	-	257
% del tipo I (7 días)	100		99		75	106		67		89

Fuente: Calor de Hidratación de Cementos Portland de los EE.UU. Seleccionados de la Década de 90, según la Norma ASTM C 186, en kJ/kg.

Elaborado por: American Society for Testing and Materials.

Una de las características más importantes del calor de hidratación es que ningún cemento es capaz de producirlo de manera constante. Como ejemplo se tiene una gráfica en donde se representa la producción de calor de un Cemento Portland Tipo I.

Gráfica 3.1 Producción de calor de un cemento portland Tipo I



Fuente: “Tiempo de Fraguado del Hormigón” Facultad Regional de la Plata

Elaborado por: María Anabela Galabec

En la gráfica se muestra las distintas etapas de producción de calor, así se tiene:

Primera etapa: Este primer pico se debe la liberación de calor generado por los compuestos como el Silicato Tricálcico (C3S) y el Aluminato Tricálcico (C3A).

Segunda Etapa: Luego de nuestro primer pico, viene una etapa de poca reactividad que tiene que ver con el tiempo de fraguado inicial, y se le conoce generalmente como periodo de inducción.

Tercera Etapa: Durante esta etapa aparece un segundo pico, esto indica que el endurecimiento de la pasta ha comenzado, esta etapa se debe principalmente a la hidratación acelerada por el Silicato Tricálcico (C3S).

Cuarta Etapa: Aparece finalmente un tercer pico en la producción de calor, que indica una desaceleración en la hidratación.

Quinta Etapa: La etapa 5 es lenta, caracterizada por la formación estable de productos de hidratación, estabilizando la tasa de aumento de resistencia a edades avanzadas.

En el método de madurez expuesto en esta investigación, el calor de hidratación resulta una característica importante, básicamente debido a que este método se basa en la resistencia

que se deriva de la hidratación del cemento, el cual da como resultado el calor de hidratación y que al ser medido correctamente puede servir para estimar la resistencia del hormigón. El calor de hidratación se ensaya según las normas ASTM C 186.

3.2.2 Influencia De Los Factores Externos

Cuando se realizan los ensayos en laboratorio se lo realiza en condiciones ideales, pero cuando se trabaja con el hormigón en condiciones reales, el desarrollo de temperatura es más complejo y existen factores externos que afectan la calidad del hormigón, influyendo principalmente en el proceso de hidratación. Entre los factores externos más críticos que se pueden encontrar están el volumen de hormigón, temperatura ambiental, humedad relativa, superficie de transmisión de calor, conductividad del hormigón, aislamientos, etc.

El problema para la obtención del historial de temperatura y la distribución de la misma en la estructura del hormigón se encuentra al momento de relacionar la temperatura inicial, el historial de temperatura y la transferencia de calor entre el

hormigón y el medio ambiente. La temperatura inicial del hormigón va a depender de la temperatura que tengan sus componentes al momento de ser mezclados. El flujo de calor entre el hormigón y el medio ambiente es verificado a través de la conducción térmica y de gradientes térmicos.

De manera general, el hormigón posee un valor relativamente bajo de conductividad, lo que hace que el calor se transfiera muy lentamente, a diferencia de los metales y el acero que poseen valores relativamente altos de conductividad, lo que hace que el calor se transfiera muy rápidamente.

En este trabajo se analizarán también las pérdidas de resistencia del hormigón en obra, medidas a través de probetas cilíndricas, por lo tanto, se analizará el historial térmico en probetas cilíndricas, las cuales estarán influenciadas por las mismas condiciones ambientales de la estructura (factores externos).

3.2.3 Temperatura Ambiente

Cuando el hormigón se somete a altas temperaturas, aparecen micro y macro fisuras que terminan por ser preocupantes ya que afectan significativamente la estructura, estando la magnitud de las mismas en función de la temperatura alcanzada, la dosificación del hormigón y el tiempo que se expuso al hormigón a ciertas temperaturas.

Básicamente la principal desventaja de que el hormigón se someta a altas temperaturas es la evaporación del agua de la dosificación, si no se toman medidas para evitar la misma se corre el riesgo de causar daños irreversibles en la calidad.

Una de las medidas para minimizar estos efectos es el empleo de agua fría en la mezcla; así mismo como se toman precauciones antes y durante la mezcla, también se debe considerar los efectos de las altas temperaturas en el hormigón ya colocado, este debe protegerse del sol, buscando a través del curado que el hormigón no pierda su humedad.

Así también si se considera que aparte de altas temperaturas el hormigón está sometido a la acción del viento, las consecuencias se agravan principalmente por que el viento causa un agrietamiento plástico causado por un desecamiento en la parte superior del hormigón fresco, un efecto que normalmente se lo amortigua cubriendo el hormigón, los moldes y encofrados que estén sometidos a altas temperaturas es recomendable rociarlos con agua a la más baja temperatura posible.

Por otro lado se tiene un hormigón colocado en un clima frío, a través de ensayos se ha determinado que cuando un hormigón está sometido a climas fríos en sus edades tempranas o durante su fraguado, no alcanzara la resistencia necesaria para la cual se diseñó, esto ocurre principalmente debido a que retarda o en algunos casos anula el proceso de endurecimiento al afectar la velocidad de hidratación del cemento en la mezcla; estos efectos se hacen más peligrosos cuando el hormigón se ve inmerso en un clima frío y aún no ha alcanzado un resistencia de 8 N/mm^2 , por lo que es recomendado suspender el hormigonado si se sospecha que en las 48 horas posteriores

al hormigonado la temperatura descenderá a menos de 0°C y si los moldes o encofrados tienen una temperatura menor a 3°C.

Cuando la colocación del hormigón en el clima frío es inevitable, se recomienda que se hagan cambios en la dosificación del hormigón, buscando la relación agua cemento más baja y obtener un hormigón lo más seco posible, ya que mientras más agua contenga el hormigón existe más peligro que el hormigón fresco se congele y que sufra problemas de y de la misma manera tomando en cuenta que sería muy apropiado la utilización de cementos de alta resistencia, aislantes térmicos, aditivos anticongelantes y considerar que los hormigones frescos sometidos a bajas temperaturas presentan tiempos de fraguado más prolongados y por lo tanto se debe esperar más tiempo antes de retirar los moldes o encofrados; de todos modos, en ciertos casos en los que el hormigón se ha visto sometido a heladas, se recomienda hacer ensayos en el hormigón endurecido para conocer la resistencia que se ha alcanzado verdaderamente.

3.2.4 Temperatura Del Hormigón

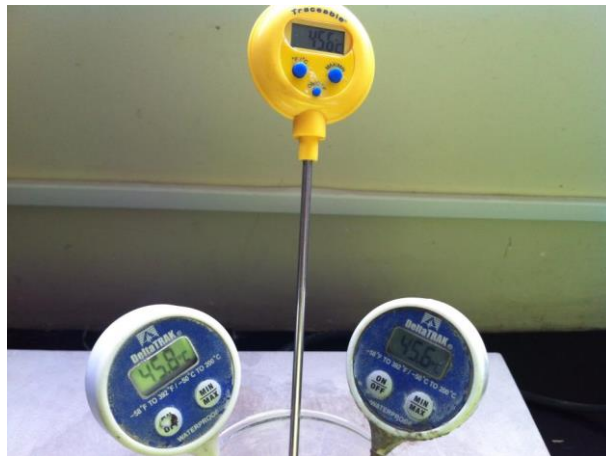
La temperatura del hormigón juega un papel fundamental en las propiedades del mismo, las cuales se ven seriamente afectadas si hay variaciones drásticas en la temperatura, es por esto que la temperatura del hormigón es uno de los parámetros que deben ser medidos y controlados por los profesionales sea cual fuere la estructura que se está construyendo.

Como se vio en capítulos anteriores, el índice de Madurez depende totalmente del desarrollo de la temperatura, es por esto que es importante ahondar en las características que puede desarrollar un hormigón de acuerdo a la temperatura que experimente la mezcla.

Una vez que se ha comenzado con la fabricación del hormigón, mezclando todos sus componentes, es necesario controlar la temperatura del hormigón, para este propósito la investigación se basa en la norma ASTM C1064 / C1064M - 12 Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete, que se traduce como Método Estándar para Temperatura de Cemento Hidráulico Fresco.

En esta norma se especifica tomar una muestra representativa del hormigón, la cual se colocará en un recipiente no absorbente previamente humedecido e introducir el termómetro, asegurándose que se sumerja mínimo 3 pulgadas de hormigón fresco, la norma señala que se debe asegurar que el termómetro se cubra con 3 pulgadas de hormigón fresco en todas sus direcciones. El termómetro debe permanecer en el hormigón por al menos 5 minutos o hasta que la lectura de temperatura se estabilice.

Gráfica 3.2: Termómetros Digitales



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Este ensayo debe realizarse dentro de los 5 primeros minutos luego de tomar la muestra. El propósito de este ensayo es detectar con anticipación alguna anomalía con la mezcla, esto es, si se encuentra con una mezcla demasiado caliente, es señal de que las propiedades de ese hormigón no se desarrollaran de manera normal y es una señal de alerta para que los profesionales identifiquen posibles errores en la dosificación y/o condiciones climáticas. Si por otro lado se tiene un hormigón con temperaturas por debajo de los 10°C este tendrá una hidratación muy lenta.

Sin embargo, no solamente es necesario controlar la temperatura en la pasta de cemento, también es importante que el hormigón endurecido se mantenga hidratado y a una temperatura controlada si es que se busca desarrollar todas las propiedades para las cuales fue diseñado, es por esto que se pone en práctica el curado inmediatamente después de que el hormigón ha fraguado.

El Curado del Hormigón consiste en hidratarlo de tal manera que se sature, cuando el agua y el cemento entran en contacto se empieza a elevar la temperatura, realizando un curado correcto se puede evitar que el agua de la mezcla escape debido a la

evaporación. Mantener una temperatura adecuada en el hormigón fresco también supone obtener una consistencia más trabajable, en estudios se ha observado que hormigones a temperaturas mayores a 20°C tienen revenimientos más pequeños en comparación con los que se mantienen a otras temperaturas más bajas, muchas veces se piensa que la solución a esta situación es agregar más agua a la mezcla para que así sea más manejable, sin embargo agregar más agua a la mezcla se traduce posteriormente en problemas de resistencia. Para mantener una temperatura en el hormigón óptima y permitir que la resistencia se desarrolle favorablemente se aplican los siguientes métodos de curado más frecuente:

- Inmersión
- Rociar agua sobre la estructura permanentemente
- Utilización de químicos con pinturas impermeables
- Cubrir el hormigón con una franja de plástico humedecido.
- Membranas de curado que consisten esencialmente en ceras y resinas

Los profesionales recomiendan curar el hormigón como mínimo 7 días o hasta se alcance el 70% de su resistencia la compresión.

Gráfica 3.3: Curado Húmedo



Fuente: Surface Treatment & Curing Compounds, Krishna Colour, Indiamart

La ASTM le dedica tres normas al tema del curado del hormigón, estas normas son la ASTM C31-03 Method of Making and curing concrete test specimens in the field (Método de fabricación y curado de especímenes de hormigón realizados en campo), la norma ASTM C 156-02 Method for Water Retention by Concrete Curing Materials (Método para retención de agua para materiales a través del curado del hormigón) y la norma ASTM C 192-02 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (Práctica estándar para fabricación y curado de especímenes en el laboratorio).

3.3 Metodología a implementar

En este capítulo se analizan los medios y recursos que se utilizaron en este proyecto, es decir el conjunto de acciones que fueron necesarias para alcanzar los objetivos propuestos anteriormente. En este capítulo se incluirán todos los procesos y herramientas que son necesarios para obtener las variables tales como:

- Temperatura
- Resistencia a la compresión
- Tiempo de Fraguado
- Índice de Madurez
- Temperatura Datum
- Resistencia por método de madurez

Todos los procesos que se utilizaron fueron llevados a cabo siguiendo códigos tales como las normas INEN y ASTM, entre estos procesos se tienen los siguientes:

- ASTM C1074–11 Método Estándar para la estimación de la resistencia del hormigón por el método de madurez

- ASTM C42–13 Método de Ensayo Normalizado para la Obtención y Ensayo de Núcleos Perforados y Vigas Aserradas de Hormigón
- NTE INEN 488 Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de cubos de 50mm de arista.
- NTE INEN 1 573 Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Compresión de especímenes cilíndricos de Hormigón de Cemento Hidráulico.

A continuación en los siguientes subcapítulos se explicara de manera clara la aplicación de los procesos antes mencionados que ayudaron a obtener los resultados necesarios para cumplir con los objetivos expuestos.

3.3.1 Variables estudiadas y procedimiento a evaluar.

En una investigación fundamentalmente lo que se busca es establecer una comparación entre variables de estudio, para de esta manera obtener conclusiones sobre un determinado tema. Determinar y especificar las variables que serán estudiadas es de suma importancia en una investigación, establecerlas

correctamente permite que se comprenda mucho mejor cual es el propósito del trabajo.

Esta investigación presenta variables para evaluar los resultados obtenidos con el Método de Madurez del Hormigón, como se describió en capítulos anteriores se aplicaron varios conceptos relacionados con la temperatura del hormigón de las cuales se derivan prácticamente la mayoría de las variables a analizar, partiendo de estas variables se ha procedido a establecer 2 grupos básicos, un grupo reúne a las variables dependientes o variables de salida y el otro a las variables independientes o variables de entrada.

Se ha considerado como variables dependientes a las propiedades a evaluar, para las cuales se realizaron diversos procedimientos y ensayos en las que intervinieron otras variables a fin de analizar las características del hormigón o bien fueron obtenidas de ecuaciones establecidas, entre estas variables se tienen las siguientes:

- Índice de Madurez
- Resistencia
- Temperatura Datum
- Tiempo de Fraguado

Nuestro segundo grupo está compuesto por las variables independientes, las cuales fueron medidas directamente, es decir no fue necesario aplicar ninguna ecuación, sino que se obtuvieron mediante instrumentos de medición tales como termómetro, higrómetro, cono de Abrams, Olla de Washington y/o balanza electrónica.

- Temperatura de Hormigón
- Humedad del Ambiente
- Asentamiento
- Contenido de cemento
- Contenido de Aire
- Temperatura del Ambiente

Estas variables, tanto dependientes como independientes, serán objeto de análisis con el fin de confirmar que los resultados

obtenidos mediante los ensayos son coherentes y similares a los datos esperados. Este análisis se apoya en algunas herramientas tales como Tablas de datos, graficas, correlaciones y ecuaciones ya establecidas en los diferentes códigos y normas.

La resistencia del hormigón es función principal del desarrollo de la madurez, ya que generalmente las condiciones de curado (temperatura y humedad) determinan el proceso de hidratación del cemento; debido a esto es posible correlacionar mediante un modelo matemático la resistencia en función de la madurez. El poder conocer la evolución de la resistencia del hormigón en obra se convierte en una posibilidad real mediante la verificación del desarrollo de madurez, esto permite llevar un control de calidad adecuado y optimizar los procedimientos involucrados, desde el diseño hasta el curado y manejo del hormigón.

3.3.2 Dosificación del hormigón

Una dosificación de hormigón consiste principalmente en darle al hormigón las proporciones adecuadas entre sus componentes para que alcance las propiedades requeridas, los componentes de una dosificación de hormigón son el cemento, agua, agregados y

en ciertos casos aditivos. Básicamente al momento de realizar una dosificación, debe basarse en aspectos tales como la resistencia, la consistencia y los agregados que se utilizarán.

Existen ciertos factores los cuales juegan un papel muy importante cuando se habla del hormigón, y son aspectos a los cuales se les debe prestar mucha atención, ya que, las deficiencias en los mismos pueden causar a largo plazo terribles problemas en el hormigón. Entre los factores más relevantes se tienen los siguientes:

- **Relación Agua/Cemento.**

Si hay una propiedad a la cual se debe poner especial atención esta es la relación agua cemento, cuando el cemento y el agua se unen reaccionan químicamente y forman una pasta que sirve como ligante para los agregados. La tecnología del hormigón presta especial atención a esta característica, por lo general una relación agua/cemento alta se traduce en un hormigón con una buena trabajabilidad, sin embargo esto no siempre es recomendado ya que una relación agua cemento alta provoca deficiencias en las resistencias.

- **Aditivos.**

Entre los más importantes están:

Inclusores de Aire

Retardantes

Acelerantes

- **Tamaño y Forma del Agregado**

Cuando el hormigón se dosifica con áridos con formas y tamaños inadecuados resulta en una disminución significativa de la resistencia, que para ser compensada se debe utilizar mayor cantidades de cemento lo cual aumenta el costo final de la obra. Existen parámetros importantes a la hora de escoger el tipo de agregados a continuación en una Tabla se muestra como se afecta a la resistencia cuando uno de los factores mencionados se aumenta.

Tabla II: Relación Dosificación vs Trabajabilidad y Resistencia.

Aumentando	Trabajabilidad	Resistencia
Porcentaje de finos	Aumenta	Disminuye
Agua	Aumenta	Disminuye
Tamaño del Agregado	Disminuye	Aumenta
Contenido de Aire	Aumenta	Disminuye

Fuente: Universidad Castilla-La Mancha/ Hormigones.
Elaborado por: Jiménez Montoya, García Messenguer, Morán Cabré.

Cuando se dosifica un hormigón se resaltan ciertos aspectos que pueden considerarse como pasos a seguir. Así se tiene.

- Escoger la resistencia para el hormigón de acuerdo a la obra en la que se vaya a trabajar
- Se escoge que tipo de cemento se vaya a usar basándose principalmente en el clima.
- Determinar una relación agua cemento adecuada que proporcione un equilibrio entre consistencia y resistencia

- Determinar qué tipo de agregado se necesita, de acuerdo a la consistencia que se requiera en el hormigón y su disponibilidad.

- Finalmente siempre se recomienda realizar pruebas para comprobar que la consistencia obtenida es la que requiere en la obra.

La dosificación para todos los ensayos realizados fue la que se describe en la siguiente Tabla:

Tabla III: Dosificación del Hormigón utilizado en la investigación.

MATERIAL	PESO (KG/M3)
Cemento	455
Piedra #67	517
Piedra #78	345
Arena Río	615
Arena Trit.	264
Agua	180
Aditivos	
Sikament MR (0.8%)	3.6
Sikament N100 (0.6%)	2.7

Fuente: Holcim. Planta San Eduardo.
Elaborado por: Los Autores

Este diseño con código 10020371 de Holcim Planta San Eduardo pertenece a un pavimento con un módulo de rotura igual a 4.5 MPa a los 28 días y un revenimiento en obra de 10 centímetros.

3.3.3 Procedimiento para prueba en laboratorio y campo

Prueba en laboratorio

Se requiere establecer la relación resistencia-madurez de la mezcla en el laboratorio y registrar la historia de temperatura del hormigón. El procedimiento para establecer esta relación es el siguiente:

1. Se prepara la muestra con el diseño a utilizar en obra
2. Elaborar 12 cilindros de hormigón
3. Se insertan 2 termocuplas a 2 cilindros, una a cada cilindro.
A continuación, se conecta el dispositivo que debe medir las temperaturas, el cual debe ser previamente programado para tomar lecturas cada ½ hora.
4. Se procede a llevar al cuarto de curado todos los cilindros que se ensayarán para obtener Resistencia a la

compresión a edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días según la norma ASTM C39. Los cilindros con el dispositivo no se ensayaran, se utilizan solo para registrar el historial de temperaturas.

5. Por cada edad de ensayo se registra el índice de madurez, este índice de madurez se lo calcula con el historial de temperaturas que almacena el dispositivo de acuerdo a las ecuaciones de la norma ASTM C1074. También se debe calcular una “Temperatura datum” (Temperatura debajo la cual se asume que el proceso de hidratación cesa) que servirá para el cálculo del índice de madurez.
6. Se procede a graficar los datos de las Resistencias como función de los valores de Índice de madurez y a trazar la curva que mejor se ajuste a los datos. Esta curva resultante es la relación Resistencia Vs. Madurez que será utilizada para estimar las resistencias del hormigón curado bajo otras condiciones de temperatura.

Si se puede conocer las características de ganancia de resistencia de un hormigón a través de la curva patrón de

Resistencia vs. Madurez, para hormigóns con el mismo diseño de mezcla, es posible estimar el potencial de resistencia del hormigón estudiado basándonos en la evolución de su madurez.

Dos mezclas con la misma relación agua-cemento y de características similares que se curan a diferentes temperaturas, pueden obtener valores de resistencia y madurez iguales a diferentes tiempos.

Prueba de Campo

Es posible monitorear el desarrollo de madurez, en obra, de una estructura para verificar el potencial real de resistencia del hormigón colocado, tomando en cuenta sus dimensiones; examinar el desempeño del hormigón; realizar actividades críticas de obra lo más rápido posible, tales como el desmolde, tensionamiento de cables de pre-esfuerzo o el retiro y rotación de formaletas; se puede evaluar la influencia que tiene en la estructura los diferentes métodos de curado; verificar que los resultados de los especímenes de prueba sean representativos

respecto al hormigón colocado en la estructura; controlar el incremento adiabático de temperatura en hormigóns masivos; disminuir riesgos de fisuración del hormigón por causa térmica, entre otros.

El procedimiento a seguir en obra es el que se presenta a continuación:

1. Colocar los sensores en lugares de la estructura que son críticos en términos de las condiciones de exposición y los requisitos estructurales, tan pronto como se funda la estructura, el dispositivo debe colocarse de tal manera que este rodeado de hormigón y no en contacto directo con ningún elemento metálico o cualquier otro elemento que este parcialmente expuesto al ambiente.
2. Se conectan los sensores al instrumento de madurez a utilizar y este se activa tan pronto como sea posible, se debe utilizar la misma "temperatura datum" calculada en la prueba preliminar y la toma de lectura debe ser también cada $\frac{1}{2}$ hora.

3. Cuando se requiera estimar la resistencia en el lugar crítico donde se instaló el sensor, se debe leer el índice de madurez que muestra el dispositivo o calcularlo con el historial de temperaturas y luego utilizando la curva Resistencia Vs. Madurez elaborada en la prueba preliminar en laboratorio, se procede a estimar la resistencia alcanzada para ese índice de madurez.

Antes de proceder con alguna operación crítica que se base en la resistencia estimada por la madurez del hormigón se debe realizar otra prueba para verificar la curva y asegurar que el hormigón en la estructura tiene la Resistencia potencial requerida. Para lo cual se necesitan 12 cilindros con la misma muestra que se utilizó para la fundición en obra y que se ensayaran en el laboratorio a las edades requeridas.

Determinación De La Temperatura Datum

El ensayo requerido para determinar experimentalmente la temperatura datum puede ser realizado usando cubos de

Mortero, los resultados que se obtienen ensayando el mortero pueden ser aplicados al hormigón, principalmente lo que se busca es establecer una relación entre la resistencia, la edad y la temperatura a la que se curaran los cubos de mortero.. por lo general se debe curar los cilindros en baños a tres temperaturas, estas temperaturas pueden ser escogidas de acuerdo a las condiciones en las que se espera pueda estar sometido el hormigón. La Norma ASTM C 1074 indica seguir el siguiente procedimiento para el cálculo de la temperatura datum.

1. Se necesita tamizar el hormigón con el que se va a trabajar por el Tamiz N°4 para obtener el mortero, este tamizado se realiza para separar el agregado grueso de la mezcla
2. Deben medirse los tiempos de fraguado iniciales y finales. Para ello preparar tres probetas de mortero, colocar cada probeta a la temperatura correspondiente y se procede a realizar el ensayo de tiempo de fraguado mediante el Penetrometro.

3. El siguiente paso es moldear tres conjuntos de cubos de mortero de 50x50x50mm con 18 cubos por conjunto. Moldear los cubos y colocar cada conjunto en un baño a la temperatura correspondiente.

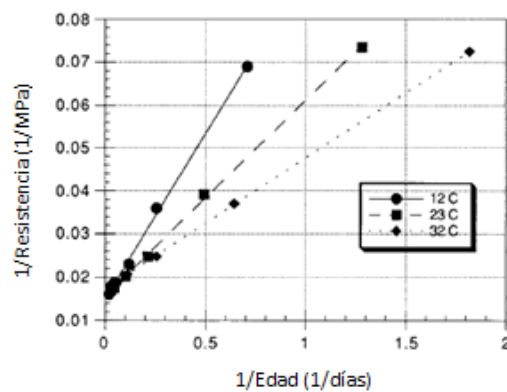
4. Para cada conjunto de cubos, determinar la resistencia a compresión de tres cubos a una edad que es aproximadamente dos veces el tiempo de fraguado final. Realizar las pruebas subsiguientes de tres cubos de cada conjunto a edades que son aproximadamente dos veces la edad de los ensayos anteriores. Por ejemplo, si el tiempo del primer ensayo fue de 12 horas, los sucesivos ensayos de resistencia a compresión serían realizados a 1, 2, 4, 8, 16 y 32 días.

5. Los datos obtenidos luego de ensayar los cubos y sus respectivas edades son analizados para definir el valor K que relaciona la resistencia con la temperatura de curado.

6. Para obtener el valor k se debe conocer los tiempos de fraguado final. Se dibuja un gráfico con la inversa de la

resistencia como eje y, y la inversa de la edad como el eje x. Para cada temperatura de curado se traza el inverso del promedio de resistencias de un grupo de cubos por edad vs el inverso de la edad. intersección de la mejor línea recta de ajuste a través de los datos para cada temperatura de curado. Para cada línea recta, dividir el valor de la intersección por el valor de la pendiente. Estos cocientes son los valores K que son usados para calcular la temperatura dato.

Gráfica 3.4: Inversa de la Resistencia vs. Inversa de la Edad

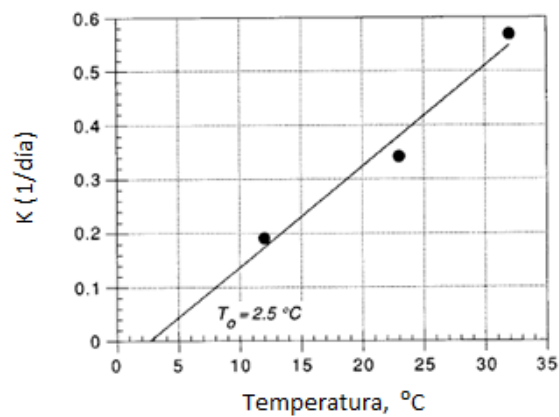


Fuente: Norma ASTM C 1074 – 12

7. Determinación de la temperatura datum

Se grafican los valores K vs la Temperatura en la que se curaron los cubos de mortero. Luego, se busca la mejor línea recta de ajuste por los tres puntos y la intersección de ésta línea con el eje de temperatura es la temperatura datum, t_0 que es usada en el cálculo del factor tiempo.

Gráfica 3.5: Ejemplo de un Gráfico de Valores K



Fuente: Norma ASTM C 1074 – 12

3.4 Secuencia, procedimiento y protección de especímenes en laboratorio.

Una vez dosificado el hormigón, se comenzó con el proceso para la fabricación tanto de las probetas de hormigón para la obtención de datos de temperatura como para cálculo de índice de madurez, el mortero equivalente para el ensayo de tiempo de fraguado y

temperatura Datum, y el paño de pavimento para la simulación en obra.

3.4.1 Proceso para Fabricación de Probetas de Hormigón (Calculo de Índice de Madurez).

Como primer paso para la fabricación de probetas se trabajó la dosificación de hormigón expuesta en el capítulo 3.3.2, obteniéndose la muestra del Mixer N°485 procedente de Holcim Planta San Eduardo con guía 000206122, siendo un volumen aproximado de 40 litros. El número de probetas de 10x20 cm que se fabricó fue de 22 las cuales tenían la siguiente distribución:

- 10 probetas para curado en laboratorio con código 23497 y las siguientes secuencias:

Tabla IV:
Secuencia de las Probetas a edades que deben ser Ensayadas en laboratorio

Secuencia	Edad (días)
1-2	1
3-4	3
5-6	7
7-8	14
9-10	28

Fuente: Norma ASTM C 1074 – 12
Elaborado por: American Society for Testing and Materials.

- 10 probetas para curado en obra con código 23498 y las siguientes secuencias:

Tabla V: Secuencia de las Probetas a edades que fueron ensayadas en campo.

Secuencia	Edad (días)
1-2	1
3-4	3
5-6	7
7-8	14
9-10	28

Fuente: Norma ASTM C 1074 – 12

Elaborado por: American Society for Testing and Materials

- 1 probeta para registrar temperaturas bajo curado estándar.
- 1 probeta para registrar temperaturas en condiciones de obra.

Los moldes para la toma de muestras fueron de 100x200mm y se basa en que el tamaño máximo del agregado no debe ser mayor a un tercio del diámetro del cilindro.

El moldeo de especímenes se llevó a cabo de acuerdo a la norma NTE INEN 1 576:2011. Los moldes para la elaboración de especímenes para ensayo de hormigón deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 470, el cual señala que los mismos deben ser rectos manteniendo su perpendicularidad con la base, y de material no absorbente. Los cilindros deben ser llenados en dos capas en cada una de las cuales debe darse 25 inserciones con una varilla metálica cuyo diámetro depende del diámetro del cilindro.

Grafica 3.6: Elaboración de Especímenes



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Tabla VI: Requisitos para el diámetro de la varilla de compactación

Diámetro del cilindro o ancho de la viga (mm)	Diámetro de la varilla (mm)
< 150	10 ± 2
≥ 150	16 ± 2

Fuente: Norma INEN 1576 Elaboración y curado de especímenes para ensayo.

Elaborado por: Instituto Nacional Ecuatoriano Normalización Norma INEN 1576

Siendo en nuestro caso el diámetro de los cilindros 100mm se usó una varilla de 10mm.

Una vez terminados de moldear los 22 cilindros, se procedió a dejar 10 cilindros en la intemperie cubierto con una capa de plástico y una toalla para evitar la pérdida de humedad, junto con estos se incluyó un cilindro el cual fue moldeado con una termocupla (termopar) tipo T la cual registra la temperatura, en nuestro caso la termocupla fue programada para registrar la temperatura cada 30 minutos. Esto se hizo para simular las condiciones de obra, siendo así los cilindros se rociaban con agua una vez al día durante los 28 días.

Gráfica 3.7: Cilindros en Obra



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

El mismo procedimiento se realiza para los 11 cilindros restantes, con la única diferencia de que estos son dejados inmersos en agua con cal, a una temperatura normalizada de 23 ± 2 °C hasta la edad de rotura, según el curado estándar.

Gráfica 3.8: Curado Estándar de Especímenes



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

3.4.2 Mortero equivalente (Ensayo de tiempo de fraguado y Temperatura Datum).

El mortero equivalente se obtiene mediante tamizado húmedo, el cual se lo realiza con el tamiz No. 4⁹, se vierte el hormigón sobre este tamiz teniendo cuidado de que la cantidad que se vierta no supere el espesor del árido grueso, se agita el tamiz con la mano o vibrándolo hasta que todo el material fino caiga, luego se recoge el mortero que pasa a través del mismo y se desecha el agregado grueso retenido, sin limpiar el mortero adherido en el mismo. De

⁹ Tamiz No. 4 es el tamiz que separa las gravas de las arenas

aquí cabe señalar que se hizo para dos procesos, uno para tiempo de fraguado y otro para temperatura datum.

- **Tiempo de Fraguado**

Como un requisito para obtener la temperatura Datum de nuestro diseño se debió determinar el tiempo de fraguado del mortero equivalente a tres diferentes temperatura. En nuestro caso las temperaturas fueron 18°C, 25°C y 50°C.

Para el ensayo del tiempo de fraguado, se moldeo una viga de acuerdo a la norma NTE INEN 1 576:2011.

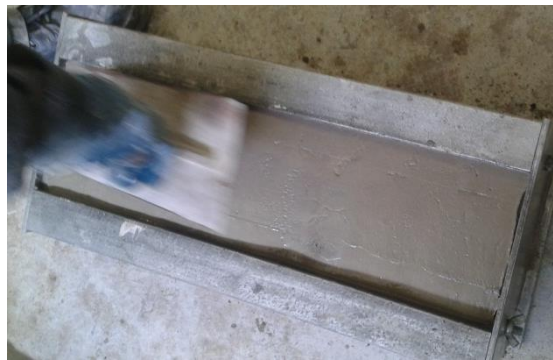
Gráfica 3.9: Moldeo de Viga



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Para las temperaturas de 18°C y 25°C se siguió el mismo procedimiento, sin embargo para el caso del hormigón que debía permanecer a 50°C se utilizaron moldes más pequeños debido a que el espacio del horno donde permanecerían era limitado.

Gráfica 3.10: Moldeo de Viga



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Grafica 3.11: Moldeo de Viga para T= 50°C



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Una vez terminada nuestras vigas de mortero equivalente, se las dejó en habitaciones diferentes a las temperaturas mencionadas anteriormente, usando un horno industrial para el caso de 50°C.

Grafica 3.12: Vigas en horno a T= 50°C



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

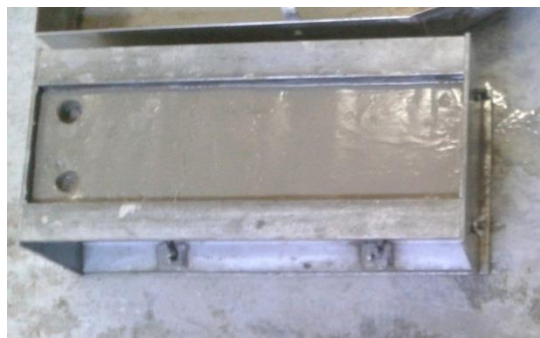
El equipo para determinar la resistencia a la penetración posee un sistema hidráulico o de resorte con capacidad de hasta 220 lbs cuya función es ejercer la fuerza de penetración.

El ensayo consistió en introducir agujas de diámetros 1", ½", ¼", 1/10", 1/20", 1/40", a una profundidad de 1", las cuales están conectadas a un resorte y que registran la fuerza necesaria para

que penetrar la profundidad antes mencionada. El cambio de aguja se realizaba cuando la fuerza era alrededor de 80lbs.

Se debe colocar el recipiente sobre una superficie plana y libre de vibraciones. Se anota la hora de moldeo, la hora de cada medición y la fuerza medida para penetrar el hormigón.

Grafica 3.13: Toma de lecturas de penetración

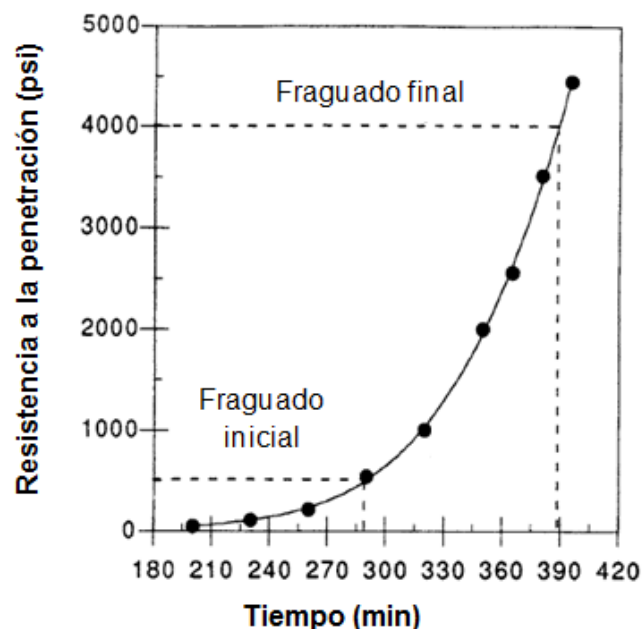


Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores.

La resistencia a la penetración se calcula dividiendo la fuerza para penetrar el hormigón para el área de la sección transversal de la aguja utilizada, los valores obtenidos se redondean.

Se gráfica el tiempo transcurrido para la resistencia a la penetración; el tiempo de fraguado inicial es aquel que transcurre hasta que la resistencia llegue a 498 psi equivalente a 3.4 MPa y el fraguado final aquel que transcurre hasta que la resistencia llegue a 3983 psi equivalente a 27.5 MPa.

Grafica 3.14: Grafica Resistencia a la Penetración vs. Tiempo
(Nota: no se encuentra a escala real)



Fuente: ASTM C403M-08

- **Temperatura Datum**

Una vez obtenido y remezclado el mortero equivalente, se moldeó 18 cubos para cada edad, siendo en total 54 cubos, moldeados según la norma NTE INEN 488.

Grafica 3.15: Moldeo de Cubos de Mortero de 50x50x50mm para Temperatura Datum



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Después que se terminó de moldear los cubos se los dividió en tres grupos de 18 cubos y se los protegió con plástico para evitar la pérdida de humedad.

Grafica 3.16: Cubos de Mortero Endurecido



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores.

Luego que el mortero de los cubos ya ha fraguado, se procedió a desmoldar y a dividirlos en tres grupos, cada grupo se sumergió en un baño de agua, a una temperatura igual a las que se obtuvieron los tiempos de fraguado (18 ° C, 25 ° C y 50 ° C).

Grafica 3.17: Cubos de Mortero curados a 25°C



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Grafica 3.18: Cubos de Mortero curados a 50°C



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Finalmente estos cubos eran ensayados a la compresión a edades iguales al doble de la edad anterior de rotura, siendo la primera edad de rotura igual al doble del tiempo final de fraguado para la temperatura correspondiente tal como se explicó en capítulos anteriores. Se debían ensayar 3 cubos por edad, siendo al final 6 edades en total. A continuación se presenta una Tabla con la secuencia de los cubos, esta se aplica para las tres temperaturas:

Tabla VII: Secuencia de Cubos de 50x50x50mm a ser ensayados.

Edad	Secuencia
Primera Edad	1-2-3
Segunda Edad	4-5-6
Tercera Edad	7-8-9
Cuarta Edad	10-11-12
Quinta Edad	13-14-15
Sexta Edad	16-17-18

Fuente: ASTM C1074-10 Estimating concrete strength by the maturity method.

Elaborado por: American Society for Testing and Materials.

Grafica 3.19: Cubo de Mortero después de Realizar ensayo de Compresión



Fuente: Centro Técnico del Hormigón

Elaborado por: Los Autores

Grafica 3.20: Cubos de Mortero después de Realizar ensayo de Compresión



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

3.5 Procedimiento para el Registro de Temperatura de especímenes de Hormigón y Losa de Pavimento.

Como se mencionó en la sección 3.4, se moldearon dos especímenes extra de hormigón el fin de utilizarlos para el registro de temperatura y la losa de hormigón se fundió de tal manera que se pueda utilizar instrumentos para registrar la temperatura.

Para llevar a cabo esta tarea se utilizó un dispositivo electrónico de nombre “EasyLog®”, este dispositivo es el cual registrará la temperatura según las especificaciones con las cuales se programe.

Grafica 3.21: Especímenes de Hormigón con termocoupla



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

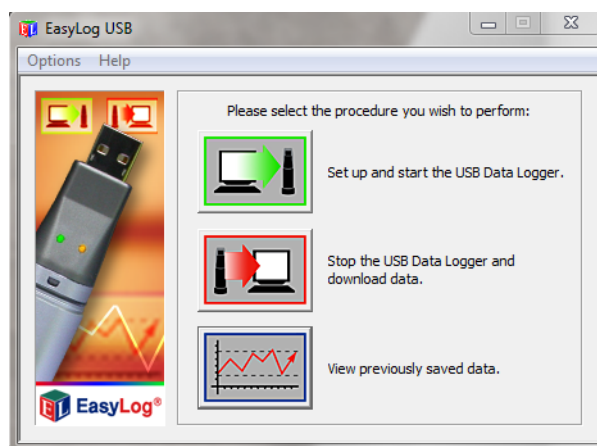
3.5.1 Pasos para programar el dispositivo de registro de temperaturas “EasyLog®”

Es conveniente que el dispositivo “EasyLog®” sea programado con anterioridad para evitar cualquier inconveniente, si el dispositivo no se programa de forma adecuada los datos no se recolectarán de manera correcta y no sería posible llevar a cabo el ensayo.

Como primer paso se debe instalar el software que viene junto con el dispositivo, este programa tiene el nombre “EasyLog USB”, este software solo está disponible en idioma inglés.

Seguido de esto, y una vez instalado correctamente el software, se procede a programar el dispositivo, es importante hacer conocer que “EasyLog®” debe ser programado cada vez que se cambie de ensayo. Al abrir el software se tiene la siguiente ventana en la que se puede escoger si se empieza el registro de temperaturas, se detiene y descarga o si se desea revisar datos descargados anteriormente.

Grafica 3.22: Ventana para escoger los procedimientos de EasyLog USB



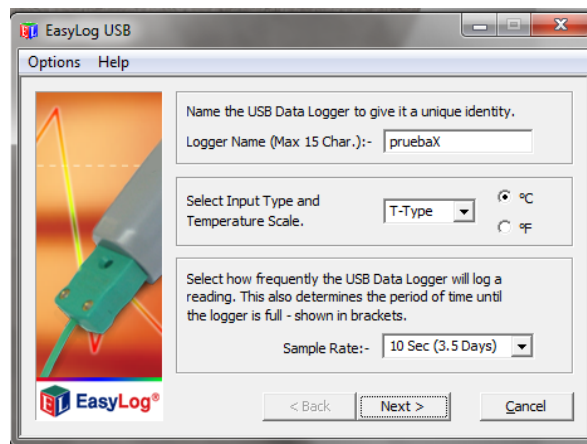
Fuente: Easy Log USB Software

En el caso de esta investigación se seleccionó la primera opción para empezar con un nuevo registro.

A continuación de esto el programa muestra una ventana donde pedirá ingresar el nombre del proyecto, la escala de medición de la

temperatura ($^{\circ}\text{C}$ o $^{\circ}\text{F}$), el mecanismo de ingreso (tipo de termocupla o termopar) y la duración del intervalo entre mediciones.

Grafica 3.23: Ventana para programar una prueba



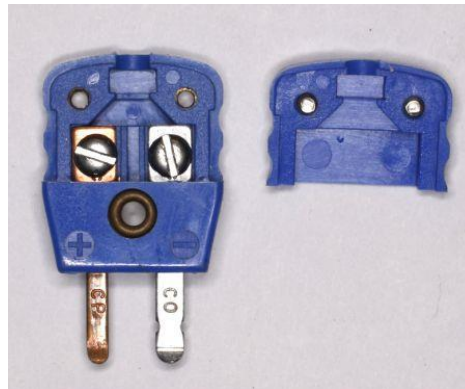
Fuente: Easy Log USB Software

En nuestro caso la termocupla que se utilizó fue Tipo T, esta termocupla tiene la característica de que usa como conductor el cobre y el constantán¹⁰ los cuales son materiales que mantienen su resistencia para amplios rangos de temperaturas son ideales para mediciones entre -200 y 260 $^{\circ}\text{C}$. Resisten atmósferas húmedas, reductoras y oxidantes. El tipo termopares de T tiene una sensibilidad de cerca de $43 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.

¹⁰ El constantán es una aleación en general formada por 55% de cobre y un 45% de níquel ($\text{Cu}_{55}\text{Ni}_{45}$).

Otras termocoplas usadas comúnmente son la Tipo J que usa hierro y la Tipo K que usa una aleación de Níquel y Cromo

Grafica 3.24: Termocoupla Tipo T

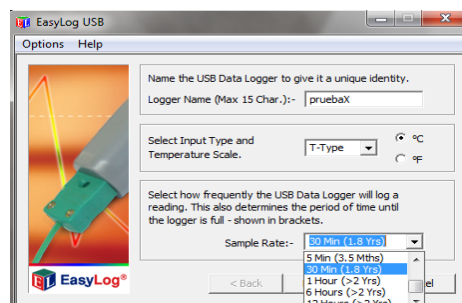


Fuente: “Stuff Miscellaneous Topics All Vaguely Related To Science”

Elaborado por: Luke Miller

Así también para esta investigación se escogió como intervalo entre mediciones 30 minutos, el software indica así mismo que el dispositivo soportaría un total de 1,8 años con intervalos de esa magnitud.

Grafica 3.25: Ventana que muestra cómo se selecciona los intervalos de medición

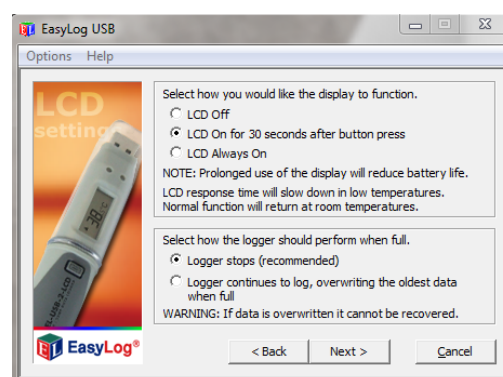


Fuente: Easy Log USB Software

Adicionalmente, el programa muestra opciones de funcionamiento para el display (LCD), el display no es otra cosa que un punto de luz de color verde que se activa en el logger (dispositivo de almacenamiento), se puede escoger que el LCD trabaje apagado durante el registro, que se active cada 10 segundos o que este encendido durante todo el proceso, el software advierte que si se escoge esta opción se corre el riesgo de que la batería de descargue rápidamente.

En esta ventana también se pide escoger que hacer cuando el logger se encuentre lleno, si se detiene o se empiezan a sobrescribir los datos. Finalmente se escogió encender el LCD cada 10 segundos y que el registro se detenga una vez que el logger esté lleno.

Grafica 3.26: Ventana que muestra opciones de funcionamiento



Fuente: Easy Log USB Software

Una de las opciones que el software ofrece es establecer alarmas cuando se ha alcanzado máximos y mínimos de temperatura. Cuando se alcance estas temperaturas el LCD se encenderá e indicará que se debe inspeccionar el hormigón. En nuestro caso estos valores eran 20°C y 50°C

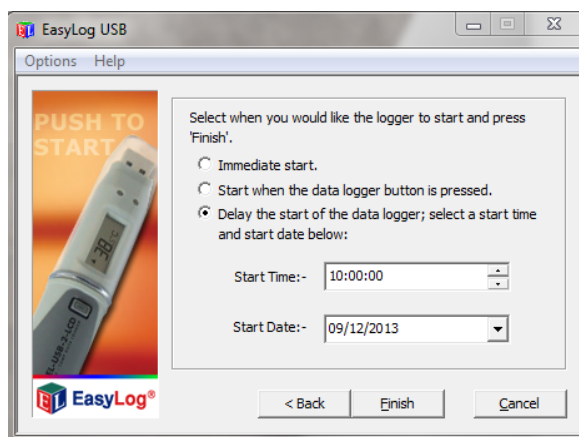
Grafica 3.27: Ventana donde se programa los límites máximos y mínimos



Fuente: Easy Log USB Software

Finalmente se programa la hora y la fecha en la cual se desea empezar a registrar la temperatura.

Grafica 3.28: Ventana para programar Hora y Fecha de inicio del Registro de Temperaturas



Fuente: Easy Log USB Software

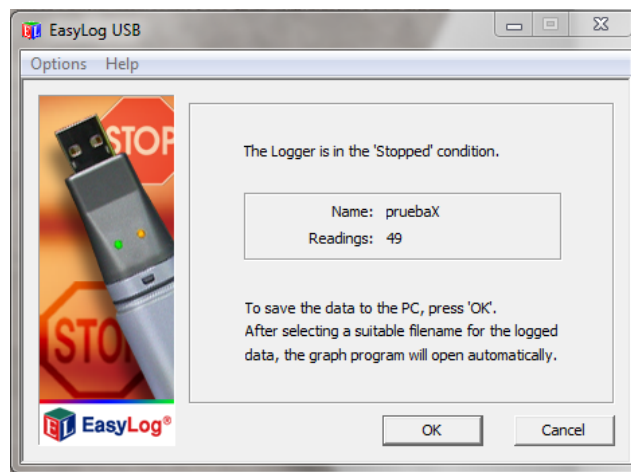
Antes de empezar con el registro, se recomienda que se pruebe la termocupla, una prueba sencilla puede ser apretarla con la mano y conectar la termocupla al logger, luego se revisa si la temperatura registrada da aproximadamente 37°C (temperatura corporal normal), esta prueba permitirá detectar si existe algún problema con la termocupla antes de iniciar el registro de temperaturas.

3.5.2 Pasos para descargar los datos registrados por “EasyLog®”

Una vez que ha transcurrido el tiempo en el que se programó registrar la temperatura se procede a descargar los datos siguiendo estos pasos.

Como se mostró en el paso 1 para programar el registro de temperaturas, se tiene una ventana que ofrece la opción de detener el registro y descargar los datos. A continuación de esto el software muestra una ventana donde se pueden apreciar el nombre de la prueba y la cantidad de datos que se recolectó.

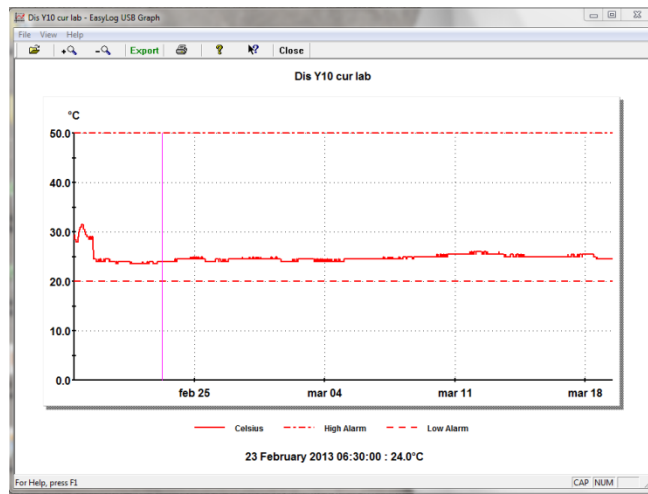
Grafica 3.29: Ventana que se muestra al detener el Registro de Temperatura



Fuente: Easy Log USB Software

Una vez que se presiona OK el programa muestra automáticamente una gráfica donde se puede apreciar el desarrollo de la temperatura durante el tiempo que se programó, se resaltan en la gráfica los máximos y mínimos que se establecieron al programar el logger.

Grafica 3.30: Gráfica que muestra la variación de temperatura



Fuente: Easy Log USB Software

CAPITULO IV

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Introducción

Luego de haber planteado la metodología y definidas las ecuaciones se procede a realizar la investigación de forma práctica, analizar los resultados y a obtener respuestas. Los cálculos que se realizaron son numéricos y gráficos; se deben verificar los resultados en cada etapa del análisis.

En este capítulo se presentan y analizan los resultados que se han ido obteniendo según los procedimientos de la Norma ASTM C1074 para la determinación de la curva Resistencia – Madurez. Los ensayos de la prueba preliminar se realizaron en condiciones estándar, dándose lugar en el laboratorio del Centro Técnico del Hormigón de Holcim. Se

muestra el comportamiento térmico que ha tenido el diseño de hormigón y la curva de madurez alcanzada a partir de las ecuaciones desarrolladas y programadas en una hoja de cálculo, sin tener que hacer uso de métodos muy sofisticados, de tal manera que su implementación sea sencilla.

4.2. Resultados de ensayos para obtener la Temperatura Datum

Como se describe en el capítulo 3 para obtener la Temperatura Datum se llevaron a cabo los ensayos de Tiempo de fraguado y Resistencia a la compresión de cubos de mortero de 50x50x50mm. A continuación se detalla los resultados obtenidos.

4.2.1. Tiempo de Fraguado

Se describen los resultados que se obtuvieron a las diferentes temperaturas siguiendo el procedimiento ya descrito en la sección 3.4. Las Tablas detallan información del ensayo que se realizó tales como, el nombre del proyecto, el tipo de cemento utilizado, la procedencia y código del cemento, la fecha en la que se realizó este ensayo, los aditivos y en qué porcentaje fue agregado cada uno a la mezcla. + Además se detalla la temperatura y la humedad relativa a la cual fue realizado cada

ensayo. El ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM C-403.

4.2.1.1. Tiempo de fraguado a una temperatura de 18°C

TABLA VIII: Tiempo de Fraguado a una temperatura de 18°C

Fuente: Penetrómetro.

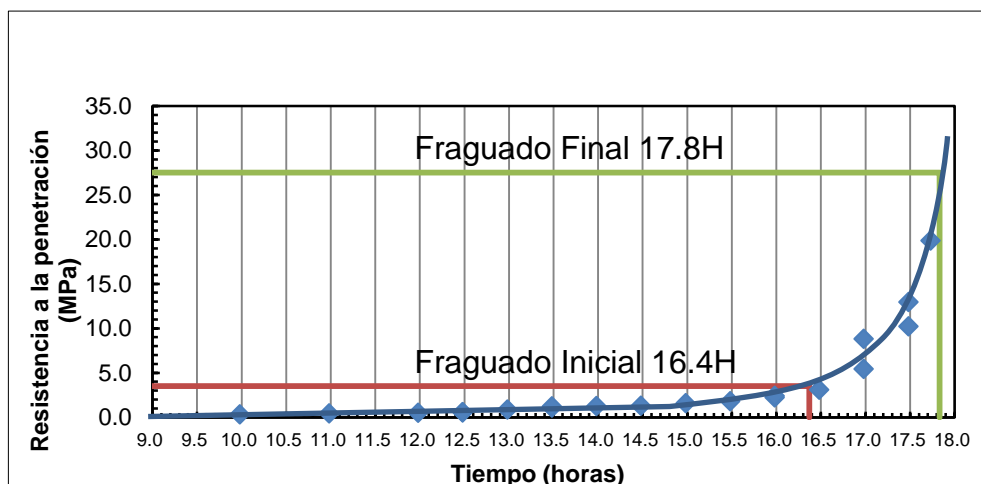
Elaborado por: Los Autores

Proyecto:	Método de Madurez
Cemento:	HE
Procedencia:	Pta. Guayaquil
Código:	CTH 6237
Fecha de ensayo:	21/03/2013
Inicio de fraguado:	16,37 horas
Fin de fraguado:	17,83 horas
Aditivo:	Sikament MR 0,8% - Sikament N100 0,6%
Temp Amb.: 18°C Hum Rel: 82%	

Continuación de la **Tabla VIII**: Tiempo de Fraguado a una Temperatura de 18 °C:

Aguja (in ²)	Tiempo (Horas)	Resistencia (MPa)
0,0	0,0	0,0
1	5,0	0,0
1	6,0	0,0
1	7,0	0,1
1	8,0	0,2
1	9,0	0,3
1	10,0	0,3
1	11,0	0,4
1	12,0	0,5
1	12,5	0,6
0,5	12,5	0,5
0,5	13,0	0,9
0,5	13,5	1,1
0,25	13,5	1,2
0,25	14,0	1,3
0,25	14,5	1,3
0,25	15,0	1,6
0,25	15,5	1,8
0,25	16,0	2,2
0,1	16,0	2,4
0,1	16,5	3,1
0,1	17,0	5,4
0,05	17,0	8,8
0,05	17,5	10,2
0,025	17,5	13,0
0,025	17,7	19,9

Grafica 4.1: Gráfica Resistencia a la Penetración vs Tiempo para Mortero a 18°C



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

4.2.1.2. Tiempo de fraguado a una temperatura de 25°C

Tabla IX : Tiempo de Fraguado a una temperatura de 25°C

Fuente: Penetrómetro.

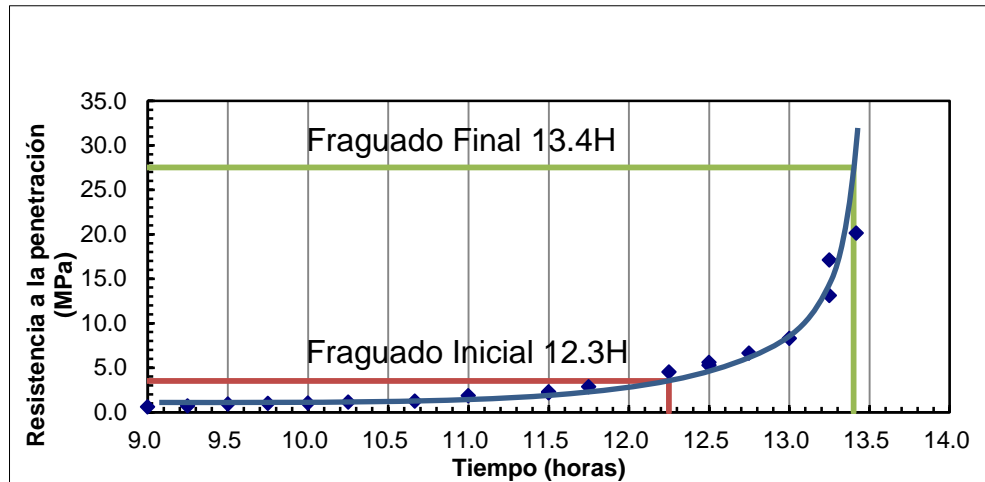
Elaborado por: Los Autores

Proyecto:	Método de Madurez
Cemento:	HE
Procedencia:	Pta. Guayaquil
Código:	CTH 6237
Fecha de ensayo:	14/03/2013
Fecha de muestreo:	06/02/2013
Inicio de fraguado:	12,25 horas
Fin de fraguado:	13,40 horas
Aditivo:	Sikament MR 0,8% - Sikament N100 0,6%
Temp Amb.: 25°C Hum Rel: 82%	

Continuación de la **Tabla IX**: Tiempo de Fraguado a una Temperatura de 25 °C:

Aguja (in ²)	Tiempo (Horas)	Resistencia (MPa)
0,0	0,0	0,0
1	4,0	0,0
1	5,0	0,1
1	5,5	0,1
1	6,5	0,1
1	7,5	0,3
1	8,0	0,4
1	8,5	0,4
1	9,0	0,6
0,5	9,3	0,7
0,5	9,5	0,9
0,5	9,8	1,0
0,5	10,0	1,0
0,5	10,3	1,1
0,25	10,7	1,2
0,25	11,0	1,8
0,25	11,5	2,2
0,1	11,5	2,3
0,1	11,8	2,8
0,1	12,3	4,5
0,1	12,5	5,6
0,05	12,5	5,2
0,05	12,8	6,6
0,05	13,0	8,3
0,05	13,3	13,1
0,025	13,3	17,1
0,025	13,4	20,1

Grafica 4.2: Gráfica Resistencia a la Penetración vs Tiempo para Mortero a 25°C



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

4.2.1.3. Tiempo de fraguado a una temperatura de 50°Cç

Tabla X: Tiempo de Fraguado a una temperatura de 50°C

Fuente: Penetrómetro.

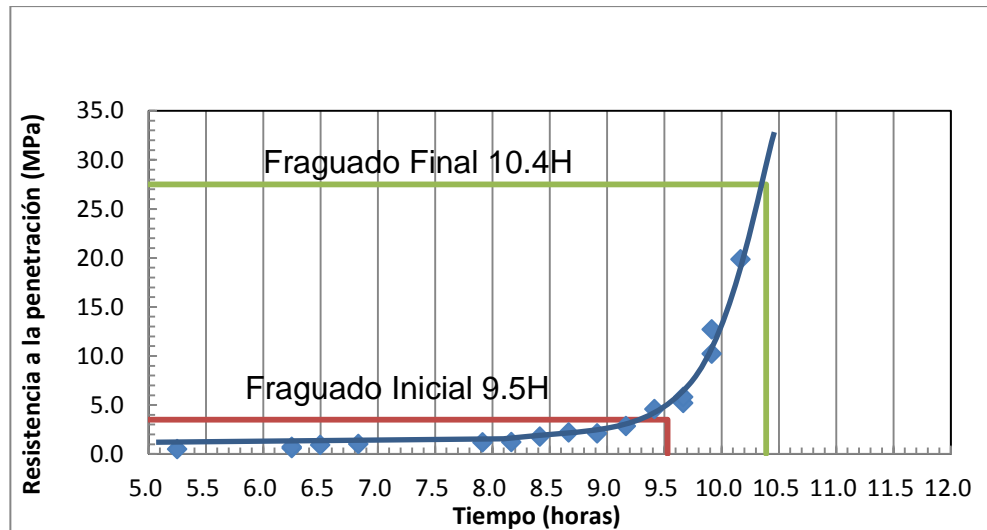
Elaborado por: Los Autores

Proyecto:	Prueba de Madurez
Cemento:	HE
Procedencia:	Pta. San Eduardo-Holcim
Código:	CTH 6237
Fecha de ensayo:	28/03/2013
Fecha de muestreo:	06/02/2013
Inicio de fraguado:	9,53 horas
Fin de fraguado:	10,39 horas
Aditivo:	Sikament MR 0,8% - Sikament N100 0,6%
Temp Amb.: 50°C Hum Rel: 50%	

Continuación de la **Tabla X**: Tiempo de Fraguado a una Temperatura de 50 °C:

Aguja (in ²)	Tiempo (Horas)	Resistencia (MPa)
0,0	0,0	0,0
1	2,7	0,1
1	3,2	0,2
1	4,2	0,4
1	5,3	0,5
1	6,2	0,6
0,5	6,2	0,7
0,5	6,5	0,9
0,5	6,8	1,0
0,5	7,9	1,2
0,25	8,2	1,2
0,25	8,4	1,8
0,25	8,7	2,2
0,1	8,9	2,1
0,1	9,2	2,8
0,1	9,4	4,6
0,1	9,7	5,2
0,05	9,7	5,8
0,05	9,9	10,2
0,025	9,9	12,7
0,025	10,2	19,9

Grafica 4.3: Gráfica Resistencia a la Penetración vs Tiempo para Mortero a 50°C



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

De los resultados obtenidos se puede ver que el hormigón sometido a altas temperaturas fragua más rápido que el que está sometido a más bajas temperaturas obteniéndose la siguiente Tabla comparativa.

Tabla XI: Tiempo de Inicio y Fin de Fraguado a diferentes temperaturas

TEMPERATURA	INICIO DE FRAGUADO (Horas)	FIN DE FRAGUADO (Horas)
18°C	16,37	17,83
25°C	12,25	13,4
50°C	9,53	10,39

Fuente: Tiempo de Fraguado a 18°C, 25°C, 50°C
Elaborado por: Los Autores

4.2.2. Resistencia a la compresión de cubos de 50x50x50 mm

A continuación se presentan las Tablas donde se encuentran los resultados de ensayar los cubos de 50x50x50mm a compresión, se ha clasificado los cubos de acuerdo a la temperatura del agua en que se curaban.

Tabla XII: Resistencias a la compresión de probetas a 18°C

T	No Lab	Hora Moldeo	Hora Rotura	Fecha Moldeo	Fecha Rotura	Edad Rotura (Días)	Carga KN	Resistencia Mpa	Resistencia Promedio
18°C	1	9:05:00	17:00:00	09/04/2013	10/04/2013	1,33	63,60	24,14	22,89
	2	9:05:00	17:05:00	09/04/2013	10/04/2013		59,20	22,70	
	3	9:05:00	17:10:00	09/04/2013	10/04/2013		57,20	21,83	
	4	9:05:00	9:02:00	09/04/2013	12/04/2013	3,00	124,60	49,19	47,42
	5	9:05:00	9:08:00	09/04/2013	12/04/2013		113,60	45,20	
	6	9:05:00	9:15:00	09/04/2013	12/04/2013		120,30	47,87	
	7	9:05:00	12:54:00	09/04/2013	15/04/2013	6,17	160,30	63,42	62,82
	8	9:05:00	13:05:00	09/04/2013	15/04/2013		153,10	61,12	
	9	9:05:00	13:12:00	09/04/2013	15/04/2013		163,80	63,93	
	10	9:05:00	10:57:00	09/04/2013	22/04/2013	13,08	169,50	65,54	67,67
	11	9:05:00	11:00:00	09/04/2013	22/04/2013		176,00	68,63	
	12	9:05:00	11:04:00	09/04/2013	22/04/2013		175,10	68,85	
	13	9:05:00	9:42:00	09/04/2013	03/05/2013	24,03	191,70	74,61	75,98
	14	9:05:00	9:48:00	09/04/2013	03/05/2013		196,20	77,15	
	15	9:05:00	9:53:00	09/04/2013	03/05/2013		191,60	76,17	
	16	9:05:00	9:55:00	09/04/2013	27/05/2013	48,04	238,50	92,96	79,28
	17	9:05:00	10:02:00	09/04/2013	27/05/2013		189,10	72,65	
	18	9:05:00	10:10:00	09/04/2013	27/05/2013		186,00	72,24	

Fuente: Prensa Hidráulica
Elaborado por: Los Autores

Tabla XIII: Resistencias a la compresión de probetas a 25°C

T	No Lab	Hora Moldeo	Hora Rotura	Fecha Moldeo	Fecha Rotura	Edad Rotura (Días)	Carga KN	Resistencia Mpa	Resistencia Promedio
25°C	1	9:05:00	12:00:00	09/04/2013	10/04/2013	1,13	67,90	26,28	25,31
	2	9:05:00	12:06:00	09/04/2013	10/04/2013		65,00	25,47	
	3	9:05:00	12:10:00	09/04/2013	10/04/2013		62,30	24,17	
	4	9:05:00	16:11:00	09/04/2013	11/04/2013	2,30	116,60	45,54	45,17
	5	9:05:00	16:16:00	09/04/2013	11/04/2013		114,80	45,03	
	6	9:05:00	16:23:00	09/04/2013	11/04/2013		111,90	44,92	
	7	9:05:00	13:18:00	09/04/2013	15/04/2013	6,18	148,30	57,31	57,84
	8	9:05:00	13:25:00	09/04/2013	15/04/2013		147,00	56,59	
	9	9:05:00	13:30:00	09/04/2013	15/04/2013		152,10	59,62	
	10	9:05:00	16:51:00	09/04/2013	18/04/2013	9,33	173,10	66,44	65,82
	11	9:05:00	16:56:00	09/04/2013	18/04/2013		168,30	66,19	
	12	9:05:00	17:01:00	09/04/2013	18/04/2013		167,40	64,82	
	13	9:05:00	9:15:00	09/04/2013	26/04/2013	17,01	178,00	69,77	71,85
	14	9:05:00	9:23:00	09/04/2013	26/04/2013		186,70	73,87	
	15	9:05:00	9:30:00	09/04/2013	26/04/2013		182,80	71,91	
	16	9:05:00	10:53:00	09/04/2013	15/05/2013	36,08	203,50	78,09	77,06
	17	9:05:00	11:00:00	09/04/2013	15/05/2013		204,30	78,04	
	18	9:05:00	11:05:00	09/04/2013	15/05/2013		195,00	75,06	

Fuente: Prensa Hidráulica.
Elaborado por: Los Autores

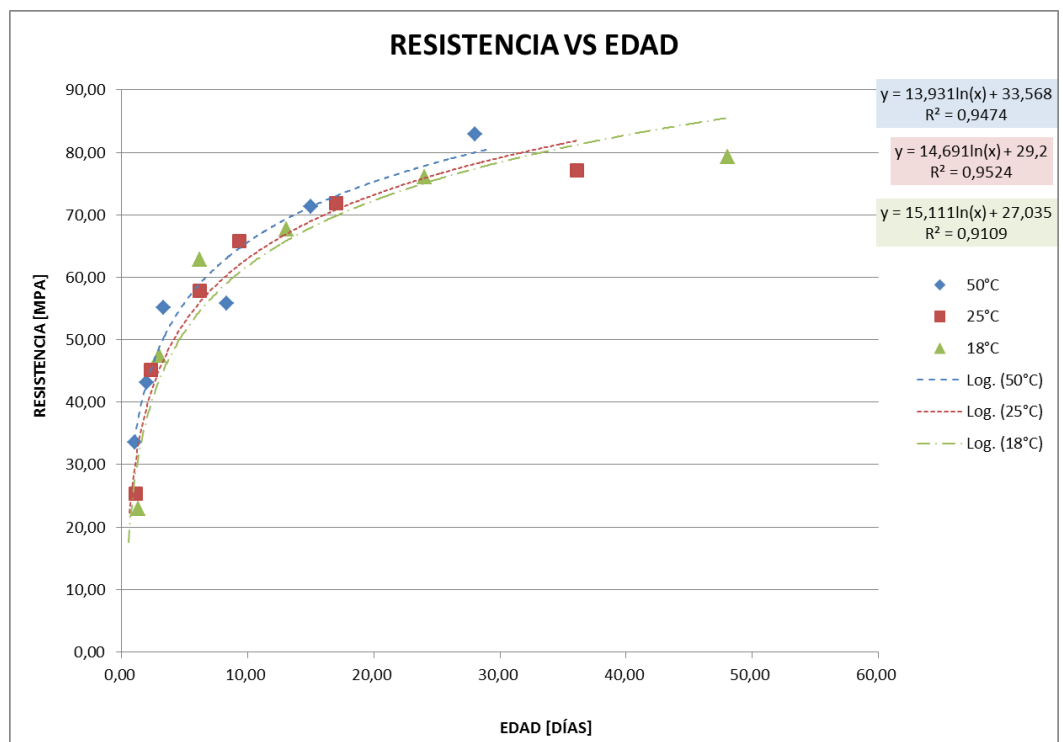
Tabla XIV: Resistencias a la compresión de probetas a 50° C

T	No Lab	Hora Moldeo	Hora Rotura	Fecha Moldeo	Fecha Rotura	Edad Rotura (Días)	Carga KN	Resistencia MPa	Resistencia Promedio
50°C	1	9:05:00	9:35:00	09/04/2013	10/04/2013	1,03	86,40	33,75	33,54
	2	9:05:00	9:43:00	09/04/2013	10/04/2013		81,30	32,51	
	3	9:05:00	9:50:00	09/04/2013	10/04/2013		85,30	34,36	
	4	9:05:00	8:29:00	09/04/2013	11/04/2013	1,98	111,50	42,65	43,08
	5	9:05:00	8:35:00	09/04/2013	11/04/2013		112,60	43,66	
	6	9:05:00	8:40:00	09/04/2013	11/04/2013		110,00	42,93	
	7	9:05:00	17:05:00	09/04/2013	12/04/2013	3,34	142,80	56,26	55,14
	8	9:05:00	17:12:00	09/04/2013	12/04/2013		139,80	54,94	
	9	9:05:00	17:16:00	09/04/2013	12/04/2013		138,60	54,22	
	10	9:05:00	16:55:00	09/04/2013	17/04/2013	8,33	143,20	55,40	55,76
	11	9:05:00	17:00:00	09/04/2013	17/04/2013		141,40	54,93	
	12	9:05:00	17:06:00	09/04/2013	17/04/2013		148,80	56,95	
	13	9:05:00	9:13:00	09/04/2013	24/04/2013	15,01	182,60	70,97	71,31
	14	9:05:00	9:17:00	09/04/2013	24/04/2013		183,00	70,37	
	15	9:05:00	9:21:00	09/04/2013	24/04/2013		186,20	72,59	
	16	9:05:00	9:15:00	09/04/2013	07/05/2013	28,01	213,80	82,16	82,93
	17	9:05:00	9:20:00	09/04/2013	07/05/2013		216,50	84,36	
	18	9:05:00	9:25:00	09/04/2013	07/05/2013		210,10	82,27	

Fuente: Prensa Hidráulica.
Elaborado por: Los Autores

Se procede a construir las curvas Resistencia vs. Edad para cada temperatura de curado.

Grafica 4.4: Gráfica Resistencia vs Edad de los cubos de Mortero curados a 18°C, 25°C y 50°C



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

4.2.3. Obtención de Factor K y Temperatura Datum.

Para obtener el Factor K se grafica una curva Inverso de la Resistencia vs. Inverso de la Edad para cada temperatura, siendo el valor de K la división entre la intersección de la recta con el eje "Y" y la pendiente de la recta.

Tabla XV: Valores de 1/Edad y 1/Resistencia a temperatura de 18⁰ C

T	No Lab	Edad Rotura (Días)	Carga KN	Resistencia Mpa	Resistencia Promedio	1/Edad (1/días)	1/Resistencia (1/Mpa)
18°C	1	1,33	63,60	24,14	22,89	0,75	0,04
	2		59,20	22,70			
	3		57,20	21,83			
	4	3,00	124,60	49,19	47,42	0,43	0,02
	5		113,60	45,20			
	6		120,30	47,87			
	7	6,17	160,30	63,42	62,82	0,16	0,02
	8		153,10	61,12			
	9		163,80	63,93			
	10	13,08	169,50	65,54	67,67	0,08	0,01
	11		176,00	68,63			
	12		175,10	68,85			
	13	24,03	191,70	74,61	75,98	0,04	0,01
	14		196,20	77,15			
	15		191,60	76,17			
	16	48,04	238,50	92,96	79,28	0,02	0,01
	17		189,10	72,65			
	18		186,00	72,24			

Fuente: Resistencias a la compresión de probetas a 18⁰ C

Elaborado por: Los Autores

Tabla XVI: Valores de 1/Edad y 1/Resistencia a temperatura de 25⁰ C

T	No Lab	Edad Rotura (Días)	Carga KN	Resistencia Mpa	Resistencia Promedio	1/Edad (1/días)	1/Resistencia (1/Mpa)
25°C	1	1,13	67,90	26,28	25,31	0,89	0,04
	2		65,00	25,47			
	3		62,30	24,17			
	4	2,30	116,60	45,54	45,17	0,43	0,02
	5		114,80	45,03			
	6		111,90	44,92			
	7	6,18	148,30	57,31	57,84	0,16	0,02
	8		147,00	56,59			
	9		152,10	59,62			
	10	9,33	173,10	66,44	65,82	0,11	0,02
	11		168,30	66,19			
	12		167,40	64,82			
	13	17,01	178,00	69,77	71,85	0,06	0,01
	14		186,70	73,87			
	15		182,80	71,91			
	16	36,08	203,50	78,09	77,06	0,03	0,01
	17		204,30	78,04			
	18		195,00	75,06			

Fuente: Resistencias a la compresión de probetas a 25⁰ C

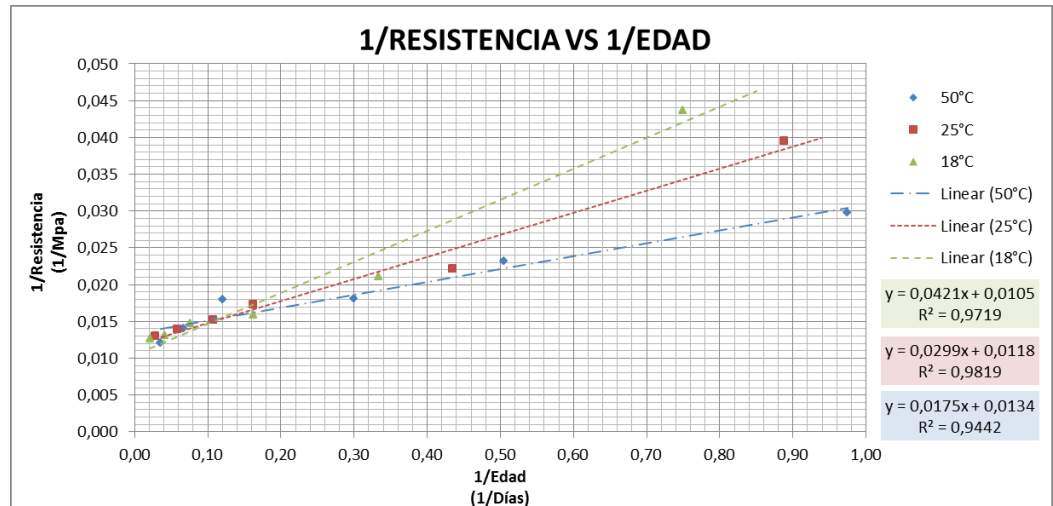
Elaborado por: Los Autores

Tabla XVII : Valores de 1/Edad y 1/Resistencia a temperatura de 50° C

T	No Lab	Edad Rotura (Días)	Carga KN	Resistencia Mpa	Resistencia Promedio	1/Edad (1/días)	1/Resistencia (1/Mpa)
50°C	1	1,03	86,40	33,75	33,54	0,97	0,03
	2		81,30	32,51			
	3		85,30	34,36			
	4	1,98	111,50	42,65	43,08	0,51	0,02
	5		112,60	43,66			
	6		110,00	42,93			
	7	3,34	142,80	56,26	55,14	0,30	0,02
	8		139,80	54,94			
	9		138,60	54,22			
	10	8,33	143,20	55,40	55,76	0,12	0,02
	11		141,40	54,93			
	12		148,80	56,95			
	13	15,01	182,60	70,97	71,31	0,07	0,01
	14		183,00	70,37			
	15		186,20	72,59			
	16	28,01	213,80	82,16	82,93	0,04	0,01
	17		216,50	84,36			
	18		210,10	82,27			

Fuente: Resistencias a la compresión de probetas a 50° C

Elaborado por: Los Autores

Grafica 4.5: Gráfica 1/Resistencia vs. 1/Edad

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

Elaborado por: Los Autores

Tabla XVIII: Obtención del Valor K a distintas Temperatura.

Temperatura	Intersección	Pendiente	K
50	0,0134	0,0175	0,7657
25	0,0118	0,0299	0,3946
18	0,0105	0,0421	0,2494

Fuente: Grafica 1/Edad vs 1/Resistencia

Elaborado por: Los Autores

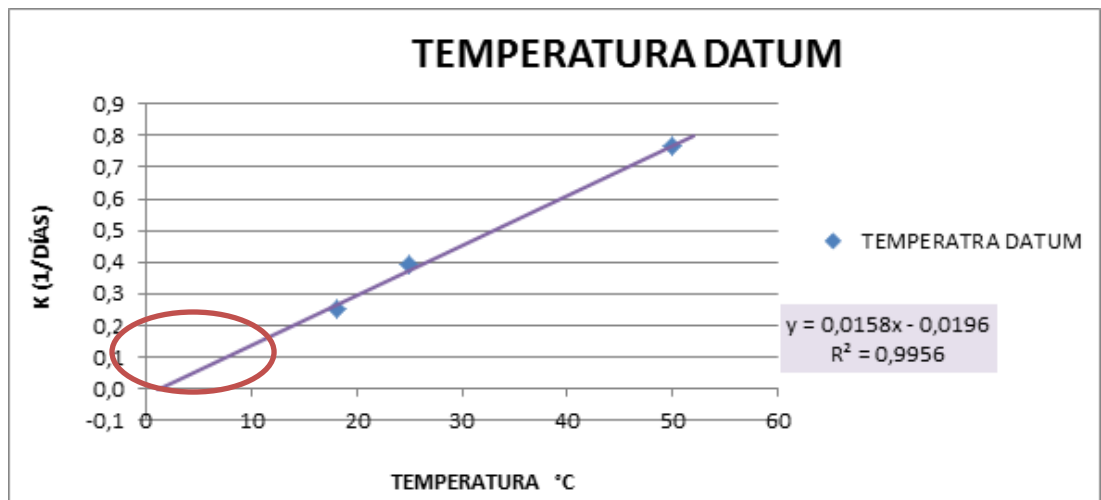
Para finalmente obtener el valor de la temperatura Datum se grafican los Factores K vs Temperatura de Curado.

Tabla XIX: Datos Temperatura y Valor K

Temperatura	K
50	0,7657
25	0,3946
18	0,2494

Fuente: Grafica 1/Edad vs 1/Resistencia
Elaborado por: Los Autores

Se proyecta la línea hasta intersectar el eje "X" (Temperatura) y el valor de la intersección es la Temperatura Datum.

Grafica 4.6: Gráfica Factor K vs Temperatura

Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

TEMPERATURA DATUM	=	1,2 °C
----------------------	---	--------

De la gráfica se puede concluir que la Temperatura Datum es 1,2°C, esta temperatura Datum es la que utilizará en todos los cálculos para obtener los índices de madurez.

4.3. Resultados de Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón curados bajo condiciones estándar.

En esta sección se muestra y analiza las resistencias a compresión de los cilindros moldeados a partir del diseño de hormigón establecido, siguiendo los procedimientos de la Norma NTE INEN 1 576:2011¹¹. Estos resultados serán luego utilizados para la elaboración de la curva de madurez de dicho diseño.

De la norma NTE INEN 1573:2010¹² se tiene que “Este ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos de hormigón de cemento hidráulico a una velocidad que se encuentra dentro de un rango definido, aplicada hasta que ocurra la falla del espécimen. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima

¹¹ Norma NTE INEN 1 576:2011 Hormigón de cemento Hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayos

¹² Norma NTE INEN 1 573:2010 Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.

alcanzada durante el ensayo para el área de la sección transversal del espécimen.”

Se ensayaron 2 cilindros por edad, se establecieron 5 edades que fueron: 1, 3, 7, 14 y 28 días; se calculó la resistencia a la compresión de cada uno y luego se obtuvo el promedio de ambos, teniendo en cuenta que el rango aceptable de variación de resistencia de cilindros individuales sea menor igual al 9% según la norma NTE INEN 1573. El grupo de cilindros fue mantenido bajo condiciones estándar, con temperatura y humedad constante en el Cuarto de Curado del Centro Técnico del Hormigón de Holcim Ecuador. Este grupo estaba compuesto de 11 cilindros los cuales tienen la distribución y secuencia establecida en la sección 3.4. A continuación se muestran los datos obtenidos del ensayo a la compresión.

Tabla XX: Porcentaje de Dispersión de las Resistencias obtenidas en los ensayos.

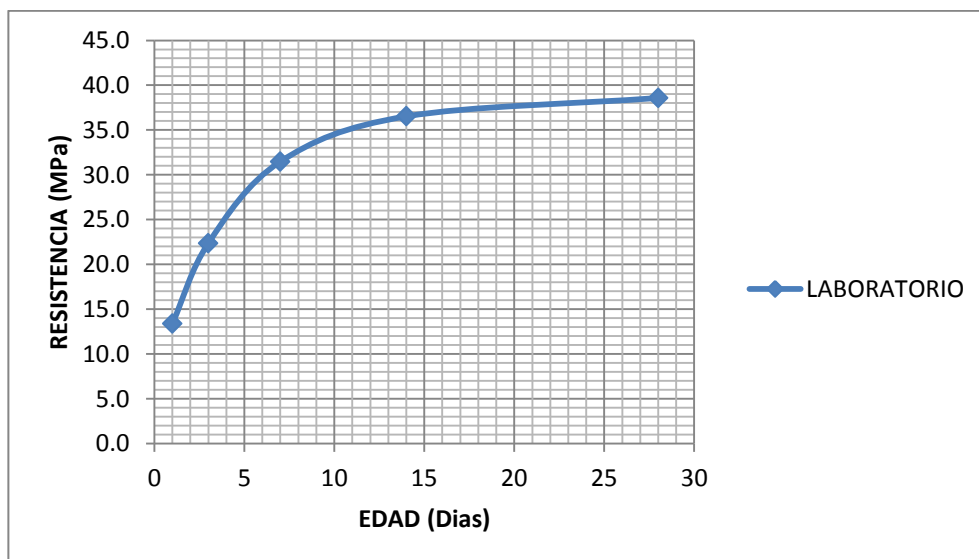
Edad (días)	Resistencia Probeta n° 1 (MPa)	Resistencia Probeta n° 2 (MPa)	Resistencia Promedio (MPa)	Porcentaje de Dispersión (%)
1	13,82	12,97	13,40	3%
3	21,96	22,76	22,36	2%
7	31,54	31,41	31,48	0%
14	37,31	35,73	36,52	2%
28	40,38	36,77	38,58	5%

Fuente: Centro Técnico del Hormigón.

Elaborado por: Los Autores.

Para una mejor apreciación, se graficó una curva que permite apreciar de mejor manera la evolución de la resistencia con la edad.

Grafica 4.7: Gráfica Resistencia a la Compresión vs Tiempo para cilindros curados en el Laboratorio



Fuente: Centro Técnico del Hormigón

Elaborado por: Los Autores

Grafica 4.8: Ensayo de Resistencia a la Compresión



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

4.4. Obtención de la Curva de Madurez

En la sección 4.3 se dio a conocer la resistencia a la compresión del diseño de hormigón a diferentes edades con las que se hizo la investigación, sin embargo, estos datos con los que se realiza la curva Resistencia - Madurez buscan corroborar que los resultados obtenidos con el Método son muy aproximados a los que se obtienen de ensayar cilindros calados del Pavimento y cilindros curados en obra.

Tal como indica el tema de esta sección, ahora se busca establecer los parámetros para la construcción de una curva Resistencia a la Compresión vs. Índice de Madurez que se obtiene a través de la

información que se ha recopilado a través de la investigación, para la construcción de esta curva es necesario llevar a cabo ciertos pasos, es así como se tiene:

- Registro de Historial de Temperatura del Hormigón.
- Grafica Temperatura vs. Tiempo tomando en cuenta la Temperatura Datum.
- Obtención de Índices de madurez
- Obtención de resistencias a la compresión de cilindros curados bajo condiciones estándares
- Gráfica Resistencia a la compresión VS Madurez
- Comprobación de resultados

Registro de Historial de Temperatura

Para el registro de temperaturas se utilizó un instrumento que consistía de un data logger (registrador de datos) el cual gracias a una termocupla instalada tipo T (cobre – constantán¹³) que permitió registrar la temperatura del hormigón durante 28 días tomando la temperatura cada media hora. A continuación se presenta una Tabla con el registro de temperatura del hormigón curado en el laboratorio para las primeras 24 horas.

¹³ El Constantan consiste en una aleación de cobre y níquel, usualmente consiste en 55% de cobre y 45% de níquel.

Tabla XXI: Temperatura del hormigón curado en el laboratorio para las primeras 24 horas.

Edad (Horas)	Temperatura (°C)
0,0	29,5
0,5	29,0
1,0	28,5
1,5	28,5
2,0	28,5
2,5	28,0
3,0	28,0
3,5	28,0
4,0	28,0
4,5	28,0
5,0	28,5
5,5	29,0
6,0	29,5
6,5	30,0
7,0	30,5
7,5	30,5
8,0	31,0
8,5	31,0
9,0	31,0
9,5	31,5
10,0	31,5
10,5	31,5
11,0	31,5
11,5	31,5
12,0	31,0

Edad (Horas)	Temperatura (°C)
12,5	30,5
13,0	30,5
13,5	30,5
14,0	30,0
14,5	30,0
15,0	29,5
15,5	29,5
16,0	29,5
16,5	29,0
17,0	29,0
17,5	29,0
18,0	29,0
18,5	29,0
19,0	28,5
19,5	28,5
20,0	28,5
20,5	29,0
21,0	29,0
21,5	29,0
22,0	28,5
22,5	29,0
23,0	29,0
23,5	29,0
24,0	29,0

Fuente: EasyLog.
Elaborado por: Los Autores

De los datos mostrados se puede concluir que para las primeras 24 horas, la temperatura máxima, mínima y promedio fueron de:

Tabla XXII: Temperatura máxima, mínima y promedio de las primeras 24 horas

Temperatura Máxima	31,5°C
Temperatura Mínima	28°C
Temperatura Promedio	29,5°C

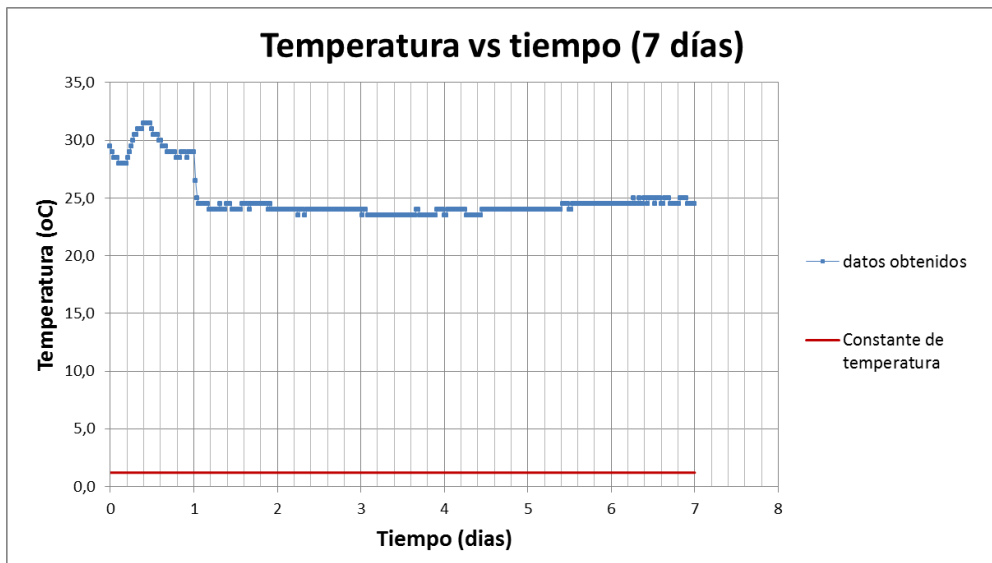
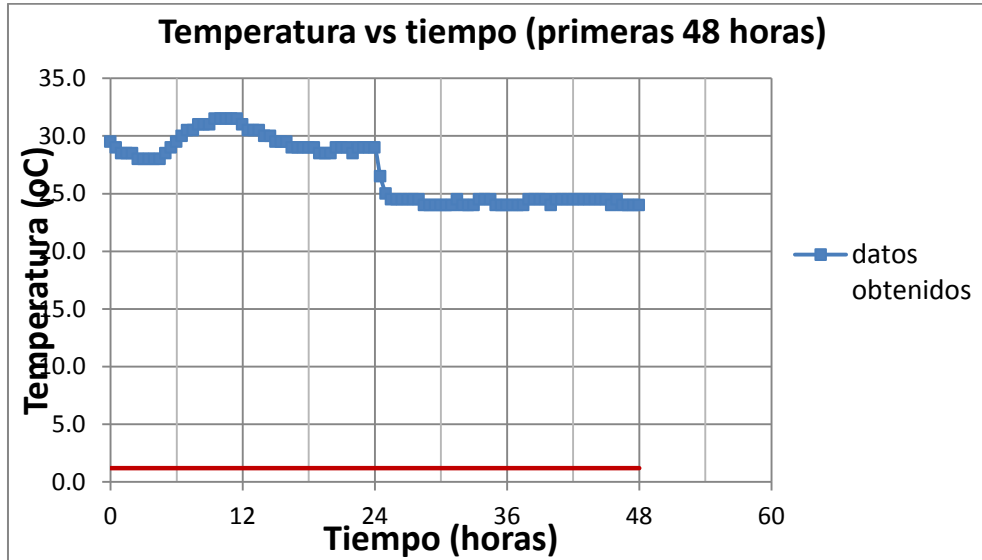
Fuente: Temperatura del hormigón curado en el laboratorio para las primeras 24 horas.

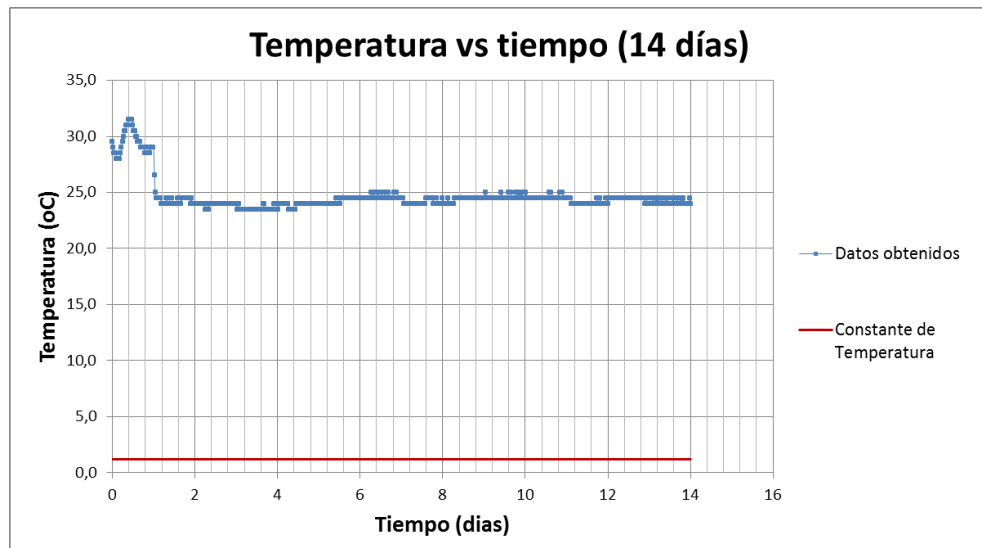
Elaborado por: Los Autores.

Grafica Temperatura vs. Tiempo tomando en cuenta la Temperatura Datum

Con los datos de temperatura que se obtuvieron mediante los instrumentos antes mencionados se procede ahora a representar gráficamente una curva donde se relacione con el tiempo transcurrido, en esta grafica se debe tomar en cuenta el valor de la temperatura Datum que se obtuvo en la sección 4.2. Esta grafica permitirá más adelante obtener el índice de madurez. A continuación se muestran las gráficas Temperatura vs. Resistencia para las primeras 48 horas, para 7 días, para 14 días y finalmente para 28 días, siendo la constante de temperatura equivalente a la temperatura Datum que en el caso de nuestra investigación es igual 1,2°C

Grafica 4.9: Variación de Temperatura de probetas a las 48 horas, 7 días, 14 días y 28 días





Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Obtención de Índices de Madurez

Una vez que se ha representado gráficamente la evolución de la temperatura durante 28 días se procede a obtener los Índices de

madurez o como también se le conoce “Factor Temperatura-Tiempo”, como se ha mencionado anteriormente, para nuestra investigación se ha utilizado la ecuación de Nurse-Saul, para obtener estos valores se hace hincapié nuevamente en la norma ASTM C 1074, la cual indica la siguiente ecuación para obtener el Índice de Madurez:

$$M = \sum (T - T_0) \cdot \Delta t$$

En donde:

M= Índice de Madurez o Factor Temperatura Tiempo.

T= Temperatura promedio durante un intervalo de tiempo, en nuestro caso media hora.

T₀= Temperatura Datum.

Δt= Intervalo de Tiempo en el que se registró la temperatura (media hora).

Para obtener el índice de madurez se realizó el siguiente procedimiento:

- Se procedió a obtener un promedio entre la temperatura final e inicial en un intervalo de tiempo, a continuación se presenta una Tabla

con el promedio de temperatura para las primeras 24 horas, en la cual en la primera columna se muestra la edad cada media hora, en la segunda se muestra la temperatura a esa edad y finalmente en la tercera columna se muestra el promedio entre la temperatura final e inicial para cada intervalo:

Tabla XXIII: Temperatura Promedio (24H)

Edad (Horas)	Temperatura (°C)	Temperatura Promedio (°C)
0,0	29,5	-
0,5	29,0	29,25
1,0	28,5	28,75
1,5	28,5	28,5
2,0	28,5	28,5
2,5	28,0	28,25
3,0	28,0	28
3,5	28,0	28
4,0	28,0	28
4,5	28,0	28
5,0	28,5	28,25
5,5	29,0	28,75
6,0	29,5	29,25
6,5	30,0	29,75
7,0	30,5	30,25
7,5	30,5	30,5
8,0	31,0	30,75
8,5	31,0	31
9,0	31,0	31
9,5	31,5	31,25
10,0	31,5	31,5
10,5	31,5	31,5
11,0	31,5	31,5
11,5	31,5	31,5
12,0	31,0	31,25

Edad (Horas)	Temperatura (°C)	Temperatura Promedio (°C)
12,5	30,5	30,75
13,0	30,5	30,5
13,5	30,5	30,5
14,0	30,0	30,25
14,5	30,0	30
15,0	29,5	29,75
15,5	29,5	29,5
16,0	29,5	29,5
16,5	29,0	29,25
17,0	29,0	29
17,5	29,0	29
18,0	29,0	29
18,5	29,0	29
19,0	28,5	28,75
19,5	28,5	28,5
20,0	28,5	28,5
20,5	29,0	28,75
21,0	29,0	29
21,5	29,0	29
22,0	28,5	28,75
22,5	29,0	28,75
23,0	29,0	29
23,5	29,0	29
24,0	29,0	29

Fuente: Temperatura del hormigón curado en el laboratorio para las primeras 24 horas.

Elaborado por: Los Autores

- A continuación de esto y con la ayuda de la norma, se restó a cada temperatura promedio la temperatura datum y se la multiplico por el intervalo de tiempo en horas, que en nuestro caso siempre será de 0,5 horas, obteniendo así el área bajo la curva, es decir, el Índice de Madurez o Factor Temperatura-Tiempo, sin embargo más adelante, para obtener la curva Resistencia a la Compresión vs. Índice de Madurez se necesitará el índice acumulado, esto se obtiene sumando el índice del intervalo de tiempo anterior con el actual. A continuación los índices de Madurez para las primeras 24 horas:

Tabla XXIV: Factor de Tiempo-Temperatura (24H) - Índice Madurez.

Edad (Horas)	Incremento edad (horas)	Temperatura Promedio (°C)	Factor Tiempo- temperatura (°C-h)
0,0	-	-	-
0,5	0,5	29,25	14,0
1,0	0,5	28,75	13,8
1,5	0,5	28,5	13,7
2,0	0,5	28,5	13,7
2,5	0,5	28,25	13,5
3,0	0,5	28	13,4
3,5	0,5	28	13,4
4,0	0,5	28	13,4
4,5	0,5	28	13,4
5,0	0,5	28,25	13,5
5,5	0,5	28,75	13,8
6,0	0,5	29,25	14,0
6,5	0,5	29,75	14,3
7,0	0,5	30,25	14,5
7,5	0,5	30,5	14,7
8,0	0,5	30,75	14,8
8,5	0,5	31	14,9
9,0	0,5	31	14,9
9,5	0,5	31,25	15,0
10,0	0,5	31,5	15,2
10,5	0,5	31,5	15,2
11,0	0,5	31,5	15,2
11,5	0,5	31,5	15,2
12,0	0,5	31,25	15,0

Edad (Horas)	Incremento edad (horas)	Temperatura Promedio (°C)	Factor Tiempo- temperatura (°C-h)
12,5	0,5	30,75	14,8
13,0	0,5	30,5	14,7
13,5	0,5	30,5	14,7
14,0	0,5	30,25	14,5
14,5	0,5	30	14,4
15,0	0,5	29,75	14,3
15,5	0,5	29,5	14,2
16,0	0,5	29,5	14,2
16,5	0,5	29,25	14,0
17,0	0,5	29	13,9
17,5	0,5	29	13,9
18,0	0,5	29	13,9
18,5	0,5	29	13,9
19,0	0,5	28,75	13,8
19,5	0,5	28,5	13,7
20,0	0,5	28,5	13,7
20,5	0,5	28,75	13,8
21,0	0,5	29	13,9
21,5	0,5	29	13,9
22,0	0,5	28,75	13,8
22,5	0,5	28,75	13,8
23,0	0,5	29	13,9
23,5	0,5	29	13,9
24,0	0,5	29	13,9

Fuente: Centro Técnico del Hormigón.
Elaborado por: Los Autores.

Así se tiene que los Índices Acumulados para 24 horas, 3 días, 7 días, 14 días y 28 días son:

Tabla XXV: Índices acumulados por Edad.

Edad	Índice de Madurez Acumulado °C-Hora	Índice de Madurez Acumulado °C-Día
24 horas	679	28
3 días	1782	74
7 días	3982	166
14 días	7872	328
28 días	15888	662

Fuente: Factor de Tiempo-Temperatura (24H) - Índice Madurez.

Elaborado por: Los Autores.

Construcción de la Curva Resistencia a la Compresión vs. Índice de Madurez.

Una vez realizados todos los procedimientos anteriores, se puede graficar la Curva Resistencia a la Compresión vs. Índice de Madurez, para realizar esta tarea se utilizaron los datos de resistencia a la compresión vistos en la sección 4.3 para los cilindros curados en el Centro Técnico del Hormigón, es así que, cada valor de Factor Temperatura-Tiempo visto en la Tabla XII se graficó junto con la resistencia a la compresión que se registró para esa edad mediante ensayos usando una escala logarítmica para el Índice de Madurez (eje X), de esta manera se tiene la siguiente Tabla y grafica de dispersión:

Tabla XXVI: Resistencias Promedio

Edad	Factor Acumulado	Factor Acumulado	f'c-probeta 1	f'c-probeta 2	Dispersion	Criterio de	f'c-promedio
(dias)	Tiempo-temperatura (°C-h)	Tiempo-temperatura (°C-dias)	(MPa)	(MPa)	obtenida*	aceptacion**	(MPa)
1	679	28	13.8	12.9	3%	OK	13.4
3	1782	74	22.0	22.8	2%	OK	22.4
7	3982	166	31.5	31.4	0%	OK	31.5
14	7872	328	37.3	35.7	2%	OK	36.5
28	15888	662	40.4	36.8	5%	OK	38.6

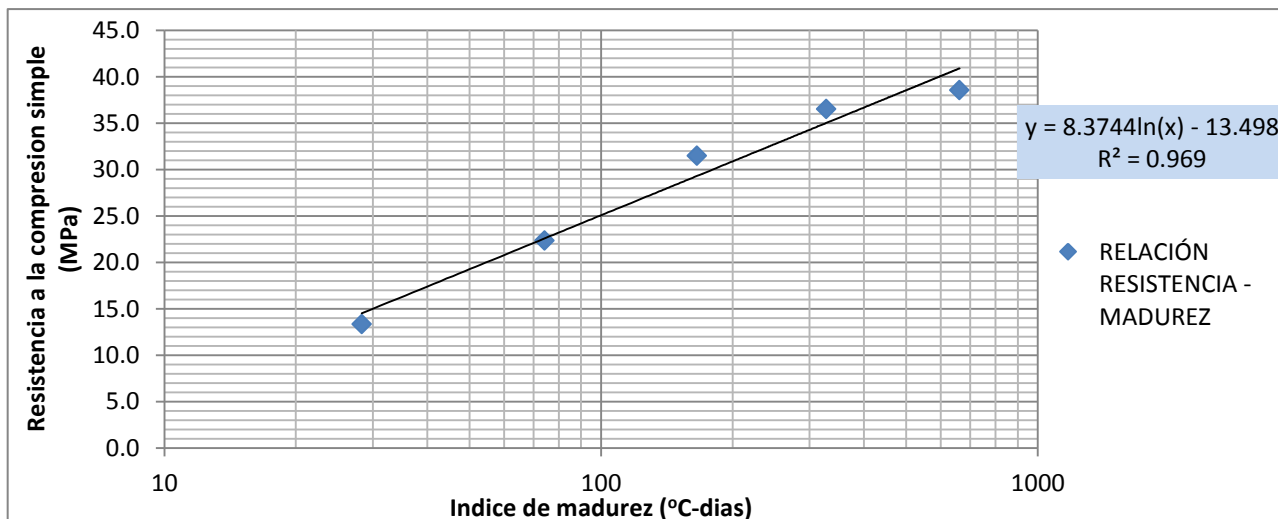
* Variación porcentual de resistencia respecto al promedio.

** ASTM C 1074 Estimación de la resistencia del hormigón utilizando el método de madurez. Dispersión menor al 10%

Fuente: Centro Técnico del Hormigón.

Elaborado por: Los Autores.

Una vez obtenidos estos puntos, se procede a trazar una línea de tendencia, la ecuación de esta recta será la que se utilizará para estimar la resistencia.

Grafica 4.10: Gráfica Resistencia a la compresión vs índice de madurez

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

Elaborado por: Los Autores

Así se tiene que la ecuación con la que se estimará la resistencia a la compresión simple es:

$$Y(x) = 8,3744(\ln(x)) - 13,498$$

Siendo:

Y: Resistencia a la compresión simple

X: Índice de Madurez

Estimación de la Resistencia Usando Ecuación de la Curva de Madurez

Una vez obtenida esta ecuación, se quiso corroborar que estos resultados efectivamente son similares a los resultados que se obtendrían con un hormigón mantenido en obra, es por eso que, como se vio en la sección 3.4, también se curaron cilindros en obra, con el fin de que una vez obtenida la curva de Resistencia vs. Índice de Madurez se puedan comparar los resultados que se obtienen de la ecuación con los resultados que se obtuvieron al ensayar los cilindros en obra, por esta razón a uno de los cilindros que permanecían curados a la intemperie también se le colocó una termocupla (termopar) con la finalidad de obtener los índices de madurez y comprobar hormigones con los mismos índices de madurez tienen

resistencia a la compresión similares, en la siguiente Tabla se muestra los índices de madurez de los cilindros curados en obra para las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días.

Tabla XXVII: Índices de Madurez de Cilindros Curados en obra

Edad (días)	Índice de Madurez (°C-Días)
1	33
3	91
7	218
14	430
28	844

Fuente: Centro Técnico del Hormigón.
Elaborado por: Los Autores.

Usando la ecuación de la curva de Resistencia vs. Madurez se tiene que la resistencia sería:

Tabla XXVIII: Estimación de la Resistencia de cilindros curados en obra con respecto al Índice de Madurez

Edad (Días)	Resistencia a la Compresión usando Madurez (MPa)
1	15,71
3	24,26
7	31,58
14	37,29
28	42,93

Fuente: Centro Técnico del Hormigón.
Elaborado por: Los Autores.

Ahora se comparan la resistencia a la compresión simple obtenida mediante la ecuación de madurez y la obtenida mediante ensayos:

Tabla XXIX: Resistencia Promedio con respecto al Índice de Madurez de Cilindros en obra.

Edad (Días)	Resistencia Usando Madurez (MPa)	Resistencia Promedio de Cilindros (MPa)	Dispersión (%)
1	15,71	14,35	9
3	24,26	25,37	5
7	31,58	33,52	6
14	37,29	37,35	0
28	42,93	39,30	8

Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Como se puede observar los resultados obtenidos con madurez dan resistencias muy parecidas a los resultados obtenidos de ensayar cilindros, la dispersión se encuentra dentro de lo establecido en la norma ASTM 1074 que es de 10%.

CAPITULO V

5. APLICACIÓN EN UNA OBRA CIVIL

5.1. Introducción

En este capítulo se describe como se aplica el método de madurez para una obra civil, se consideró importante simular el método de madurez con un volumen de hormigón más grande y así comprobar su factibilidad y precisión.

En este caso se seleccionó una losa de pavimento de 4.5 MPa. Esta losa de pavimento se construyó en el área de parqueo del Centro Técnico del Hormigón (CTH) siendo una losa cuadrada con lados de 1 metro por 1 metro y una de profundidad de 20 centímetros obteniendo un volumen neto de losa de 0.2 metro cúbicos. El

encofrado de la losa fue cubierto con una sábana de plástico para evitar la pérdida del agua del diseño de hormigón.

Se detallan los procedimientos que se siguieron desde la obtención del hormigón para la elaboración de la losa hasta los ensayos realizados y resultados obtenidos para comprobar la curva de madurez calculada en el capítulo 4. Asimismo se muestran los resultados pertinentes del hormigón en estado fresco y en estado endurecido.

5.2. Diseño del Hormigón

El método de madurez proporciona un procedimiento de cómo debe desarrollarse pero cabe indicar que este método es aplicable para un diseño en específico; esto quiere decir que los resultados y gráficas que se obtuvieron en este ensayo solo podrán ser utilizados y evaluados para el tipo de diseño con el que se trabajará. Si se desea obtener correlaciones aplicando el mismo método de madurez del hormigón pero para un diseño de hormigón diferente se tendrá que realizar el procedimiento ya mencionado en los capítulos anteriores.

El diseño de hormigón que se utilizó para este ensayo fue para un pavimento con una resistencia a la flexión de 4.5MPa. La dosificación para el hormigón utilizado se la puede encontrar en la Tabla III.

5.3. Metodología Empleada

A continuación se describe paso a paso el procedimiento que se siguió para la elaboración del pavimento de 4.5 MPa y los ensayos que se realizaron según la norma NTE INEN 1763:2010¹⁴ para luego poder continuar con la comprobación de la curva de madurez.

5.3.1. Muestreo

El muestreo del hormigón que se realizó se detalla a continuación:

En la Planta San Eduardo de Holcim se escogió el mixer N°108, que cargaba el diseño de hormigón con código 10020371, el mismo con el que se trabajó en laboratorio para obtener la curva de madurez, siendo este un R28WYR10, que indica que obtiene su resistencia de diseño a los 28 días y cuyo revenimiento en obra debe ser de 10 cm.

El mixer se detuvo en el área de muestreo para control de calidad de la planta a las 10H30, para la obtención de la muestra de hormigón se utilizaron dos carretillas con capacidad de 100 litros y una carretilla con capacidad de 75 litros. Se bajó

¹⁴ NTE INEN 1 763:2010 Hormigón de cemento hidráulico. Muestreo.

el canalón y a continuación se descargó en cada una de las carretillas muestra suficiente para la elaboración de la losa y la realización de los ensayos en estado fresco del hormigón incluyendo el moldeo de cilindros.

Se transportó la mezcla al área de parqueo del CTH en donde estaba listo el encofrado armado de la losa y los equipos para realizar los ensayos en estado fresco del hormigón y el moldeo de las probetas.

5.3.2. Ensayos en estado fresco del hormigón

Después de transportar las muestras al área de la obra se procedió a re-mezclarlas para garantizar la uniformidad de las mismas; los ensayos del hormigón en estado fresco tales como asentamiento, temperatura y contenido de aire se realizaron dentro de los 5 minutos posteriores a la obtención de la última muestra simple de hormigón. Luego de esto se continuó inmediatamente con el moldeo de los cilindros los cuales estuvieron listos dentro de los 15 minutos siguientes a la obtención de la muestra compuesta de hormigón.

5.3.2.1. Asentamiento

Inmediatamente luego de re-mezclar la muestra se procedió a realizar el ensayo de asentamiento cuyo equipo estaba listo y humedecido para luego proceder a llenar en 3 capas iguales al cono truncado el mismo que estaba asentado sobre una superficie plana del mismo material no absorbente, se compactó cada capa insertando la varilla verticalmente 25 veces en forma de espiral hacia el centro teniendo cuidado de apenas penetrar la capa anterior tal y como se describe en la norma NTE INEN 1 578:2010¹⁵. Finalmente se enrasó sobre el borde superior del molde, se presionó firmemente sobre la base y se limpió alrededor los restos de hormigón para continuar inmediatamente a realizar el levantamiento del molde de forma recta en un tiempo de 3 segundos; colocando el molde en forma invertida a un lado de la muestra para medir su revenimiento. Se colocó la varilla sobre la base invertida y con un flexómetro se midió la distancia desde el lado inferior de la varilla hasta el centro desplazado de la mezcla obteniendo un asentamiento de 15 cm. Si bien es cierto que el diseño es de 10 cm de asentamiento en obra, se debe tomar en cuenta el tiempo que transcurre durante la transportación del hormigón y que por tal

¹⁵ NTE INEN 1 578:2010 Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.

motivo la mezcla debe salir con un revenimiento mayor de planta, por lo que el resultado obtenido era el esperado.

Gráfica 5.1: Ensayo de Asentamiento (Cono de Abrams)



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

5.3.2.2. Temperatura

Se insertó un termómetro para medir la temperatura del hormigón cuidando que este rodeado con una capa gruesa de la mezcla en todos sus alrededores, se esperó alrededor de 2 minutos hasta que la medida se estabilizará y se anotó una temperatura de 32.2 °C

Gráfica 5.2: Toma de Temperatura en Hormigón

Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

5.3.2.3. Peso específico

Inmediatamente después del ensayo de revenimiento y de re-mezclar la muestra, se anotó el peso de la olla de Washington siendo este 2.475 Kg, luego se procedió a llenar la olla en 3 capas de igual volumen, compactando cada capa con 25 inserciones de varilla y 12 golpes con el mazo de goma, luego de compactar la última capa se procede a enrasar y limpiar los bordes de la olla. Finalmente se pesa la olla con la muestra, se resta el peso de la olla y se divide para el volumen de la misma para de esta manera obtener el peso específico del hormigón, siendo este en nuestro caso 2291 kg/m^3

Gráfica 5.3: Ensayo de Peso Específico



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

5.3.2.4. Contenido de aire

Luego de obtener el peso específico del hormigón se procede a realizar el ensayo de contenido de aire mediante el método de presión en donde se determina la cantidad de aire a partir de la variación del volumen de hormigón causada por la aplicación de una presión conocida. Se colocó la tapa constituida por un manómetro, dos llaves de purga, una bomba de aire, una válvula de purga, una válvula de aire y una cámara de presión. Luego de sujetar la tapa a la olla se procede a insertar agua a través de una de las llaves de purga

hasta que se pueda ver salir un chorro de agua por la otra llave, esto para ocupar el espacio con aire entre la mezcla y la tapa, se cierran las llaves y se ejerce una presión de aire por medio de la válvula de aire hasta que el manómetro llegue a la marca de calibración. Se procede a presionar la válvula de purga hasta que la lectura en el manómetro se estabilice y se toma la lectura como porcentaje de aire del hormigón. El contenido de aire para nuestro diseño fue de 2,2 %

Gráfica 5.4: Ensayo de Contenido de Aire



Fuente: Centro Técnico del Hormigón

Elaborado por: Los Autores

5.3.2.5. Moldeo de especímenes

Se moldearon 16 cilindros de 100 x 200mm que se distribuyeron de la siguiente manera: 8 cilindros fueron curados en condiciones estandarizadas para llevar un control de calidad del hormigón con código 23562; y 8 cilindros curados en condiciones iguales a la losa de pavimento siendo estos puestos al pie de la misma para llevar un control de resistencia en obra con código 23561. Los cilindros moldeados fueron ensayados a las edades de 1, 7, 14 y 28 días.

Gráfica 5.5: Moldeo de Cilindros 100 x 200 mm



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

5.3.3. Fundición de paño de losa de hormigón.

Como primer paso se construyó un encofrado de área 1x1m² y de 20cm de profundidad, a la cual se le colocó una sábana de plástico transparente para que la madera del encofrado no absorba agua de diseño de la mezcla.

Una vez realizado el muestreo del hormigón inmediatamente se procedió a fundir la losa en una sola capa.

Gráfica 5.6: Fundición de Losa de Pavimento



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Se colocaron dos termocuplas, una en el centro del pavimento y otra ubicada al lado derecho. Estas termocuplas son las que registrarán el historial de temperaturas que servirán para predecir la resistencia real del hormigón.

Luego, se vibró el paño de losa para que la mezcla de hormigón llene todos los espacios dentro del encofrado y la losa quede bien compactada.

Gráfica 5.7: Compactación de la Losa por Vibración



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Finalmente, se procedió a dar el acabado a la superficie de la losa y a cubrirla con plástico para que no pierda humedad durante el curado. Durante la prueba, la losa era irrigada todos los días con agua para mantenerla hidratada y luego se volvía a cubrir con el plástico.

Gráfica 5.8: Acabado final de la Losa.



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Gráfica 5.9: Losa protegida de la pérdida de humedad



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

5.3.4. Ensayos en estado endurecido del hormigón

5.3.4.1. Resistencia a la compresión

Una vez alcanzada la edad de rotura, se tomaban las probetas que se debían ensayar, tanto las de obra como las de curado estándar, al laboratorio. Se anotaban las medidas exactas del diámetro y la altura de cada cilindro utilizando un calibrador de vernier, además se anotaba también el peso de cada probeta.

Gráfica 5.10: Toma de Datos de Cilindros a Ensayar.



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Para el ensayo en la prensa se permite reemplazar el refrentado por el uso de almohadillas para refrentado según la norma ASTM C 1231 por lo que se procedía a colocar pads de neopreno sobre las caras del cilindro para que la carga se distribuya uniformemente sobre

toda la superficie, estos pads obedecen a la norma NTE INEN 1573 cuyas características se resumen en la siguiente Tabla.

Tabla XXX: Requerimientos para el uso de Neoprenos

Resistencia (MPa)	Dureza	No. De Usos
10 a 40	56	100
17 a 50	60	100
28 a 50	70	100
50 a 80	70	50

Fuente: ASTM C 1231

Elaborado por: Los autores

Cabe mencionar que las probetas se deben mantener húmedas utilizando cualquier método conveniente durante el periodo comprendido entre la remoción de almacenamiento húmedo y el ensayo. Se limpia las caras de contacto de los bloques superior e inferior de la prensa y del espécimen de ensayo y se coloca cuidadosamente alineado entre dichos bloques.

Gráfica 5.11: Cilindro ensayado a Compresión Simple



Fuente: Centro Técnico del Hormigón

Elaborado por: Los Autores

Los resultados obtenidos se describen en el subtema 5.4 “Comprobación De Resultados” y se comparan con la curva Resistencia – Madurez para su validación.

5.3.4.2. Resistencia a la compresión de núcleos calados

Como parte del control de calidad de la losa, se calaron núcleos de la losa de pavimento para ensayar a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días, de acuerdo a la norma ASTM C 42¹⁶.

Los núcleos fueron extraídos utilizando una caladora con broca de diamante de diámetro igual a 100 mm, que

¹⁶ ASTM C 42: Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete (Método de prueba estándar para la obtención y ensayo de Núcleos Perforados y Vigas Aserradas de Concreto)

fue colocada perpendicularmente sobre la superficie horizontal de la losa, de manera que su eje sea perpendicular a la capa de hormigón tal como se colocó originalmente y cuidando de no hacerlo en bordes del elemento construido.

Se extrajeron 2 núcleos por edad y el procedimiento se llevó a cabo un día antes del ensayo de rotura a la compresión. Una vez extraídos los núcleos se dejaban secar superficialmente, aproximadamente 10 minutos, y luego se colocaron en bolsas plásticas a una temperatura de 23°C hasta la fecha de rotura. El día de rotura se aserraban las caras del cilindro en caso de no mantener perpendicularidad una con otra para luego ser medidos y pesados. Los valores que deben anotarse son diámetro, altura y peso del núcleo. Luego, se realiza el ensayo a la compresión de los mismos; el procedimiento que se siguió fue el de la norma NTE INEN 1573 (**Véase 5.3.4.1**).

5.3.4.3. Resistencia a la compresión.

El hormigón representado por los núcleos se considera estructuralmente adecuado cuando el promedio de los núcleos es al menos el 85% de f'_c y ningún núcleo tiene una resistencia por debajo del 75% de f'_c , según la norma ASTM C42/C42M – 13¹⁷ ..

Gráfica 5.12: Núcleo calado de la Losa de Pavimento



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

5.3.4.4. Esclerometría

El ensayo de esclerometría fue otra medida tomada para el control de calidad de la losa además de la resistencia obtenida por los núcleos y el ensayo de ultrasonido a una

¹⁷ ASTM C42/C42M -13 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete1

edad de 28 días. Este método se llevó a cabo según la norma ASTM C 805¹⁸

El equipo utilizado para este ensayo fue un martillo para ensayos de hormigón Proceq - Digi-Schmidt modelo ND 5427, que es un dispositivo indicador que permite la lectura directa y la consulta de los resultados del ensayo. Con Digi-Schmidt, es muy sencillo ajustar varios parámetros como la dirección del impacto, el factor de forma y el factor de tiempo, así como la profundidad de carbonatación.

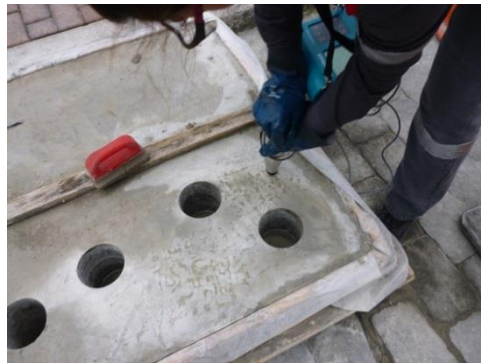
Antes de ser utilizado el equipo fue calibrado, luego se limpió la zona en donde se haría el ensayo y se dejó una superficie horizontal para luego empezar a realizar los impactos con el martillo. Se realizan 10 impactos, formando un rectángulo, sobre la superficie separados una distancia aproximada de 1 pulgada (2,5 cm). Estos valores se promedian y luego se utiliza la correlación Rebotes versus Compresión obtenida a partir de la investigación "Correlaciones entre ensayos destructivos y

¹⁸ ASTM C 805: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete (Método de prueba estándar para el número de rebote en un hormigón endurecido)

no destructivos para hormigones de alta resistencia con agregados calcáreos¹⁹.

La superficie del concreto es afectada por varias variables tales como el grado de saturación o la rugosidad en la superficie, lo que da resultados engañosos respecto a las propiedades del concreto dentro de la estructura.

Gráfica 5.13: Esclerometría realizada a la Losa de Pavimento



Fuente: Centro Técnico del Hormigón

¹⁹ Investigación realizada por las Ingenieras Karla Pamela Crespo León y Natividad Leonor García Troncoso en el Centro Técnico del Hormigón de Holcim Ecuador, la cual se basa en estudios realizados con varios diseños de hormigón que fueron sometidos a varios ensayos.

5.4. Comprobación de resultados

5.4.1. Especímenes curados en Obra

Los cilindros que fueron curados en obra se los mantuvieron en las mismas condiciones del pavimento. Ubicados al pie de la losa expuesto a las mismas condiciones ambientales. Los resultados que se obtuvieron se exponen en la siguiente Tabla:

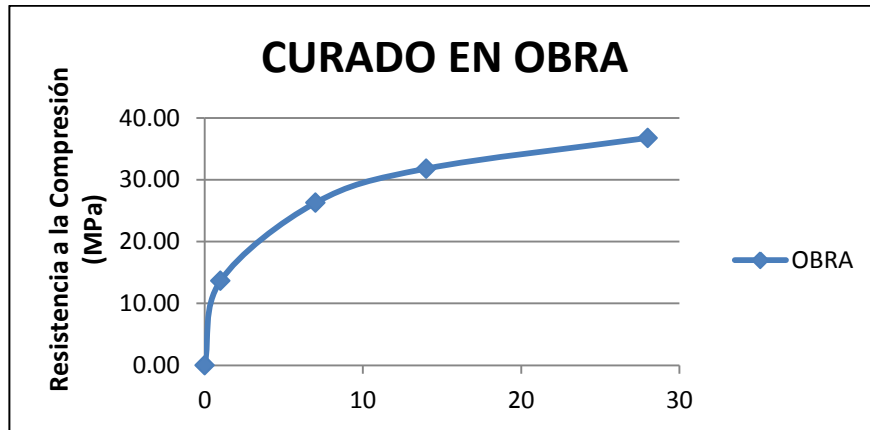
Tabla XXXI: Resistencia a la Compresión Curado en Obra.

RESISTENCIA A LA COMPRESION							
Fecha de moldeo: 8/may/2013							
OBRA							
FECHA DE ROTURA	EDAD [Días]	DIAMETRO [mm]	ALTURA [mm]	PESO [kg]	FUERZA [KN]	RESISTENCIA [MPa]	RESISTENCIA PROMEDIO [MPa]
09-may-13	1	101,0	203	3,686	111,1	13,88	13,66
09-may-13		100,8	203	3,681	107,2	13,44	
15-may-13	7	101,0	203	3,656	209,9	26,20	26,28
15-may-13		101,0	204	3,633	211,2	26,36	
22-may-13	14	101,0	202	3,622	259,2	32,35	31,80
22-may-13		101,0	203	3,622	250,3	31,24	
05-jun-13	28	100,85	203	3,621	295,6	37,01	36,76
05-jun-13		100,62	203	3,621	290,4	36,52	

Fuente: Prensa Hidráulica
Elaborado por: Los Autores

De los valores obtenidos a partir del ensayo de Resistencia a la compresión se pudo dibujar la siguiente grafica que muestra la tendencia del desarrollo de Resistencia para nuestro diseño de hormigón en condiciones de obra.

Gráfica 5.15: Desarrollo de Resistencia de cilindros en Obra



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Gráfica 5.16: Cilindros y Pavimento en mantenidos Obra



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

5.4.2. Control de Calidad

En conjunto con los cilindros que fueron curados en obra, también se tomaron especímenes para control de calidad, estos fueron mantenidos en el cuarto de curado bajo condiciones especificadas en las normas.

Los resultados que se obtuvieron de ensayar los cilindros de control de calidad a Compresión Simple fueron los mostrados en la siguiente Tabla.

Tabla XXXII: Resistencia a la Compresión curado en Agua.

RESISTENCIA A LA COMPRESION

Fecha de moldeo: 8/may/2013

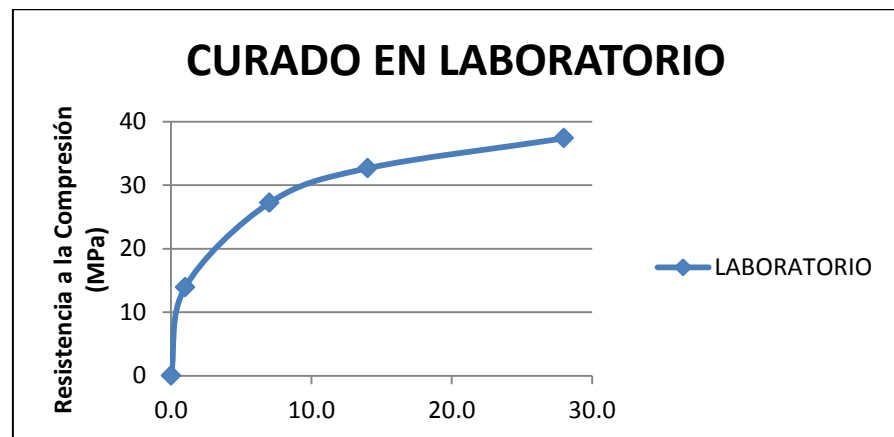
CILINDROS CON CURADO ESTANDAR EN AGUA

FECHA DE ROTURA	EDAD [Días]	DIAMETRO [mm]	ALTURA [mm]	PESO [kg]	FUERZA [KN]	RESISTENCIA [Mpa]	RESISTENCIA PROMEDIO [Mpa]
09-may-13	1	101,1	203,0	3,666	111	13,82	13,91
09-may-13		100,5	203,0	3,634	110,9	13,99	
15-may-13	7	101,0	202,0	3,699	221,1	27,60	27,19
15-may-13		101,0	204,0	3,710	214,6	26,79	
22-may-13	14	101,0	203,0	3,711	261,0	32,58	32,66
22-may-13		101,0	204,0	3,716	262,2	32,73	
05-jun-13	28	101,0	201,0	3,667	297,1	37,11	37,37
05-jun-13		101,0	202,0	3,709	301,4	37,63	

Fuente: Prensa Hidráulica.
Elaborado por: Los Autores.

Para tener una mejor idea de la evolución de la resistencia en el hormigón en el control de calidad, se graficó la curva resistencia versus tiempo que a continuación se presenta.

Gráfica 5.17: Desarrollo de la Resistencia de Cilindros curados en Laboratorio



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Gráfica 5.18: Cilindros curados en Laboratorio



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

5.4.3. Núcleos de Pavimento

Como parte de nuestra investigación se consideró necesario, además de moldear cilindros para curado en obra, también obtener núcleos de concreto del paño de pavimento para de esta manera hacer una mejor comparación y comprobar los resultados obtenidos del Método de Madurez. A continuación se presentan los resultados:

Tabla XXXIII: Resistencia a la Compresión de Núcleos de Pavimentos

RESISTENCIA A LA COMPRESION DE NUCLEOS DE PAVIMENTO

Fecha de moldeo: 8/may/2013

Procedimiento: ASTM 642; ACI 214.4R-10

EDAD [Días]	DIAMETRO [mm]	ALTURA [mm]	PESO [kg]	FUERZA [KN]	RESISTENCIA CALCULADA [MPa]	RESISTENCIA PROM. (MPa)
7	102	198	3,576	204,5	25,5	25,5
	102	199	3,568	204,3	25,4	
14	101	199	3,608	245,8	31,1	29,9
	101	199	3,594	228,5	28,8	
28	102	196	3,561	277,0	34,7	34,1
	101	197	3,571	266,8	33,6	

Fuente: Prensa Hidráulica.
Elaborado por: Los Autores.

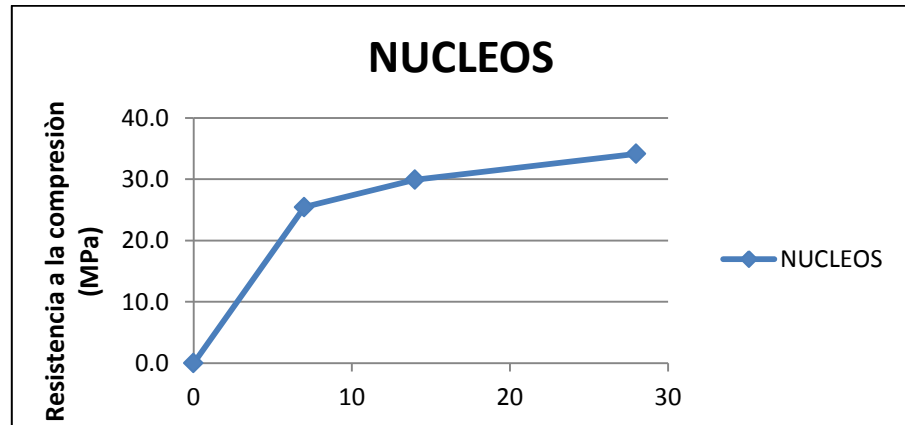
De acuerdo a la norma ASTM 642 ningún resultado individual de resistencia de los núcleos calados puede ser menor que el $0,75f'c$ a los 28 días, y ningún promedio de las resistencias puede ser menor que $0,85f'c$ a los 28 días.

c. obra	$f'c = 36.76$	$0,75f'c =$	27.6	$0,85 f'c =$	32.1
---------	---------------	-------------	------	--------------	------

Como se puede observar en los resultados de la Tabla, ninguno es menor que los límites establecidos por la norma, por lo que los resultados pueden ser considerados como satisfactorios.

Al igual que con los cilindros mantenidos en obra y curado estándar también se han graficado los datos de resistencia de los núcleos calados, a continuación se presenta la gráfica.

Gráfica 5.19: Gráfica Resistencia a la Compresión vs. Edad de Núcleos Calados



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Gráfica 5.20: Calado de Núcleos en la Losa de Pavimento

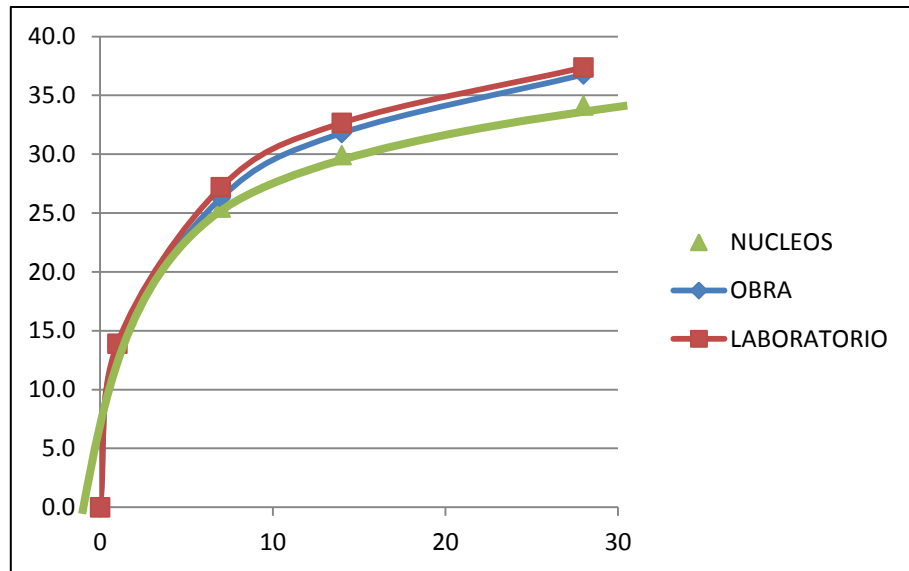


Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Para realizar una comparación de los resultados, se dibujaron en una sola gráfica las curvas de resistencia versus tiempo de los

cilindros mantenidos en obra, en laboratorio y de los núcleos calados.

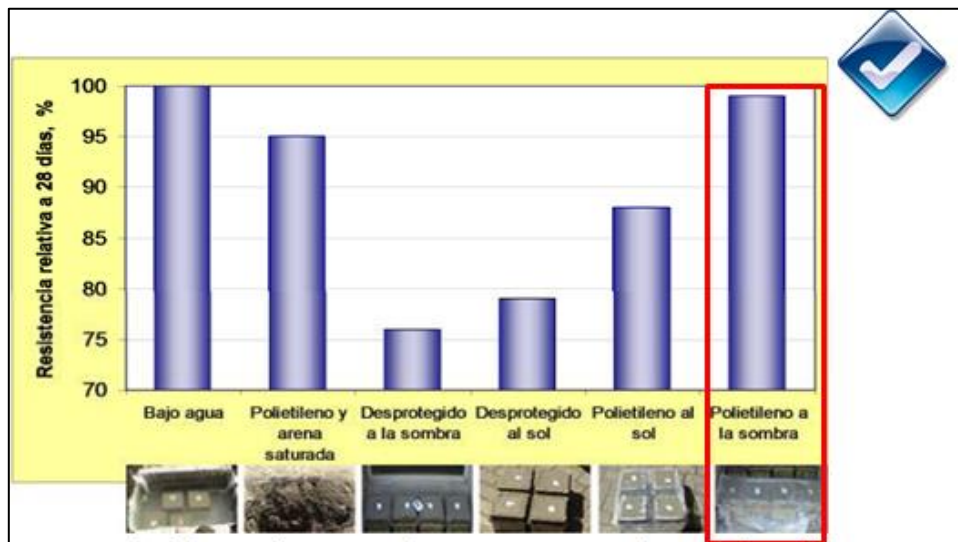
Gráfica 5.21: Gráfico Comparativo de la influencia del curado en el Desarrollo de la Resistencia.



Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

A continuación se muestra una gráfica realizada por el grupo Polpaico en Chile donde se muestra como la resistencia se ve afectada cuando se modifican las condiciones de curado.

Gráfica 5.22: Influencia de las condiciones de Curado en la Resistencia a los 28 días



Fuente: Grupo Polpaico Chile

El curado realizado con plástico (obra) tiene 2% menos de resistencia con respecto a los cilindros curados en agua esto se puede explicar por una pérdida mínima de humedad. Sin embargo, los resultados obtenidos fueron muy aproximados y se consideran correctos.

Estimación de la Resistencia de la Losa de Pavimento Utilizando la Ecuación de la Curva de Madurez.

Se quiso corroborar que los resultados obtenidos con la curva de madurez sean efectivamente similares a los resultados que se obtuvieron del hormigón mantenido en obra, es por eso que,

comparamos los resultados que se obtienen de la ecuación de madurez con los que se obtuvieron al ensayar los cilindros en obra y los cilindros calados del pavimento. En la siguiente Tabla se muestra los índices de madurez para las edades de 1, 7, 14 y 28 días.

Tabla XXXIV: Índices de Madurez de Losa de Pavimento

Edad (días)	Índice de Madurez (°C-Días)
1	30
7	173
14	338
28	640

Fuente: Centro Técnico del Hormigón.
Elaborado por: Los Autores.

Usando la ecuación de la curva de Resistencia vs. Madurez se tiene que la resistencia sería:

Tabla XXXV: Estimación de la Resistencia de cilindros con respecto al Índice de Madurez

Edad (Días)	Resistencia a la Compresión De Cilindros (MPa)
1	14,9
7	29,7
14	35,3
28	40,6

Fuente: Centro Técnico del Hormigón.
Elaborado por: Los Autores.

Ahora se comparan la resistencia a la compresión simple obtenida mediante el método de madurez y la obtenida mediante ensayos:

Tabla XXXVI: Dispersión de la Resistencia Promedio con respecto al Índice de Madurez y de Cilindros de obra.

Edad (Días)	Resistencia Usando Madurez (MPa)	Resistencia Promedio de Cilindros de obra (MPa)	Dispersión (%)
1	14,9	13,7	8%
7	29,7	26,3	11%
14	35,3	31,8	10%
28	40,6	36,8	9%

Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

La norma ASTM C 1074 indica que si la dispersión supera consistentemente el 10%, una nueva relación resistencia – madurez se debe desarrollar, caso contrario la curva se acepta.

5.4.4. Esclerometría en Paño de Pavimento y en Núcleos

Como complemento para la investigación, se procedió también a realizar un ensayo con el Esclerómetro al paño de pavimento con el fin de obtener más valores con los cuales comparar los resultados.

Las gráficas mostradas a continuación son las obtenidas mediante el software del Esclerómetro, en las gráficas se observa el número de rebotes que se produjo en cada medición; en cada prueba se

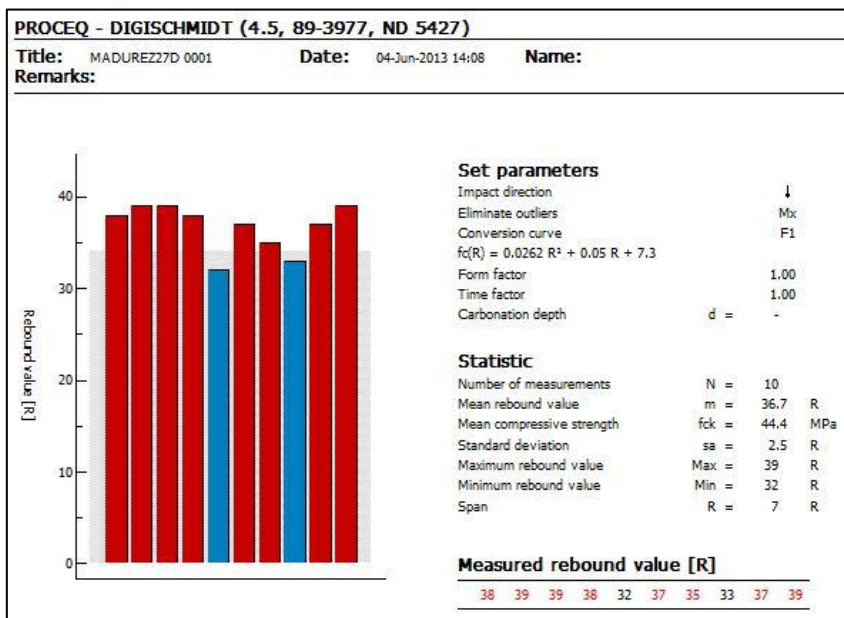
realizaron 10 mediciones, las gráficas obtenidas por el esclerómetro muestran el número de rebotes que arrojaron dos pruebas en el paño de pavimento:

Gráfica 5.24: Prueba de Esclerómetro en Losa de Pavimento



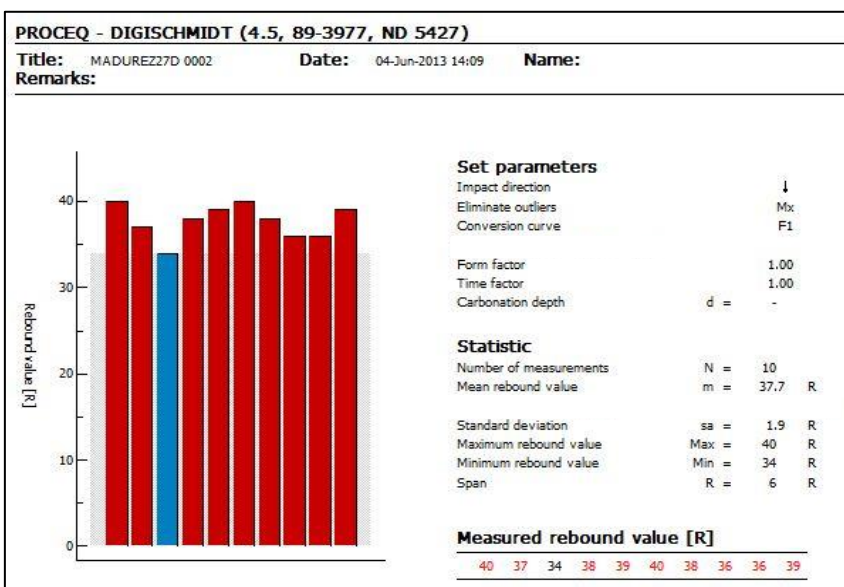
Fuente: Centro Técnico del Hormigón
Elaborado por: Los Autores

Gráfica 5.25: Gráfica de Numero de Rebotes obtenidos por el Esclerómetro en Prueba Número 1



Fuente: PROCEQ DIGISCHMIDT

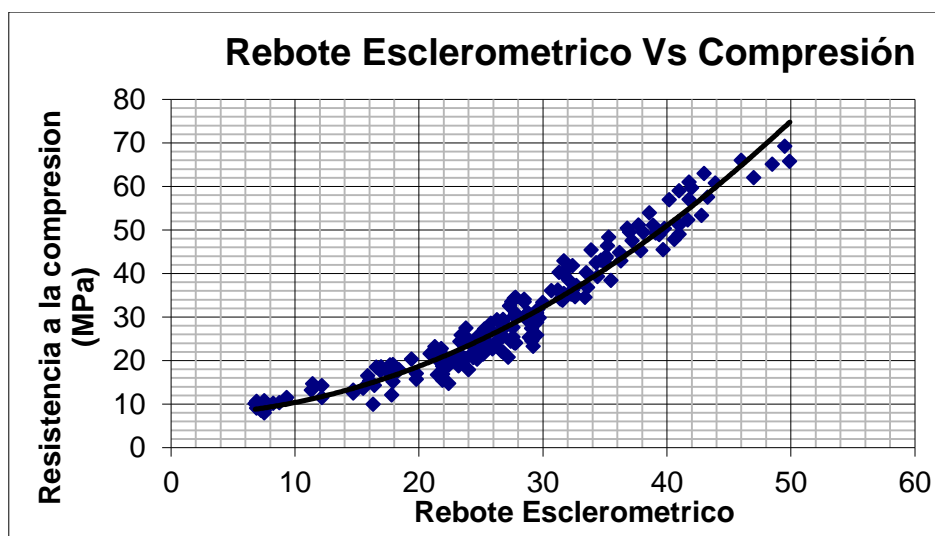
Gráfica 5.26: Gráfica de Numero de Rebotes obtenidos por el Esclerómetro en Prueba Número 2



Fuente: PROCEQ DIGISCHMIDT

Con el Número de Rebotes Establecido se procedió a obtener la resistencia usando la correlación Rebotes versus Resistencia a la compresión simple, la cual fue obtenida de la investigación “Correlaciones entre ensayos destructivos y no destructivos para hormigones de alta resistencia con agregados calcáreos” realizada por las ingenieras Karla Pamela Crespo León y Natividad Leonor García Troncoso en el Centro Técnico del Hormigón de Holcim Ecuador, la cual se basa en estudios realizados con varios diseños de hormigón que fueron sometidos a Esclerometría.

Gráfica 5.27: Gráfica Rebote Esclerométrico vs Resistencia a la Compresión



Fuente: “Correlaciones entre ensayos destructivos y no destructivos para hormigones de alta resistencia con agregados calcáreos”

Autores: Karla Pamela Crespo León y Natividad Leonor García Troncoso

Como se puede apreciar en la gráfica, los estudios realizados con varios diseños de hormigón arrojaron un límite superior y uno inferior de resistencia a la compresión, a razón de esto, con el número promedio de rebotes en cada prueba, se ha aproximado la resistencia usando el límite inferior como un dato conservador. Cabe señalar que se compara los valores de la esclerometría con los cilindros curados en laboratorio, porque la gráfica de la correlación a la que se hace referencia se construyó con valores obtenidos de ensayar cilindros curados bajo condiciones estándares de laboratorio.

Tabla XXXVII: Resultados Obtenidos del Ensayo de Esclerometría

RESULTADOS DE ESCLEROMETRIA		
Valor de Rebote Promedio en Prueba n° 1	36,7	MPa
Valor de Rebote Promedio en Prueba n° 2	37,7	MPa
Promedio de Números de Rebote	37,2	MPa
Resistencia correlación lim inferior	37,0	MPa
Resistencia cilindros curado estándar	37,4	MPa

Fuente: Esclerómetro
Elaborado por: Los Autores.

CAPITULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

1. La Estimación de la Resistencia a la Compresión mediante el Método de Madurez nos ofrece resultados más confiables y continuos, sin embargo se debe acotar que el método es válido solo para una dosificación de hormigón, si existen cambios en la dosificación se debe realizar nuevamente el registro de temperatura y se debe construir una nueva Curva Índice de Madurez vs. Resistencia a la compresión Simple.
2. El ensayo de tiempo de fraguado nos ayudó a encontrar la resistencia a la penetración del mortero, al finalizar el ensayo se pudo observar en las gráficas obtenidas durante las 8

primeras horas tanto en las temperaturas de 18, 30 y 50°C la resistencia no supera los 5 MPa, por lo que se concluye que en ninguna de las temperaturas el mortero presentó su inicio de fraguado antes de las primeras 8 horas. A medida que aumenta el tiempo, las gráficas tienen un comportamiento exponencial diferente, de acuerdo a cada temperatura, siendo la gráfica de 50°C la que alcanza el fin de fraguado con mayor rapidez.

3. Con respecto al cambio de agujas para cada temperatura y al tiempo transcurrido, la primera aguja de 1" demoró más tiempo para alcanzar las 80lbs, mientras que a medida que se hacía el cambio de agujas de menor diámetro, el tiempo en que se alcanzaban las 80lb de fuerza se acortaba. Por lo que se concluye que en primera instancia el fraguado del hormigón es muy lento y conforme pasa el tiempo se acelera.

4. En la sección 4.2.3 se obtuvo una Temperatura Datum de 1,2 °C, la norma ASTM C1074-10 señala que para hormigones de alta resistencia se puede usar generalmente una temperatura Datum de 0°C, esta norma también aconseja que si requiere

mayor precisión a la hora de estimar la resistencia a la compresión se debe calcular la temperatura Datum tal como se la hizo en esta investigación. Considerando que se trabajó con un hormigón para pavimento de 4,5 MPa de Módulo de Rotura con una resistencia a la compresión a los 28 días de 38,58 MPa tomado de la sección 4.4, se puede constatar que la temperatura Datum obtenida es prácticamente la misma temperatura que aconseja la norma.

5. Al tomar el historial de temperaturas y plasmarlas en un gráfico Temperatura VS Tiempo nos damos cuenta que durante las primeras 48 horas se dan picos y que después de este tiempo la temperatura se estabiliza. Se concluye que este fenómeno ocurre ya que durante las primeras horas se dan las mayores reacciones químicas las cuales empiezan a penas el cemento y el agua entran en contacto dando inicio a la etapa de fraguado en el hormigón. Etapa en la cual el hormigón tiene elevadas temperaturas internas ya que se da de manera rápida, contrario a la etapa que le continúa en donde las reacciones se dan de manera mucho más lenta, siendo esta la etapa de endurecimiento en la cual se puede

observar que la temperatura interna se estabiliza y ya no sufre picos.

6. La curva de Índice de Madurez vs. Resistencia a la Compresión Simple que se desarrolló en esta investigación en la sección 4.4 dio valores de resistencia para 1, 3, 7,14 y 28 días. Al utilizar esta curva para comparar los resultados del pavimento en obra con dicha curva nos damos cuenta que para edades tempranas (7 días) la dispersión es más alta (11%), esto se debe principalmente a las variaciones de temperatura.
7. Los resultados obtenidos a partir del método de madurez se aceptan ya que la norma indica que la dispersión entre la resistencia obtenida de cilindros ensayados y la obtenida mediante el método aplicado no supere consistentemente el límite establecido.
8. El esclerómetro no arroja un valor aproximado de la resistencia real del elemento, ya que el resultado del ensayo depende de muchos factores como ubicación del martillo, de

la rugosidad de la superficie, de la energía que se aplica para generar los rebotes, de la perpendicularidad del martillo con el elemento, entre otros factores que al final pueden arrojar resultados variables.

6.2.RECOMENDACIONES

1. El Método de madurez es un método muy útil y sencillo que se puede utilizar en cualquier tipo de obra. Lo que se recomienda es que si va a ser utilizado en alguna obra pequeña, se utilice un diseño de hormigón del cual ya se tenga calculada la relación Resistencia VS Madurez ya que el tiempo que conlleva obtener este gráfico es significativo comparado con el tiempo que conllevaría realizar obras pequeñas.
2. Para realizar el ensayo de tiempo de fraguado, se colocó las vigas de hormigón en cuartos a las temperaturas de 18°C y 25°C, y en un horno para la temperatura de 50°C, una recomendación muy importante es asegurarse que estos espacios estén protegidos de cambios de temperatura y de corrientes de viento, se debe procurar en lo más posible que estos espacios sean herméticos, en especial el horno donde reposaron las vigas a 50°C; y a su vez que el tamaño del horno

sea lo suficientemente grande para no alterar la muestra de la viga con respecto a sus dimensiones.

3. Para realizar el ensayo de tiempo de fraguado, al momento de introducir las agujas, se recomienda se coloque la viga en una superficie lo más plana y uniforme posible, si la superficie donde se realiza el ensayo es una superficie irregular, la lectura que se obtenga será menor a la real. En el caso de las vigas que se mantuvieron en el horno a 50°C, estas tenían que retirarse del horno cada vez que se realizaba una medición, se recomienda que al momento de manipularlas se evite golpearlas o vibrarlas exageradamente.

4. Se recomienda que los “datalogger” (dispositivos para registrar temperatura) que se encuentran en la intemperie sean protegidos del agua y de la humedad, en nuestro caso para cumplir este propósito se cubrió los logger con fundas plásticas y se constató que estuvieran bien amarradas para evitar que el agua de lluvia se filtre y cause daños en el dispositivo. También es posible que en lugar de fundas se use recipientes herméticos de plástico para proteger estos dispositivos.

5. La temperatura Datum que se obtuvo en los ensayos fue de 1,2°C, la temperatura Datum que se sugiere en la norma ASTM C1074-10 Standard Practice for Estimating Concrete Strength by Maturity Method es de 0°C, como se puede observar la temperatura datum obtenida básicamente se ajusta bastante a la sugerida por la norma, por lo que para investigaciones futuras en las cuales se trabaje con hormigones para pavimentos se sugiere asumir la temperatura de 0°C que aconseja la norma.

6. Como se pudo observar en la sección 4.4 los resultados de la Curva Índice de Madurez vs Resistencia a la Compresión, la mayor dispersión entre esos datos y los obtenidos de ensayar los cilindros a compresión ocurre en las primeras horas, por lo que se recomienda tomar las medidas necesarias para controlar la liberación de calor de hidratación descontroladamente que puede traer otras consecuencias tales como retracción plástica.

7. Se recomienda cubrir la losa con un plástico que pueda no solo mantenerla hidratada y protegida de la pérdida de humedad, sino que también debe protegerla de los rayos solares. En la

investigación de campo se llevó a cabo un método de curado en el cual el hormigón se cubría con plástico para mantener hidratada la losa sin que pierda humedad, nos basamos en la investigación que fue realizada por el grupo Polpaico en Chile donde se muestra como la resistencia se ve afectada cuando se modifican las condiciones de curado.

8. En la losa de pavimento que se fundió para simular un pavimento en obra, se colocaron dos termocuplas, una en una esquina y la otra en el centro, sin embargo dependiendo de qué dato se quiera obtener se recomienda colocar la termocupla en diferentes lugares
 - En caso que se requiera la resistencia promedio del pavimento, se recomienda colocar la termocupla en la mitad de la losa.
 - Si lo que se quiere es determinar el tiempo en el que las juntas se cerrarán se recomienda colocar la termocupla más cerca de la superficie, aproximadamente a 3 centímetros

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM C 42: Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete (Método de prueba estándar para la obtención y ensayo de Núcleos Perforados y Vigas Aserradas de Hormigón).
2. ASTM C 597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete (Método de prueba estándar para la velocidad de onda a través del hormigón)
3. ASTM C 805: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete (Método de prueba estándar para el número de rebote en un hormigón endurecido).
4. ASTM C1231: Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders (Práctica estándar del uso de neopreno para la determinación de la Resistencia a la compresión del hormigón endurecido).
5. ASTM C172: Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete (Práctica estándar para muestreo de concreto recién mezclado).
6. ASTM C31: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field (Práctica estándar para moldeo y curado de especímenes de prueba en campo).
7. ASTM C42: Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete (Método de prueba estándar para obtener y ensayar núcleos perforados y vigas aserradas de hormigón).
8. ASTM C94: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete (Especificación estándar para homrigón premezclado).
9. ASTM C1074: Práctica estándar para estimar la resistencia del hormigón por el método de madurez
10. ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (Método de prueba estándar para la determinación de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón).
11. ASTM C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete (Método de prueba estándar para la determinación de la Densidad, Rendimiento y Contenido de aire (gravimétrico) del homrigón).

12. ASTM C143: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (Método de prueba estándar para el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico).
13. ASTM C171: Standard Specification for Sheet Materials for Curing Concrete (Especificación estándar para materiales de cubierta para curado del hormigón).
14. ASTM C873: Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds (Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de cilindros de hormigón elaborados in situ en moldes cilíndricos).
15. ASTM C192: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (Práctica estándar para preparación y curado de especímenes en laboratorio).
16. ASTM C232: Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method (Método de prueba estándar para contenido de aire del hormigón recién mezclado por el método de presión).
17. ASTM C403: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by penetration resistance (Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado de una mezcla de hormigón por resistencia a la penetración).
18. ASTM C597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete (Método de prueba estándar de ultrasonido a través del hormigón).
19. ASTM C1064: Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete (Método de prueba estándar para determinar la temperatura del hormigón recién mezclado de cemento hidráulico).
20. NTE INEN 1 578:2010 Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.
21. NTE INEN 1 763:2010 Hormigón de cemento hidráulico. Muestreo.
22. NTE INEN 1 576:2011 Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayos.
23. NTE INEN 1 763:2010 Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.
24. NTE INEN 1 855:2010 Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón.

25. Adecuada aplicación del control térmico y de madurez del concreto (calorimetrías del concreto) en la determinación de tiempos de desmolde y descimbre en vivienda, Rodrigo N. Quimbay Herrera.
26. Diario “La Razón” Argentina 22 de marzo del 2012, Título del Artículo “6 Obreros mueren en construcción”.
27. Correlaciones entre ensayos destructivos y no destructivos para hormigones de alta resistencia con agregados calcáreos, Karla Pamela Crespo León y Natividad Leonor García Troncoso (2009), Centro Técnico del Hormigón de Holcim Ecuador, Guayaquil.
28. Tiempo de fraguado del hormigón, María Anabela Gabalec (2008), Buenos Aires.
29. Determinación del tiempo de fraguado inicial y final del cemento, Jose Simeon Cañas, Universidad centroamericana, El Salvador.
30. Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Parte 2: implementación industrial, J. Puig Montraveta, D. Maso Gamell, J. A. Ortiz Lozano, A. C. P. dos Santos, A. Aguado de Cea, Abril 2010
31. CIP-39 Madurez del Concreto, Información Técnica preparada por la National Ready Mixed Concrete Association, 900 Spring St., Silver Spring, MD 20910. www.nrmca.org.
32. Aplicación del ensayo de madurez a pavimentos de hormigón, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata, centro de investigaciones viales área estructuras y materiales de construcción, Verónica Mechura.
33. El método de madurez del hormigón en pavimentos rígidos construidos en la zona del altiplano, Rosendo Soruco, Gerente técnico - Instituto boliviano del cemento y hormigón - La Paz, Bolivia.
34. Tesis doctoral, Capítulo 7, Propuesta metodológica para la optimización de cemento.