

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**“DETERMINACION DE LA RESISTENCIA DEL  
CONCRETO A EDADES TEMPRANAS BAJO LA NORMA  
ASTM C 1074, EN VIVIENDAS DE CONCRETO  
COLADAS EN EL SITIO”**

PRESENTADO POR:

**OSCAR ERNESTO AGUILAR BELTRÁN  
EDWIN ADIEL RODRÍGUEZ MEJÍA  
MARTÍN JOSÉ LEONEL SERMEÑO MONGE**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2009

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

SECRETARIO GENERAL :

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO :

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

DIRECTOR :

**MSc. ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO CIVIL**

Título:

**“DETERMINACION DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO A  
EIDADES TEMPRANAS BAJO LA NORMA ASTM C 1074, EN  
VIVIENDAS DE CONCRETO COLADAS EN EL SITIO”**

Presentado por:

**OSCAR ERNESTO AGUILAR BELTRÁN  
EDWIN ADIEL RODRÍGUEZ MEJÍA  
MARTÍN JOSÉ LEONEL SERMEÑO MONGE**

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docentes Directores :

**ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA**

**ING. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA RODRÍGUEZ**

San Salvador, Julio de 2009

Trabajo de Graduación Aprobado por:

DOCENTES DIRECTORES :

**ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA**

**ING. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA RODRÍGUEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer a las instituciones y profesionales que nos apoyaron antes y durante el desarrollo de este proyecto, que ha finalizado dejando una semilla que esperamos sea de mucha utilidad para todas las instituciones y personas involucradas en este bonito y amplio mundo de la ingeniería.

A la Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, ya que a través de los maestros ha permitido culminar esta carrera porque siempre intentaron darnos todo sus conocimientos, de manera muy especial a la Ingeniera Lesly Mendoza por haber sido además de maestra una amiga que nos impulso a seguir adelante, por tener la suficiente paciencia para saber guiarnos, gracias.

Al Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto a través de su director ejecutivo Ing. Rafael González por haber confiado en nosotros y poner a disposición el equipo, instalaciones, personal administrativo y de laboratorio.

Al Ingeniero Carlos Quintanilla por habernos dedicado parte de su valioso tiempo y habernos acompañado a lo largo de esta investigación. Gracias.

Al personal destacado en el proyecto “Los Almendros” de la empresa Roble por habernos abierto las puertas y colaborar en esta investigación.

***Oscar, Adiel, Martín***

## **DEDICATORIA**

### **A DIOS TODO PODEROSO:**

Por darme primeramente la vida, fuerzas en mis momentos de flaqueza, bendiciones en mis momentos de escasez, por gobernar mi vida y guiar mis pasos, por haberme dado una familia hermosa y poner amigos sinceros a mí alrededor y por haberme permitido alcanzar esta meta.

### **A MIS PADRES:**

Ana Alicia Beltrán y Rubén Aguilar por su amor incondicional, por su apoyo, sus consejos, su disciplina y todo sacrificio que realizaron para forjarme. Los amo y agradezco al Señor por sus vidas.

### **A MI HERMANO:**

Elmer por estar siempre conmigo en todo momento, y por que la gracia del Señor siempre ha estado en su vida mostrándome su apoyo en todo.

### **A MIS ABUELOS:**

Isaura Beltrán, Orbelina Aguilar y José Francisco Barahona (Q.D.D.G.) que con su determinación, y trabajo son de inspiración en mi vida y son el mayor ejemplo de sacrificio en mi vida.

### **A MIS TÍOS:**

En general que en cada momento de mi vida han estado apoyándome, y con sus consejos y amor han fortalecido mi vida.

### **A MIS PRIMOS:**

Gracias Primos por estar ahí alegrando mi vida y llenando de felicidad cada momento y por todo su apoyo en mi carrera.

### **A MIS COMPAÑEROS DE TESIS:**

Adiel y Martín, gracias por su amistad primeramente y por escogerme en este trabajo, que con dificultades logramos llegar a esta meta, pero con empeño entre todos logramos finalizarla.

### **A TODOS MIS AMIGOS DE LA UNIVERSIDAD:**

Son muchos y seria difícil mencionarlos a todos, pero sin ustedes no habría logrado terminar mi carrera, gracias por su ayuda, todas esas noches de desvelos y todas las posadas que me brindaron, a ustedes les dedico me trabajo de graduación.

**OSCAR ERNETO AGUILAR**

## DEDICATORIA

**A DIOS** Por ser esa energía que me inyecta fe y esperanza.

A mi madre **María Julia Rodríguez**, por todos los sacrificios del día a día, por enseñarme a luchar y seguir adelante, a mi padre **Gregorio Mejía** por educarme con la dureza y cariño que solo un padre puede dar, gracias padres ya que sin ustedes ésta meta no hubiera sido posible, gracias por toda su paciencia, por anteponer mis necesidades a las suyas, por educarme de tal manera que pudiera sobrellevar la distancia en mi carrera.

**A CARLOS EDUARDO** Por tener toda la paciencia y poder hacer este esfuerzo también suyo, gracias hermano.

**A VIRGINIA** Por ser una gran persona por todo el apoyo que me has brindado en todo momento, te amo, gracias por ser como eres.

**A MIS TÍOS** Por el apoyo para seguir adelante.

**A MIS ASESORES** ya que también fueron mis amigos, gracias por las oportunidades brindadas tanto en lo educativo como laboral. Gracias Ing. Lesly e Ing. Quintanilla.

*“Existen casos donde las palabras se quedan vacías y mucho más unos renglones para plasmar realmente que tan agradecido se puede estar con los demás. Es por ello que estas líneas posiblemente no reflejen lo agradecido que estoy”.*

**EDWIN ADIEL RODRÍGUEZ MEJÍA**

## **DEDICATORIA**

### **A MIS PADRES:**

José Leonel Sermeño Herrera y Morena de la Cruz Monge, que en todo momento han estado a mi lado apoyándome; por brindarme amor constante e incondicional, por haberme inculcado valores que me alimentaron durante mi carrera. Son mi ejemplo de vida.

### **A MIS HERMANOS:**

Ely, Morena, Heidy y Ángel, por ser mis apoyos en los momentos precisos, por brindarme su amor y consejos. Gracias por todo.

### **A MIS SOBRINOS:**

Katherine y Alejandro por la alegría que inyectan en mi vida. Los quiero mucho.

### **A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS:**

Por todas las Experiencias que compartimos, los desvelos, los triunfos y fracasos en el Largo proceso de la carrera; el Saber que no estuve solo me llena de Alegría. Muchas Gracias....

**MARTÍN JOSÉ LEONEL SERMEÑO MONGE**

## INDICE DE CONTENIDO

<b>Prólogo .....</b>	<b>18</b>
<b>CAPITULO I.....</b>	<b>19</b>
<b>1 Anteproyecto de la investigación .....</b>	<b>20</b>
1.1 Antecedentes.....	20
1.2 Planteamiento del problema .....	22
1.3 Objetivos .....	24
1.4 Alcances.....	25
1.5 Limitaciones.....	26
1.6 Justificaciones .....	27
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>29</b>
<b>2 Marco Teórico.....</b>	<b>30</b>
2.1 Influencia de los componentes del concreto en la generación de calor y su relación con la madurez del concreto.....	30
2.1.1 Compuestos químicos en el cemento portland. ....	31
2.1.2 Etapas de la hidratación. ....	33
2.1.3 Tipos de cemento. ....	36
2.1.4 Agregados. ....	40
2.1.5 Agua de mezclado. ....	43
2.1.6 Diseño de mezcla, dosificación y mezclado del concreto.....	46
2.1.7 Colocado y acabado del concreto.....	55
2.1.8 Curado del concreto. ....	56
2.1.9 Curva teórica de generación de calor del concreto .....	58
2.2 Evolución de los cambios de estado del concreto fresco a través del tiempo.....	61

2.2.1	Estudio de los cambios de estado del concreto .....	62
2.2.2	Limites de los estados del concreto fresco .....	66
2.2.3	Rigidización del concreto a edades tempranas.....	71
2.2.4	Ensayos al concreto fresco.....	73
2.2.5	Resistencia del concreto.....	80
2.3	Madurez del concreto.....	81
2.3.1	Definición de madurez .....	81
2.3.2	Reseña histórica y antecedentes del método de madurez .....	82
2.3.3	Fundamentos teóricos del método de madurez .....	87
2.3.4	Normativa estándar para la determinación de la madurez .....	100
2.3.5	Equipos para medición de madurez.....	103
2.3.6	Otros ensayos útiles para la determinación de la resistencia del concreto.....	107
2.4	Viviendas coladas en el sitio – Aplicación del método de madurez...	110
2.4.1	Antecedentes del sistema de casas coladas en el sitio.....	110
2.4.2	Proceso constructivo sugerido por el comité ACI 332 .....	112
2.4.3	Normativa salvadoreña para viviendas en El Salvador .....	119
<b>CAPITULO III .....</b>		<b>125</b>
<b>3</b>	<b>Estudio de la evolución de resistencia a edades tempranas en un sistema de paredes de concreto coladas en el sitio.....</b>	<b>127</b>
3.1	Descripción y Ubicación del Proyecto habitacional “Los Almendros” ..	128
3.2	Elaboración de especímenes para la determinación de las características físicas y mecánicas de la mezcla de concreto utilizada en el proyecto “Los Almendros” .....	129
3.3	Diseño de mezcla de concreto a partir de las propiedades físicas y mecánicas, observadas del muestreo de especímenes y caracterización de agregados utilizados en el proyecto “Los Almendros” .....	133
3.3.1	Ensayos para la caracterización de agregados.....	134
3.3.2	Determinación del proporcionamiento de la mezcla de concreto ..	140

3.4 Metodología para la obtención de Madurez y Calibración de la mezcla diseñada, para la estimación de la resistencia del concreto en el sistema de paredes coladas en el sitio.....	142
3.4.1 Metodología para la determinación de la madurez del concreto ...	142
3.4.2 Metodología para la determinación de la temperatura de referencia o Datúm de temperatura .....	144
3.4.3 Método de cálculo de la madurez del concreto .....	150
3.4.4 Calibración de la mezcla de acuerdo a la norma ASTM C1074 ....	153
3.5 Estimación de la resistencia del concreto por el Método de Madurez en un sistema de paredes coladas en el sitio.....	173
3.5.1 Registro de valores de madurez y resistencia del sistema de paredes coladas. ....	186
3.5.2 Ensayos destructivos y no destructivos para la estimación de la evolución de resistencia del concreto del sistema de paredes.....	190
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>207</b>
<b>4 Análisis de resultados .....</b>	<b>208</b>
4.1 Validación del método de madurez .....	209
4.2 Gráficos obtenidos por el método de madurez.....	213
4.2.1 Gráficos de valores de temperatura.....	213
4.2.2 Gráficos de valores de madurez .....	218
4.2.3 Gráficos de valores de resistencia .....	221
4.3 Gráficos obtenidos a partir de cilindros curados en campo.....	226
4.4 Gráficos obtenidos a partir de ensayos complementarios.....	227
4.4.1 Tiempos de fraguado.....	228
4.4.2 Ensayo en núcleos extraídos .....	231
4.4.3 Esclerómetro .....	233
4.4.4 Módulo de elasticidad dinámico.....	236
4.4.5 Análisis de resistencia de la estructura al momento del desmoldado .....	238
<b>CAPITULO V .....</b>	<b>240</b>

<b>5 Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>241</b>
5.1 Conclusiones .....	241
5.2 Recomendaciones .....	245
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>248</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>251</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>257</b>
<b>Anexo A. ASTM Designación: C 1074 - 98 .....</b>	<b>258</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Compuestos químicos en el cemento Portland.....	32
Tabla 2.2 Tipos de Cemento.....	37
Tabla 2.3 Calor de Hidratación de los componentes del cemento.....	38
Tabla 2.4 Desarrollo de calor del cemento por unidad de tiempo.....	39
Tabla 2.5 Calor generado durante los primeros 7 días.....	40
Tabla 2.6 Principales Aspectos del Concreto Influidos por los Agregados. ....	42
Tabla 2.7 Selección de la resistencia a la compresión ( $f'c$ ) del concreto mínima a los 28 días.....	49
Tabla 2.8 Factor de Modificación para la desviación estándar, cuando se dispone de menos de 30 ensayos.....	50
Tabla 2.9 Resistencia a la compresión promedio requerida cuando no se dispone de datos para establecer una desviación estándar.....	51
Tabla 2.10 Requisitos aproximados para el contenido de agua de mezclado y para el contenido de aire deseado para distintos revenimientos y tamaños máximos de agregado.....	52
Tabla 2.11 Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.	53
Tabla 2.12 Componentes de un equipo de madurez.....	104
Tabla 2.13 Proporciones de Concreto para Mezclado en el Sitio. ....	115
Tabla 2.14 Dosificación Recomendadas para la Elaboración del Concreto....	121
Tabla 2.15 Desmoldado de Elementos.....	124

Tabla 3.1 Resultados de temperatura y revenimiento para cada bachada muestreada .....	130
Tabla 3.2 Registro de valores de resistencia de especímenes curados en campo .....	132
Tabla 3.3 Registro de valores de resistencia de especímenes curados en laboratorio .....	133
Tabla 3.4 Resistencias obtenidas en muestreo de concreto en campo. ....	134
Tabla 3.5 Revenimiento y Temperatura obtenidos en la mezcla utilizada en campo. ....	134
Tabla 3.6 Análisis Granulométrico del Agregado Grueso. ....	136
Tabla 3.7 Análisis Granulométrico del Agregado Fino. ....	137
Tabla 3.8 Cálculo de la Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso .....	139
Tabla 3.9 Cálculo de la Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino	139
Tabla 3.10 Determinación del Peso Volumétrico del Agregado Grueso .....	140
Tabla 3.11 Determinación del Peso Volumétrico del Agregado Fino .....	140
Tabla 3.12 Proporcionamiento de acuerdo a relaciones Agua-Cemento.....	141
Tabla 3.13 Valores de temperatura obtenidos por equipo .....	150
Tabla 3.14 Calculo de valores de madurez del sensor 1 .....	152
Tabla 3.15 Calculo de valores de madurez del sensor 2 .....	152
Tabla 3.16 Resumen de datos y características .....	154
Tabla 3.17 Registro de Penetración muestra 1 .....	169

Tabla 3.18 Registro de Penetración muestra 2.....	169
Tabla 3.19 *Valores promedios de resistencia a compresión y cilindros instrumentados con sensores .....	171
Tabla 3.20 Resultados de resistencia a la penetración de la muestra 1 .....	184
Tabla 3.21 Resultados de resistencia a la penetración de la muestra 2 .....	184
Tabla 3.22 Resultados de de las primeras 24 horas de Temperatura, Madurez y Resistencia de sensores colocados en diversas alturas de la pared .....	189
Tabla 3.23 Valores de resistencia obtenidos por el método de madurez.....	190
Tabla 3.24 Resultados de pulso en la parte superior de la pared .....	195
Tabla 3.25 Resultados de pulso en la parte inferior de la pared .....	196
Tabla 3.26 Resultados de pulso en los cilindros ensayados.....	196
Tabla 3.27 Resultados de pulso en los núcleos extraídos de la pared con sensor .....	197
Tabla 3.28 Resultados de pulso en los núcleos extraídos de la pared sin sensor .....	198
Tabla 3.29 Resultados de ensayos de compresión en cilindros curados en condiciones de campo.....	200
Tabla 3.30 Resultados de ensayo del martillo de rebote en la pared .....	202
Tabla 3.31 Resultados de ensayo del martillo de rebote en los cilindros.....	203
Tabla 3.32 Resultados de compresión de núcleos extraídos de la pared sin sensor .....	206

Tabla 4.1 Límites de resistencia obtenidos por el método de madurez y .....	210
Tabla 4.2 Límites de resistencia obtenidos por el método de madurez y .....	210
Tabla 4.3 Límites de resistencia obtenidos por el método de madurez y .....	211
Tabla 4.4 Valores de Madurez en el momento .....	221
Tabla 4.5 Valore de Madurez para los tiempos de.....	231
Tabla 4.6 Valores de Resistencia a la compresión en la pared .....	235

## Prólogo

Las nuevas tecnologías en los procesos constructivos demandan mejoras e innovaciones en los ensayos de control de calidad de las obras. En el caso específico de las casas coladas en el sitio, un sistema ampliamente utilizado en nuestro país, no se cuenta con un control de la resistencia de la vivienda al momento de retirar los moldes, es por eso, que surge la necesidad de investigar un método que nos ayude a conocer la resistencia de una estructura a edades tempranas. El método de madurez del concreto se ajusta a esta necesidad, por lo que en este trabajo de graduación se explicará los fundamentos y la aplicación del método a un sistema de paredes coladas en el sitio y así poder determinar el estado del concreto al momento del retiro de moldes.

El método se basa en que la resistencia del concreto deriva de la hidratación del cemento, este proceso genera calor; si el calor de hidratación se mide puede estimarse la resistencia del concreto.

El documento está estructurado por capítulos, de los cuales el Capítulo I describe los antecedentes, objetivos, limitaciones y justificaciones de la investigación; en el Capítulo II se muestra la base teórica del Método de Madurez así como la normativa de nuestro país para la construcción de viviendas. La aplicación del método en un sistema de paredes coladas en el sitio se desarrolla en el Capítulo III; luego se hace un análisis de resultados en el Capítulo IV y se finaliza la investigación con la elaboración de conclusiones y recomendaciones de la investigación, las que se muestran en el Capítulo V.

# **CAPITULO I**

# **1 Anteproyecto de la investigación**

En este capítulo se presentan las generalidades de la investigación, la necesidad de contar en nuestro país con esta herramienta útil en los procesos de construcción, no solo del sistema de viviendas coladas en el sitio sino en todas las estructuras en general, al mismo tiempo se presentan los antecedentes, planteamiento del problema, objetivos, alcances, limitaciones y la metodología a seguir durante la investigación.

## **1.1 Antecedentes**

El 2 de marzo de 1973, la losa de un edificio en construcción en Fairfax Condado de Virginia, sufrió un colapso progresivo, dejando un saldo de catorce obreros fallecidos y treinta y cuatro heridos, el concreto de la sección de losa donde se cree que se origino el problema tenía cuatro días de edad en el momento de la falla.

Por el percance se pidió a un grupo de profesionales de Seguridad y Administración de Salud ayudar a determinar la causa técnica del derrumbamiento. El informe concluyó que la causa más probable del colapso fue el retiro prematuro de las formaletas, produciéndose esfuerzos que excedieron la capacidad del concreto relativamente joven.

Lo anterior generó un gran interés en un concepto relativamente “nuevo”, conocido como el método de la madurez, que se basa en tres premisas básicas: (1) la resistencia del concreto deriva de la hidratación del cemento; (2) la hidratación del cemento produce calor; y (3) si la cantidad de calor puede medirse, entonces una estimación de la magnitud de la reacción de hidratación puede hacerse y a partir de ello predecir la resistencia del concreto, de tal forma se puede estimar en el sitio el desarrollo de resistencia del concreto a edades tempranas.

Abonado a la creciente necesidad de acelerar los procesos constructivos y mejorar la eficiencia de los métodos de inspección de calidad, el método y sus beneficios fueron reconocidos totalmente<sup>1</sup>, pero el uso de estos conceptos en sus inicios no se hizo muy frecuente fuera del laboratorio ya que no se contaba con un equipo de fácil manejo, ni con una normativa. Fue entonces que en 1987 la Asociación Americana para Ensayo de Materiales (ASTM) por primera vez aprobó la norma C 1074 (Práctica estándar para determinar la resistencia del concreto por el método de madurez) que estandarizó el procedimiento para desarrollar relaciones de resistencia-madurez.

Uno de los campos de la ingeniería donde se puede aplicar el método para el control de la resistencia a edades tempranas es en el moldeado de viviendas de concreto coladas en el sitio (sistema monolítico, que utiliza moldes metálicos),

---

<sup>1</sup> Allyn Luke. C.T. Thomas Hsu. Sun Punurai (December 2002). Implementation of Concrete Maturity Meters. New Jersey Institut of Technology Civil & Environmental Engineering

el cual surgió como una alternativa por su bajo costo de adquisición; mostrando buen desempeño desde las primeras construcciones (aproximadamente 30 años) frente a los fenómenos sísmicos ocurridos en nuestro país, haciendo de él un sistema confiable.

Algunos de los proyectos donde se ha aplicado este sistema son, San José (segunda etapa), Los Ángeles, Los Conacastes, Centro Comercial Metrópolis, Unicentro Soyapango, Las Margaritas, La Cima (etapas I, II y III), Colonia Lincoln y Altavista: con más de 10,000 viviendas construidas y habitadas.

A pesar de la aplicación de éste sistema constructivo no se tienen registros de haberse aplicado el método de la madurez para el control de calidad de los procesos constructivos.

Actualmente el centro de investigación del Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC) cuenta con el equipo de medición de madurez, el cual ha sido puesto a disposición para llevar a cabo ésta investigación.

## **1.2 Planteamiento del problema**

En nuestro país la construcción de viviendas de concreto coladas en el sitio ha sido una buena alternativa para los constructores porque privilegia la velocidad y sistematización que se requiere en un proyecto habitacional, ya que se basa en la utilización de moldes de aluminio o hierro fundido para realizar un colado monolítico de la vivienda.

Por su parte los constructores requerirán desmoldar lo antes posible ya que esto les aumentará el rendimiento de los moldes y el avance de la obra, reflejando así mayores beneficios económicos.

Actualmente el desmoldado de las viviendas de concreto coladas en el sitio se hace de una manera totalmente “teórica” basado en:

Curvas teóricas de endurecimiento del concreto o especificaciones para el desmoldado de elementos colados en el sitio, los cuales son regidos por normativas ASTM y especificaciones ACI, o solamente por la experiencia adquirida. Sin embargo, surge una interrogante; ¿Tendrá la estructura la suficiente resistencia cuando se decide ejecutar el desmoldado sin que sufra algún tipo de daño?; si nos basamos en ensayos convencionales que en nuestro país normalmente se le hacen al concreto para el control de calidad, sería un poco difícil de responder; pero con el Método de Madurez el cual tiene ya varios años de aplicación en otros países en muchos proyectos, se pueden obtener datos de la evolución de resistencia del concreto a edades tempranas (horas).

Por lo que en esta investigación se pretende determinar que, el método de la madurez del concreto puede utilizarse como herramienta adicional a los métodos convencionales para el aseguramiento de calidad y poder cuantificar la evolución de resistencia de la estructura misma, aplicado en particular a la industria de la construcción de viviendas de concreto coladas en el sitio.

## 1.3 Objetivos

### Objetivo general

Determinar por el método de la madurez del concreto (ASTM C 1074) la evolución de resistencia en una vivienda colada en el sitio, y a partir de los resultados obtenidos determinar en qué momento la estructura alcanza la resistencia adecuada para el retiro de los moldes.

### Objetivos específicos

- Enunciar como influyen los componentes del concreto en la generación de calor.
- Determinar la evolución de calor del concreto a través del tiempo así como las etapas de endurecimiento del mismo a edades tempranas.
- Describir el concepto de madurez del concreto, los principios teóricos en que se fundamenta, y la determinación de la resistencia del mismo partiendo de valores de temperatura.
- Conocer el proceso constructivo sugerido por el comité ACI 332 y el reglamento de vivienda de El Salvador.
- Aplicar el método de la madurez en la construcción de viviendas de concreto coladas en el sitio para determinar la evolución de resistencia a edades tempranas.

- Reproducir en condiciones de laboratorio la mezcla que se utilizará en el colado de la vivienda, para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la misma
- Obtener la curva Factor Temperatura-Tiempo vrs. Resistencia a compresión de la mezcla de concreto a utilizar en la construcción de la vivienda.
- Validar por medio de valores obtenidos en condiciones de campo la curva Factor Temperatura-Tiempo vrs. Resistencia, a partir de las especificaciones de la norma ASTM C 1074.
- A partir de valores obtenidos por el método de madurez evaluar durante 28 días la evolución de resistencia de la vivienda colada en el sitio.

#### **1.4 Alcances**

Se determinará la resistencia del concreto en una vivienda colada en el sitio con el método de madurez (ASTM C1074 Práctica Estándar para la Estimación de la Resistencia del Concreto por el Método de Madurez), usando un equipo portátil proporcionado por el ISCYC.

Por medio de ensayos regidos por las normas ASTM se conocerán algunas propiedades físicas del concreto como: Revenimiento C 143, Temperatura C 1064, Tiempos de fraguado del concreto C 403, Elaboración y compresión de especímenes cilíndricos de concreto de diámetro estándar en base a C 192 y C-39 respectivamente

Al mismo tiempo se llevará a cabo el registro de los valores de madurez a intervalos de 20 minutos bajo la norma ASTM C 1074, para la calibración de la mezcla.

Se realizará el registro de valores de madurez en una vivienda de concreto colada en el sitio, tomando lecturas cada veinte minutos hasta completar los 28 días de edad y estimar la evolución de resistencia de la misma, además de los ensayos de revenimiento y temperatura.

Todo lo antes mencionado será únicamente para un concreto que reúna los requisitos para ser usado en viviendas coladas en sitio, el cual será abastecido por la empresa constructora bajo una resistencia especificada por el mismo, y que a la vez mantenga las condiciones de: tipos de agregados, especificaciones de agregados, dosificación y resistencia requerida, tanto para la elaboración de los especímenes en laboratorio como en campo.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos no se podrán generalizar para cualquier proyecto (a menos que se cumplan los requisitos antes mencionados) ni para todas las viviendas construidas en el proyecto.

## **1.5 Limitaciones**

- Puesto que no se ha realizado algún tipo de análisis del método de madurez en nuestro país, la investigación se fundamenta en normas internacionales y documentos relacionados al método.

- La metodología de ensayo para determinar la resistencia del concreto por medio del método de madurez se realizará bajo la norma ASTM C 1074 (Práctica Estándar para la Estimación de la Resistencia del Concreto por el Método de Madurez), sin tomar en cuenta guías alternativas elaboradas por investigadores del tema.
- La determinación de la madurez se realizará utilizando solamente la teoría de Nurse – Saúl.
- Debido a la falta de equipo e instalaciones el Datún de temperatura no se determinará por lo que éste será estimado para el cálculo de la madurez.
- Puesto que la investigación únicamente se enfocará en la determinación de la resistencia y confiabilidad del método, no se hará, análisis económico, análisis de rendimiento para la aplicación del método, así como del personal que este involucra.
- La investigación únicamente se llevará a cabo para un mismo tipo de concreto con las mismas características de sus componentes y diseño constante.

## **1.6 Justificaciones**

La estimación de la resistencia del concreto por el método de la madurez es una técnica sencilla que en otros países se está utilizando como herramienta adicional a los métodos de control de calidad.

En nuestro país la construcción de viviendas de concreto coladas en el sitio es una alternativa a la demanda habitacional, por su bajo costo de adquisición, por lo tanto si se mejoran los métodos de control de calidad en la construcción de este tipo de viviendas se garantizaría la calidad del producto final.

A partir del ensayo de madurez se puede estudiar la evolución de resistencia del concreto a edades tempranas lo cual puede auxiliar al ingeniero de control de calidad a determinar el momento adecuado para remover los moldes de la vivienda.

Además, a partir de esta investigación se determinará la resistencia del concreto en el sitio, por medio de un ensayo no destructivo, generando así, controles de resistencia más eficientes.

Realizando el ensayo de madurez en estructuras de concreto, podrá reducirse el muestreo de especímenes cilíndricos para compresión y a la vez tener resultados de resistencia a edades tempranas.

# CAPITULO II

## **2 Marco Teórico**

En este capítulo se desarrollan los diferentes conceptos de la tecnología del concreto básica como son: cemento, agregados, agua y aditivos, al mismo tiempo se estudia su comportamiento desde el punto de vista térmico y fraguado, debido a su importancia en el concepto de madurez. Todo lo anterior se aborda por medio del análisis de gráficos de generación de calor de la pasta de cemento y concreto.

En cuanto al método de madurez se explican las diferentes teorías que lo rigen, así como sus antecedentes, evolución e importancia para la determinación de la resistencia del concreto a edades tempranas. Con la finalidad de sustentar todos los conceptos relacionados para la aplicabilidad de la madurez del concreto, en el sistema de viviendas de concreto coladas en el sitio.

Finalmente se muestran algunos conceptos de la normativa de vivienda de nuestro país.

### **2.1 Influencia de los componentes del concreto en la generación de calor y su relación con la madurez del concreto.**

El conocimiento de la cantidad de calor liberado en el proceso de hidratación del cemento puede ser útil para planear la construcción.

Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua porque esta determina el tiempo de fraguado y endurecimiento de la mezcla. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que conceda tiempo al transporte y colocación del concreto. Sin embargo, una vez que el concreto ha sido colocado y terminado, es deseable tener un endurecimiento rápido. El yeso, que es adicionado en el molino de cemento durante la molienda del clínker, actúa como regulador de la velocidad inicial de hidratación del cemento Portland. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación son: la finura de la molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado.

Para nuestra investigación el conocer la cantidad de calor generado por la hidratación del cemento es de mucha importancia ya que al cuantificar los valores de temperatura con respecto al tiempo y mediante un modelo matemático podremos determinar la evolución de la madurez; lo que relacionaremos con la ganancia de resistencia de una mezcla de concreto.

### **2.1.1 Compuestos químicos en el cemento portland.**

En general el proceso de fabricación del cemento puede ser simplificado diciendo que éste se produce a través de la interacción química de caliza y sílice a temperaturas de 1400 a 1600 °C, para formar silicatos de calcio primarios. Después de este proceso de calcinación se obtiene un clínker, denominado de Pórtland, que molido finamente constituye el componente

principal del cemento. Durante esta última etapa, se le añade yeso (u otra fuente de sulfatos) para controlar su temprana reacción de hidratación.

Durante la calcinación en la fabricación del clínker de cemento Pórtland, el óxido de calcio se combina con los componentes ácidos de la materia prima; esta materia prima generalmente es una mezcla de material calcáreo, como la caliza, marga, creta o coquilla, y un material arcilloso como la pizarra, esquito o escoria de alto horno. Al combinarse forman cuatro compuestos fundamentales que constituyen el 90% del peso del cemento, estos se muestran en la Tabla 2.1

Compuesto	Formula Química	Abreviatura
Silicato Tricálcico	3CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato Dicálcico	2CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato Tricálcico	3CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Aluminoferrito Tetracálcico	4CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

**Tabla 2.1 Compuestos químicos en el cemento Portland**  
Tomado de "Diseño y control de mezclas de concreto". IMCYC

*Silicato Tricálcico:* se hidrata y endurece rápidamente y es responsable del fraguado inicial y de la resistencia temprana. En términos generales la resistencia temprana del concreto de cemento Pórtland es mayor con porcentajes superiores de C<sub>3</sub>S.

*Silicato Dicálcico:* se hidrata y endurece lentamente y contribuye al incremento de resistencia a edades mayores de una semana.

*Aluminato Tricálcico:* libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. Contribuye levemente al desarrollo de la resistencia temprana. El yeso que se agrega al cemento durante la molienda final, retrasa la velocidad de hidratación de este compuesto.

*Aluminoferrito Tetracálcico:* Reduce la temperatura de formación del clínker, se hidrata rápidamente pero su contribución es mínima a la resistencia. La mayoría de efectos de color se debe a este compuesto y a sus hidratos.

Con la adición del agua, los componentes del cemento comienzan a hidratarse y se forman productos, en su mayoría silicatos de calcio hidratados, que a su vez, comienzan a formar un esqueleto microestructural. Esta microestructura, se produce por el aumento progresivo del número de hidratos formados dentro del esqueleto poroso. A medida que la microestructura gana silicatos de calcio hidratado, la mezcla gana resistencia.

Inmediatamente después de la introducción de agua en la mezcla de cemento, se produce un intenso aumento de la actividad química, esto es la Hidratación.

### **2.1.2 Etapas de la hidratación.**

La hidratación del cemento Pórtland puede ser analizada como la suma de todas las reacciones de los compuestos individuales del cemento, interactuando simultáneamente.

La evolución temporal se puede resumir en la siguiente figura 2.1:

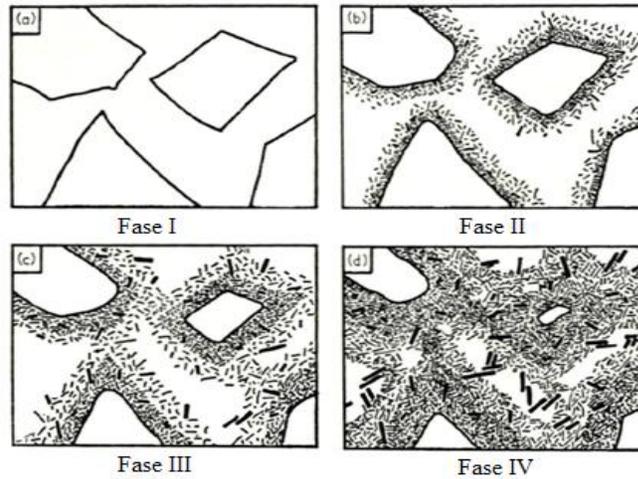


Figura 2.1 Las cuatro fases en el fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland  
 Tomado de "Desarrollo y Análisis de Pavimentos Industriales desde el punto de vista del acabado superficial". España.

En la figura 2.1; se muestran las cuatro fases en el fraguado y endurecimiento del cemento Portland; en la fase I, se observan los granos de clínker dispersos sin reaccionar en el agua, pasado unos minutos, los productos de hidratación crecen hacia dentro y hacia fuera de la superficie de cada grano (fase II), luego de una hora interactúan las capas que recubren los diferentes granos de clínker, volviéndose así el conjunto un gel continuo (fraguado, fase III). Al pasar de los días surge una masificación del gel (endurecimiento, fase IV).

La reacción de hidratación es exotérmica, es decir, libera calor y cada componente del cemento libera una cantidad diferente. Por otra parte, el calor total liberado viene condicionado por diversos factores, como la finura del cemento o la mayor o menor presencia de los productos químicos que forman el clínker.

A continuación se muestran en detalle, a través de un gráfico, las cuatro etapas del proceso de hidratación del cemento. Figura 2.2.

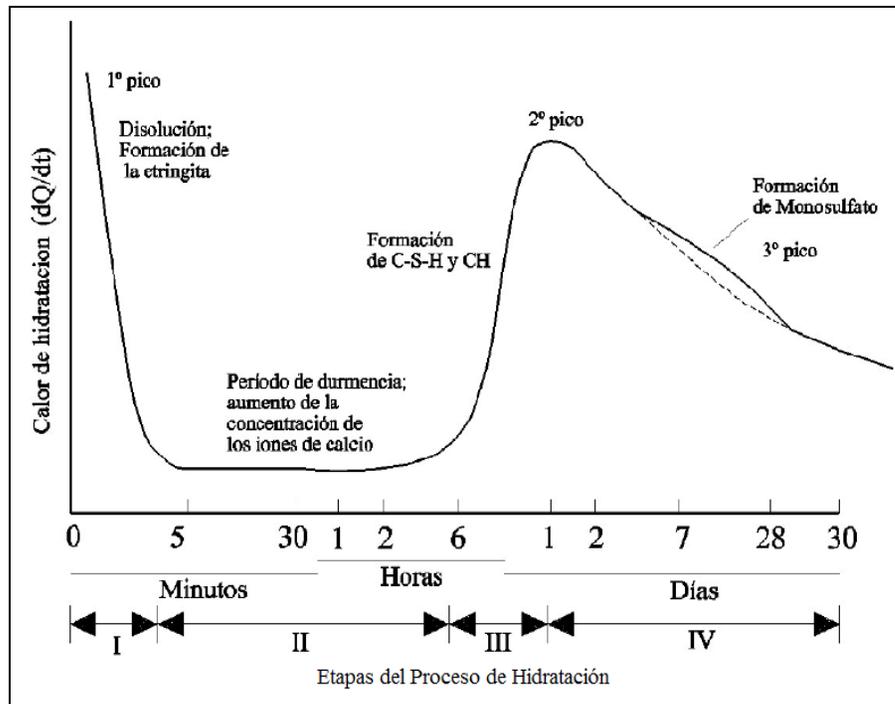


Figura 2.2 Representación de las Etapas de Hidratación del cemento  
Tomado de "Desarrollo y Análisis de Pavimentos Industriales desde el punto de vista del acabado superficial". España.

*Etapas I:* El punto máximo que puede observarse corresponde a la disolución de  $C_3S$ , que es altamente exotérmica, con lo que hay un rápido incremento de calor que cesa a los 15-20 minutos debido a la formación de una membrana alrededor del  $C_3S$  y el  $C_3A$  por la precipitación de silicato cálcico hidratado insoluble.

*Etapas II:* Hay una significativa disminución en la velocidad de los procesos de hidratación. Esto debido a la formación de una membrana alrededor de las

partículas en hidratación que restringe el contacto de éstas con el agua exterior. Esta etapa se conoce como “Periodo Dormiente”. A medida que la concentración de los compuestos aumenta, termina el período dormiente, comenzando a formarse los primeros hidratos y como consecuencia la microestructura.

*Etapa III:* Aquí inicia el fraguado de la mezcla; los granos de cemento reaccionan desde la superficie hacia el interior y la parte anhidra de las partículas va reduciéndose, se produce un máximo de calor en la mezcla al final de esta etapa, momento que corresponde al final de fraguado.

*Etapa IV:* Los productos de hidratación forman una densa corteza alrededor de las partículas originales, disminuyendo la velocidad de reacción y a su vez el calor de hidratación disminuye proporcionalmente.

### **2.1.3 Tipos de cemento.**

Nuestra investigación se verá enfocada a la aplicación del Método de la Madurez en la Construcción de Casas Coladas en el sitio, es por ello que dirigiremos nuestro estudio al Cemento Portland Normal (Tipo I)

Se fabrican diversos tipos de Cementos Portland para satisfacer diferentes necesidades químicas y físicas para propósitos determinados.

Según la ASTM (Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales) en su norma C 150, estipula ocho tipos de cementos; los que se enlistan en la Tabla

2.2

<b>Tipos de Cemento</b>	
Tipo I	: Normal
Tipo IA	: Normal, inductor de aire
Tipo II	: Resistencia Moderada a los Sulfatos
Tipo IIA	: Resistencia Moderada a los Sulfatos, inductor de aire
Tipo III	: Alta Resistencia a Edad Temprana
Tipo IIIA	: Alta Resistencia a Edad Temprana, inductor de aire
Tipo IV	: Bajo Calor de Hidratación
Tipo V	: Resistencia Elevada a los Sulfatos

**Tabla 2.2 Tipos de Cemento**  
Tomado de "Diseño y control de mezclas de concreto". IMCYC

*Cemento Tipo I:* Este cemento es de uso general, es adecuado para ser utilizado cuando las propiedades especiales de los otros tipos de cemento no son requeridas. Se utiliza en concretos que no estén sujetos al ataque de factores agresivos como en aquellos que tengan un aumento cuestionable de temperatura debido al calor generado durante la hidratación.

*Cemento Tipo II:* Se emplea donde sea necesario tomar precauciones contra el ataque moderado de los sulfatos. Este cemento genera normalmente menos calor a menor velocidad que el Tipo I.

*Cemento Tipo III:* Este Proporciona resistencias elevadas a edades tempranas, normalmente a una semana o menos. Química y Físicamente es igual al *Cemento Tipo I*, la única diferencia es que las partículas han sido molidas mas finamente

*Cemento Tipo IV:* Ideal para cuando se tenga que mantener en un valor mínimo la cantidad y velocidad de generación de calor generada por la hidratación. Desarrolla resistencia a una velocidad muy inferior respecto de los otros Tipos de Cemento.

*Cemento Tipo V:* Este se utiliza exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de sulfato. Su resistencia es adquirida más lentamente que en el Cemento Tipo I.

El calor de Hidratación es generado cuando el cemento entra en contacto con el agua. La cantidad de calor generado depende principalmente de la composición química del cemento, siendo el Aluminato Tricálcico (C<sub>3</sub>A) y el Silicato Tricálcico (C<sub>3</sub>S) los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor.

Existen otros factores que también influyen son la relación agua cemento, la finura de la molienda del cemento y la temperatura de curado.

<b>Calor de Hidratación de los componentes del cemento a 28 días.</b>	
Silicato Tricálcico	90 ± 7 cal/gramo
Silicato Dicálcico	25 ± 4 cal/gramo
Aluminato Tricálcico	329 ± 23 cal/gramo
Aluminoferrito Tetracálcico	118 ± 22 cal/gramo

**Tabla 2.3 Calor de Hidratación de los componentes del cemento**  
Tomado de "Evaluación del Grado de Madurez con Cementos Nacionales. Chile

La Tabla 2.3 nos proporciona puntos de referencia a partir de los cuales pueden estimarse las cantidades de calor producidas por el conjunto que integra el cemento. Los valores mostrados corresponden a un completo desarrollo del proceso de hidratación y solo pueden aplicarse en relación con una edad avanzada, varios meses o años.

Definitivamente lo que determina el aumento de temperatura en las construcciones, además de las dimensiones de la estructura, es el desarrollo de calor por unidad de tiempo a través de las primeras edades.

De acuerdo con la composición química de los cementos pueden prever los siguientes valores de calor que se muestran en la Tabla 2.4.

<b>Desarrollo de calor del cemento por unidad de tiempo</b>		
<b>Edad en días</b>	<b>Cal/gramo</b>	
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
3	41	75
7	61	92
28	66	101
90	75	107

**Tabla 2.4 Desarrollo de calor del cemento por unidad de tiempo**  
Tomado de "Evaluación del Grado de Madurez con Cementos Nacionales. Chile

A continuación se muestran en la tabla 2.5 las cantidades aproximadas de calor generado durante los primeros 7 días, tomando como 100% al del cemento Portland Tipo I.

<b>Calor Generado durante los primeros 7 días.</b>		
Tipo I	Normal	100%
Tipo II	Moderado	80% a 85%
Tipo III	Alta resistencia a edad temprana	Hasta 150%
Tipo IV	Bajo calor de hidratación	40% a 60%
Tipo V	Resistente a los sulfatos	60% a 75%

**Tabla 2.5 Calor generado durante los primeros 7 días**  
Tomado de "Diseño y control de mezclas de concreto". IMCYC

### **2.1.4 Agregados.**

Los agregados suman la fracción principal del concreto ya que constituyen entre el 60 - 80% del volumen total.

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores de 5 mm. Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de grava o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 y 38 mm. Estos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo; deben ser partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

Los agregados de peso normal deben cubrir los requerimientos de la norma ASTM C33. Esta especificación limita las cantidades permisibles de sustancias contaminantes e informa de los requisitos para las características de los agregados.

Las principales características de los agregados y los correspondientes aspectos del comportamiento del concreto en que se ejerce mayor influencia, se relacionan en la Tabla 2.6, mostrada a continuación.

#### **2.1.4.1 Características de los agregados y sus efectos en el concreto.**

La influencia de los agregados como componentes del concreto en la generación del calor no es directa, pero puede existir una relación con la demanda de agua de mezclado y esto si afectaría la hidratación del cemento y la generación de calor en el concreto

Basándonos en la tabla 2.6 puede observarse las características que afectan el requerimiento de agua; estas son las siguientes:

- Granulometría
- Limpieza
- Sanidad
- Forma de las Partículas
- Textura Superficial
- Tamaño Máximo

Características.	Efectos en el Concreto	
	Fresco	Endurecido
Granulometría	Manejabilidad Requerimiento de Agua Sangrado	Resistencia Mecánica Cambios Volumétricos Economía
Limpieza (materia orgánica, limo, arcilla y otros finos indeseables)	Requerimiento de agua Contracción plástica	Durabilidad Resistencia mecánica Cambios volumétricos
Densidad (gravedad específica)	Peso unitario	Peso unitario
Sanidad	Requerimiento de agua	Durabilidad
Absorción y porosidad	Pérdida de revenimiento Contracción plástica	Durabilidad Permeabilidad
Forma de partículas	Manejabilidad Requerimiento de agua Sangrado	Resistencia mecánica Cambios volumétricos Economía
Textura Superficial	Manejabilidad Requerimiento de agua	Durabilidad Resistencia al desgaste Economía
Tamaño máximo	Segregación Peso unitario Requerimiento de agua	Resistencia mecánica Cambios volumétricos Peso unitario Permeabilidad Economía
Reactividad con los álcalis		Durabilidad
Módulo de elasticidad		Módulo de elasticidad Cambios volumétricos
Resistencia a la abrasión		Resistencia a la abrasión Durabilidad
Resistencia mecánica (por Aplastamiento)		Resistencia mecánica
Partículas friables y terrones de arcilla	Contracción plástica	Resistencia mecánica Durabilidad Reventones superficiales
Coefficiente de expansión Térmica		Propiedades térmicas

**Tabla 2.6 Principales Aspectos del Concreto Influidos por los Agregados.**

Tomada del Manual de Tecnología del Concreto (CFE), Sección 1.

Estas características deben tomarse en cuenta a la hora de definir el proporcionamiento de la mezcla, ya que esta se vería afectada al perder agua absorbida por los agregados o adicionar agua que contengan estos mismos. Al

ocurrir esto la relación Agua – Cemento cambiaría afectando así el proceso de generación de calor y por ende la resistencia del concreto.

### 2.1.4.2 Absorción y humedad superficial en los agregados

La cantidad de agua utilizada en la mezcla de concreto, se debe ajustar a las condiciones de humedad de los agregados de manera que cubra los requerimientos de agua. En la Figura 2.3 se muestra un esquema de las condiciones de humedad de los agregados.

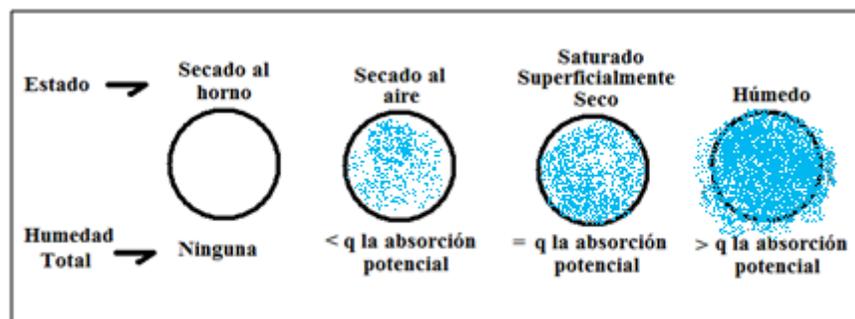


Figura 2.3 Condiciones de humedad de los agregados  
Tomado de Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC

### 2.1.5 Agua de mezclado.

El agua de mezclado en la pasta saturada se encuentra en tres estados:

- Químicamente combinada
- Adsorbida físicamente en las superficies del gel tobermorítico
- En el espacio externo a la atracción de las fuerzas superficiales.

En la mezcla de concreto fresco, se puede considerar que, la diferencia de volumen entre los componentes separados y los productos hidratados durante las primeras horas es prácticamente nula; tal como se demuestra a continuación con la ecuación y se representa en la Figura 2.4:

$$V_{H_2O} + V_C = V_V + V_a + V_g + V_{ph} + V_{nh} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$V_{H_2O}$	=	Volumen de agua
$V_C$	=	Volumen de cemento
$V_V$	=	Volumen de vacíos en los poros y capilares
$V_a$	=	Volumen de agua en los poros y capilares
$V_g$	=	Volumen de agua en gel
$V_{ph}$	=	Volumen de productos de hidratación sólidos
$V_{nh}$	=	Volumen de productos no hidratados

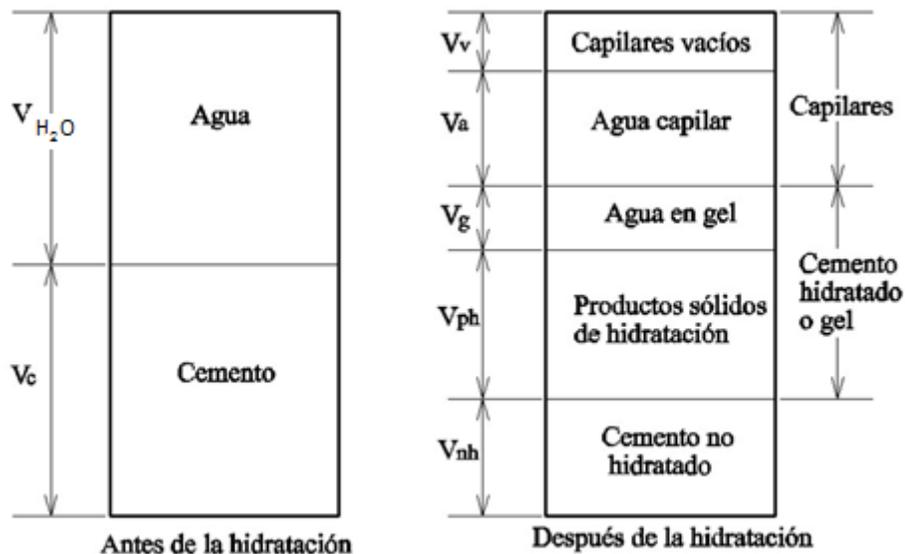


Figura 2.4 Representación esquemática de las proporciones volumétricas en la pasta de cemento antes y después de la hidratación.

Tomado de "Desarrollo y Análisis de Pavimentos Industriales desde el punto de vista del acabado superficial". España.

El agua tiene un calor específico del orden de cuatro o cinco veces el del cemento o de los agregados, la temperatura del agua de mezclado tiene el efecto más pronunciado por unidad de peso sobre la temperatura del concreto. La temperatura del agua es más fácil de controlar que la de los otros componentes, el agua fría reducirá la temperatura de colocación del concreto 4.5°C. La cantidad de agua fría no deberá exceder la que necesite la mezcla. En general, la disminución de la temperatura de la mezcla entre 2.0 a 2.2°C reducirá la temperatura del agua del mezclado en aproximadamente 0.5°C.

La cantidad de agua necesaria para producir un determinado revenimiento aumenta de acuerdo al tiempo transcurrido desde que el cemento entra en

contacto con el agua. Para un tiempo de mezclado constante, la cantidad de agua necesaria para alcanzar dicho revenimiento también aumenta con la temperatura. Este aumento en el contenido de agua inducirá una disminución proporcional de la resistencia.

## **2.1.6 Diseño de mezcla, dosificación y mezclado del concreto.**

### **2.1.6.1 Diseño de mezcla.**

El objetivo de diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Una mezcla de concreto bien proporcionada deberá poseer las siguientes propiedades:

- En el concreto fresco, trabajabilidad aceptable.
- En el concreto endurecido, durabilidad, resistencia y presentación uniforme.
- Economía.

Antes de efectuar el proporcionamiento de una mezcla, se seleccionan sus características en base al uso que se propone dar al concreto, a las condiciones de exposición, al tamaño y forma de los miembros y a las propiedades físicas del concreto como la resistencia.

La resistencia a la compresión es la medida para la calidad del concreto empleada universalmente, por la facilidad en la determinación de este parámetro. La resistencia a la compresión se relaciona inversamente con la relación agua-cemento. Para un concreto plenamente compactado fabricado con agregados limpios y sanos, la resistencia y otras propiedades deseables del concreto, bajo condiciones de trabajo dadas, están gobernadas por la cantidad de agua de mezclado que se utiliza por unidad de cemento.

La resistencia de la pasta de cemento en el concreto depende de la calidad y cantidad de los componentes reactivos y del grado al cual se completa la reacción de hidratación. El concreto se vuelve más resistente con el pasar del tiempo, siempre y cuando exista humedad disponible y se tenga una temperatura favorable. Por lo tanto, la resistencia a cualquier edad particular no es tanto función de la relación agua-cemento original como lo es del grado de hidratación que alcance el cemento. La importancia de un curado puntual y completo se reconoce a partir de este análisis.

Los métodos de proporcionamiento han evolucionado desde el arbitrario método volumétrico (1:2:3 – cemento: arena: grava), de principios de siglo pasado, hasta los actuales de peso y de volumen absoluto descritos en la práctica estándar para el proporcionamiento de mezclas de concreto del Comité ACI 211.1. Los métodos de proporcionamiento por peso son muy simples y rápidos para estimar las proporciones de las mezclas, utilizando un peso supuesto o conocido de concreto por unidad de volumen. Un método más

exacto es el de volumen absoluto, que involucra el uso de los valores de la densidad de todos los componentes para calcular el volumen absoluto que cada material constituyente ocupará en la unidad de volumen de concreto.

Como mencionábamos al principio del tema la resistencia a la compresión es el indicativo mas empleado, y será determinante a la hora de diseñar nuestra Mezcla de Concreto. Para nuestra investigación la aplicación del Método de la Madurez se verá enfocada a “Casa Coladas en el Sitio” este sistema está regido en el comité ACI 332 el cual, por medio de una tabla 2.7, sugiere una guía para el elección de la resistencia del concreto adecuado para su uso en la construcción de viviendas de poca elevación. La primera consideración al usar esta Tabla es, identificar las condiciones medioambientales según el diseño a ser resistidas por la estructura. Se describen tres tipos de exposiciones así como las resistencias para el concreto y las aplicaciones típicas. Dicha tabla 2.7 se muestra a continuación.

Tipo o localización de la construcción	Áreas regionales de desgaste por la acción atmosférica			Revenimiento nominal pulg. (mm)
	Leve	Moderada	Severa	
	f'c	f'c	f'c	
Paredes de sótano y fundaciones no expuestas a la intemperie.	2500 psi 17 Mpa 175 Kg/cm <sup>2</sup>	2500 psi 17 Mpa 175 Kg/cm <sup>2</sup>	2500 psi 17 Mpa 175 Kg/cm <sup>2</sup>	6±1(150±25)
Losas de sótano y losas interiores en rasante	2500 psi 17 Mpa 175 Kg/cm <sup>2</sup>	2500 psi 17 Mpa 175 Kg/cm <sup>2</sup>	2500 psi 17 Mpa 175 Kg/cm <sup>2</sup>	5±1(125±25)
Paredes de exteriores, fundaciones, y otros elementos de concreto expuesto a la intemperie.	2500 psi 17 Mpa 175 Kg/cm <sup>2</sup>	3000 psi 21 Mpa 210 Kg/cm <sup>2</sup>	3000 psi 21 Mpa 210 Kg/cm <sup>2</sup>	6±1(150±25)
Vías de acceso, bordillos, pasillos, patios, pórticos, gradas y escaleras y pisos de cochera si calefacción, expuestos al intemperismo.	2500 psi 17 Mpa 175 Kg/cm <sup>2</sup>	3000 psi 21 Mpa 210 Kg/cm <sup>2</sup>	3500 psi 24 Mpa 246 Kg/cm <sup>2</sup>	5±1(125±25)
<b>IMPORTANTE:</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>- El concreto debe ser proporcionado para que produzca la resistencia de diseño y el revenimiento necesario.</li> <li>- No se debe agregar agua adicional a la cantidad del diseño, puesto que provocaría una reducción en la resistencia.</li> <li>- Donde la experiencia local demuestra una historia de funcionamiento satisfactorio y cuando los códigos locales lo permitan, se puede utilizar una menor resistencia para el concreto (pero no menor de 2000 psi, 14 Mpa ó 140 Kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>- El método de ensayo ASTM C 143 debe ser utilizado para medir el revenimiento.</li> <li>- Con el uso de reductores de agua, o aditivos controladores de fraguado usados para producir concreto fluido (más de 7 in de revenimiento) se deben de mantener todos los demás requisitos de calidad del concreto.</li> </ul>				

**Tabla 2.7 Selección de la resistencia a la compresión (f'c) del concreto mínima a los 28 días.**

Tomada de: Guide to Residential Cast-in-Place Concrete Construction.

Cabe mencionar que en nuestro país tales condiciones ambientales no se dan, por lo tanto dichos parámetros no son aplicables. Por lo que habrá que aplicar el tercer ítem de las notas importantes de la tabla 2.7, en la página 31.

### 2.1.6.2 Proceso de diseño de mezcla.

Paso 1: Características y especificaciones: Deben definirse aspectos que serán determinantes en la dosificación de los componentes del concreto requerido.

- Tipo de elemento estructural.
- Condiciones Climáticas a la que será expuesto el elemento.
- Resistencia Requerida a los 28 días.
- Distancia mínima entre las varillas de acero de refuerzo.
- Inclusión o no de aire.
- Uso o no de aditivo.
- Revenimiento.

Paso 2: Una vez determinada la resistencia esperada a los 28 días ( $f'c$ ), se afecta por un factor de seguridad de acuerdo a las tablas 2.8 y 2.9.

Número de ensayos*	Factor de modificación para la desviación estándar**
Menos de 15	Use la Tabla (poner el numero)
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00
*Interpole para números de ensayos intermedios	
**Desviación estándar modificada, con la que se determinara la resistencia promedio requerida	

**Tabla 2.8 Factor de Modificación para la desviación estándar, cuando se dispone de menos de 30 ensayos**

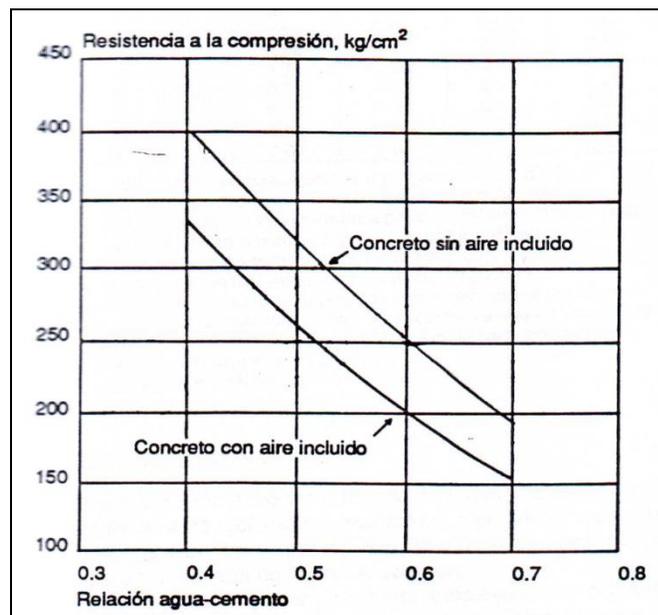
Tomado de Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC

Resistencia a la compresión especificada (f'c, Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión requerida promedio (f'c, Kg/cm <sup>2</sup> )
Menos que 210	f'c = 70
210 a 350	f'c = 85
Mayor que 350	f'c = 100

**Tabla 2.9 Resistencia a la compresión promedio requerida cuando no se dispone de datos para establecer una desviación estándar.**

Tomado de Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC

Paso 3: Cuando se ha determinado la resistencia a la compresión requerida, se define la relación Agua Cemento por medio de gráficas que relacionan Resistencia a la compresión con Relaciones Agua-Cemento, como la mostrada en la Figura 2.5.



**Figura 2.5 Curva típica de resistencia de mezclas de prueba datos de campo**

Tomado de Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC

Paso 4: Se calcula la cantidad de agua de mezclado: la cantidad de agua requerida depende del Tamaño Máximo del Agregado, de la forma de la partícula, granulometría de los agregados, temperatura del concreto, así como del empleo de aditivos. Por medio de la siguiente Tabla 2.10

Revenimiento (cm)	Agua (Kg/m <sup>3</sup> ) para el concreto según el tamaño máximo nominal del agregado (mm)							
	9.5*	12.5*	19.0*	25.0*	38.0*	50.0*	75.0+**	150.0+**
2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10.0	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire en concreto sin aire incluido (%)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2

\*Estas cantidades de agua de mezclado para emplearse en el cálculo del contenido de cemento para mezclas de prueba a una temperatura de 20° a 25° C.

\*Son cantidades máximas para agregados gruesos angulosos, razonablemente bien formados y con granulometría dentro de los límites aceptados por la ASTM C33

\*El empleo de aditivos reductores de agua que cumplen con ASTM C494 puede reducir el contenido de agua en un 5% o más. El volumen de los aditivos debe considerarse como parte del volumen del agua de mezclado.

\*Para obtener revenimiento mayores de 18 cm y TMA < 25 mm, es necesario el empleo de aditivos reductores de agua.

+Los valores de revenimiento para concreto con agregado mayor de 40 mm están basados en pruebas de revenimiento después de quitar las partículas mayores de 40 mm mediante cribado húmedo.

**Tabla 2.10 Requisitos aproximados para el contenido de agua de mezclado y para el contenido de aire deseado para distintos revenimientos y tamaños máximos de agregado.**

Tomado de Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC

Paso 5: Por medio de una regla de tres simple se despeja la cantidad de Cemento a utilizar.

$$\frac{A}{C} = X \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde: A = Agua

C = Cemento

X = Relación Agua- Cemento

Paso 6: Cantidad de Agregado Grueso: Esta puede estimarse por medio de la Tabla 2.11 que se presenta a continuación. Se debe conocer el Tamaño Máximo del Agregado, el modulo de finura de la arena y el peso volumétrico del Agregado Grueso.

Tamaño máximo de agregado mm (pulg)	Volumen de agregado grueso varillado en seco por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura .			
	2.4	2.6	2.8	3.0
9.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.7 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1 (1 ½)	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
76.2 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
152.4 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

**Tabla 2.11 Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.**

Tomado de Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC

Paso 7: Agregado Fino: este podrá calcularse por diferencia de volumen absoluto.

$$\text{Agua} + \text{Cemento} + \text{AgregadoGrueso} = \text{VolumenConocido}$$

$$1\text{m}^3 - \text{VolumenConocido} = \text{AgregadoFino}$$

Al obtener los volúmenes de cada componente se hacen las correcciones por humedad considerando el agua que pueden restar o aportar la humedad de los agregados, así como el cálculo de cada componente para un determinado volumen de concreto.

### **2.1.6.3 Dosificación**

La dosificación es el proceso de pesar o medir volumétricamente e introducir al mezclador los ingredientes para una mezcla de concreto. Para producir concretos de calidad uniforme, los ingredientes deberán medirse con precisión en cada mezcla. La mayoría de especificaciones requiere que la dosificación se efectúe por peso en vez de hacerlo por volumen debido a las imprecisiones al medir los agregados (especialmente la arena húmeda). El empleo de un sistema de dosificación por peso suministra una mayor exactitud y simplicidad y evita el problema creado por el abundamiento de las arenas húmedas. El agua y los aditivos líquidos se pueden medir correctamente ya sea por volumen o por peso. La dosificación volumétrica se usa para concretos mezclados en una mezcladora continua y para ciertas obras en lugares donde no se cuenta con instalaciones para pesaje.

#### **2.1.6.4 Mezclado de concreto.**

La función del mezclado de concreto es revestir la superficie de los agregados con la pasta de cemento, la cual dará como resultado una masa homogénea. Para asegurar este concreto de manera uniforme se utilizan mezcladoras. Estas están compuestas, principalmente, por un recipiente metálico denominado tambor, provisto de paletas en su interior. Esta mezcla se efectúa, cuando cada una de las partes del concreto es elevada, vuelta a vuelta, por las paletas durante la rotación del tambor, de manera que en un cierto punto, en cada revolución, son vertidas hacia la parte inferior para mezclarse con las otras porciones, hasta constituir una masa homogénea.

Los mezcladores no deben ser cargados por encima de sus capacidades evaluadas y deberán ser operados aproximadamente a la misma velocidad para la cual fueron diseñados

#### **2.1.7 Colocado y acabado del concreto.**

##### **2.1.7.1 Colocación**

El concreto deberá colocarse en capas horizontales de espesor uniforme, consolidando adecuadamente cada capa antes de colocar la siguiente. La velocidad de colocación deberá ser lo suficientemente rápida para que la capa de concreto no haya fraguado cuando se coloque encima la nueva capa. Esto para evitar filtraciones, fisuras y planos de debilidad, cuando el concreto fresco

se coloca sobre el concreto endurecido. El espesor de las capas dependerá del ancho de los moldes y de la cantidad de refuerzo.

La altura de caída libre del concreto no necesita ser fijada hasta un cierto límite a no ser que ocurra una separación de partículas gruesas, produciendo colmenas, en dicho caso podrá fijarse un límite de altura entre 0.90 – 1.20 metros (según el Comité ACI 332).

### **2.1.7.2 Consolidación**

Es el proceso que consiste en compactar al concreto fresco para acomodarlo en el molde y alrededor del acero de refuerzo a fin de eliminar los depósitos de piedras, colmenas y cavidades de aire atrapado. La consolidación se obtiene por medio de métodos manuales o mecánicos. El método a seleccionar dependerá de la consistencia de la mezcla y de las condiciones del colado.

### **2.1.8 Curado del concreto.**

El curado consiste en el mantenimiento de contenidos de humedad y de temperaturas satisfactorio en el concreto durante un periodo definido después de la colocación y acabado, con el propósito que se desarrollen las propiedades deseadas.

En la medida que la reacción de hidratación se desarrolle y complete, influirá en la resistencia, durabilidad y en la densidad del concreto. La mayoría de los concretos frescos contienen una cantidad de agua considerablemente mayor a

la requerida para que tenga lugar la hidratación completa del cemento; sin embargo cualquier pérdida de agua apreciable por evaporación o por otro medio retrasará o evitara la completa hidratación. Si la temperatura es favorable, la hidratación es relativamente rápida los primeros días después de haber colado el concreto; de ahí la importancia que se impida o que al menos se reduzca la evaporación. Los objetivos del curado son por consiguiente:

- Prevenir la pérdida de humedad del concreto.
- Mantener una temperatura favorable en el concreto durante un periodo definido.

Un curado deficiente o la falta total de curado pueden reducir la resistencia del concreto en la estructura, comparada con la de las probetas con curado normalizado, hasta en un 50%, como puede apreciarse en la figura 2.6

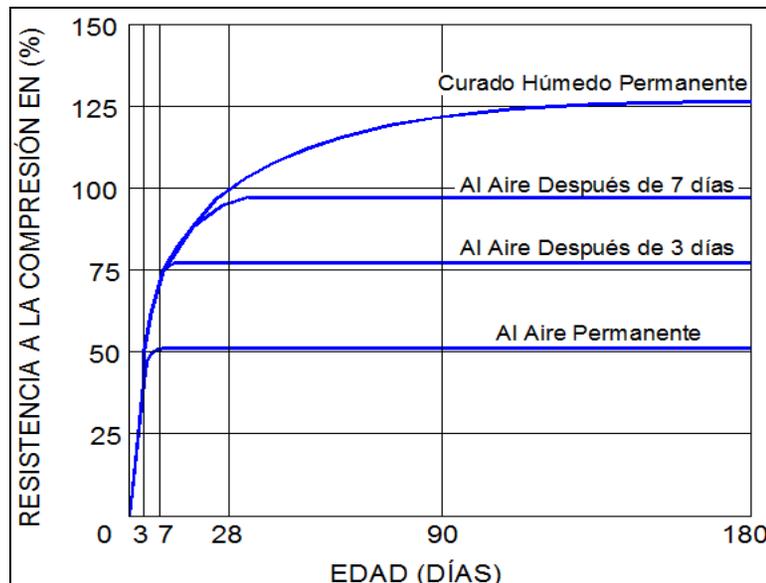


Figura 2.6 Incrementos de resistencia en el concreto con la edad mientras se cuenta con humedad y temperatura favorables para la hidratación del cemento.

Tomado de Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC

La pérdida de agua también provocará que el concreto se contraiga, creando así esfuerzos de tensión. Si estos esfuerzos se presentan antes que el concreto haya adquirido la resistencia a la tensión adecuada, se podría tener como resultado agrietamientos superficiales.

Cuando la temperatura es baja, la hidratación avanza a una velocidad lenta. Las temperaturas menores de 10°C son desfavorables para el desarrollo de la resistencia a edad temprana; debajo de los 4.5°C el desarrollo de la resistencia a edad temprana se retrasa en gran medida y a temperaturas de congelación o por debajo de ellas, hasta los -10°C el desarrollo de la resistencia es nulo.

En este trabajo se determinará la madurez del concreto para evaluar la evolución de la ganancia de resistencia a edad temprana. La madurez se define como el producto de la edad del concreto y de su temperatura de curado promedio por encima de una temperatura base. Esta temperatura base se conoce como Datúm y se define como la temperatura bajo la cual no hay ganancia de resistencia.

### **2.1.9 Curva teórica de generación de calor del concreto**

El método de la madurez es una opción para determinar el desarrollo de las resistencias en campo desde que la mezcla de concreto se encuentra en su estado fresco hasta cuando esta endurece.

El concepto está basado en el hecho de que la temperatura es un factor crítico en el proceso de la hidratación del cemento y por ende en el desarrollo de las

resistencias del concreto, especialmente a tempranas edades. El concepto de la Madurez está determinado por la multiplicación de intervalos de tiempo por la temperatura interna del concreto en estudio, estos productos se va sumando en el tiempo dando como resultado que la madurez es la suma de la multiplicación tiempo - temperatura.

Resulta trascendental para la aplicación del Método de la Madurez el conocer la evolución de la velocidad de liberación de calor con respecto al tiempo transcurrido, desde que inicia el proceso de Hidratación. Este proceso se ve representando en la figura 2.7

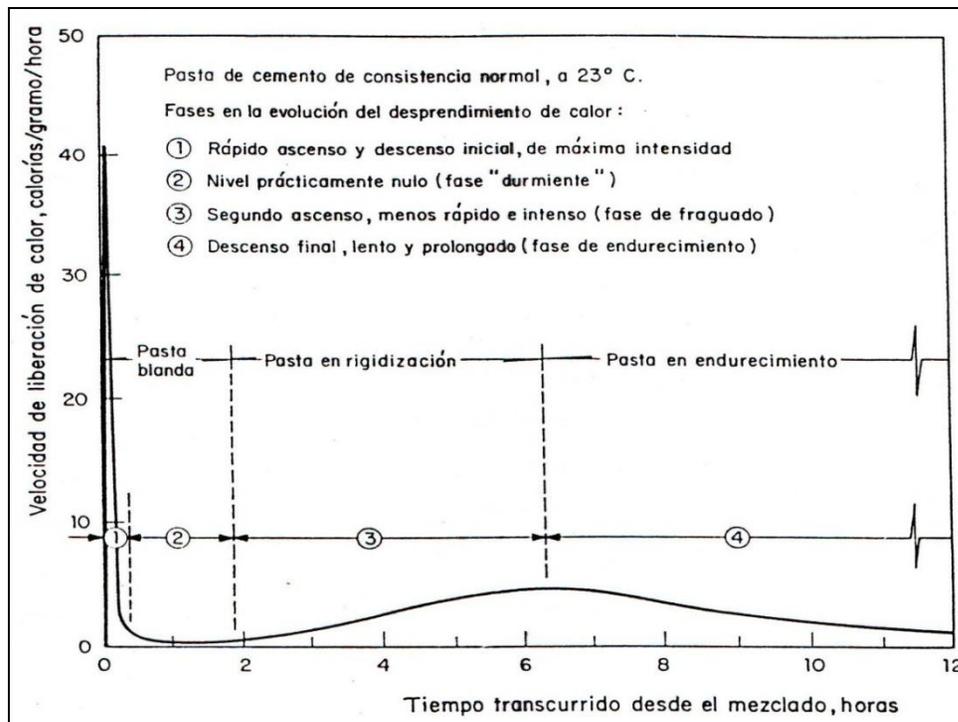


Figura 2.7 Evolución normal del desprendimiento de calor de la pasta de cemento en las primeras 12 horas después del mezclado  
Tomada del Manual de Tecnología del Concreto

En el grafico anterior se señalan cuatro fases características del proceso de hidratación y liberación de calor en el concreto, las cuales se explican a continuación.

*FASE I:* En los primeros minutos después del mezclado se produce un intenso y breve desprendimiento de calor, que en cuestión de minutos alcanza un máximo de 40 cal/gramo/h, o más, luego desciende bruscamente. Este desprendimiento de calor se atribuye principalmente a la hidratación de la cal libre y a la disolución de las impurezas del cemento, y es posible que en ciertas condiciones tenga influencia en la perdida inicial de revenimiento del concreto.

*FASE II:* Al disminuir bruscamente, el desprendimiento de calor desciende hasta un valor mínimo de 1 cal/gramo/h, se mantiene en ese nivel por una o dos horas; a esta fase se le conoce como “durmiente”. En esta etapa, la hidratación del cemento se inhibe por la primaria formación de una película gelatinosa alrededor de los granos de cemento, y como consecuencia de esta inhibición, la pasta de cemento se conserva blanda y moldeable durante toda la fase “durmiente”.

*FASE III:* Al transcurrir, aproximadamente, dos horas se inicia de nuevo un incremento en la velocidad de la liberación de calor, que al término de seis o siete horas alcanza un segundo máximo del orden de 5 cal/gramo/h. Esta tercera fase se identifica bastante bien con el periodo de rigidización o de fraguado de la pasta, en que esta se convierte en un cuerpo rígido pero frágil, lo cual se atribuye al crecimiento de grosor en la película gelatinosa alrededor de

los granos de cemento, de este modo se origina un contacto entre ellos y los moviliza, pero sin que se produzca una verdadera aglutinación que genere resistencia a la pasta rigidizada.

*FASE IV:* La última fase inicia con el segundo máximo, a partir del cual comienza a descender la velocidad de liberación de calor, para disminuir en 24 horas a un valor cercano a 1 cal/gramo/h, y después continua descendiendo muy lentamente en el curso del tiempo, en forma prácticamente asintótica con el eje horizontal. Poco antes del inicio de esta última fase comienzan a desarrollarse filamentos tubulares en la costra gelatinosa que recubre los granos de cemento y conforme avanza la hidratación, estos filamentos crecen y se entrelazan para formar una especie de tejido que aglutina firmemente los granos en proceso de hidratación y comienza a dar resistencia mecánica a la pasta solidificada. Esta trama filamentosa es el “gel de cemento”, constituido principalmente por silicatos de calcio hidratados, el cual es responsable de las propiedades mecánicas de la pasta endurecida, y cuya formación se continúa incrementando a lo largo del desarrollo de esta última fase.

## **2.2 Evolución de los cambios de estado del concreto fresco a través del tiempo**

El concreto convencional, es un material que en horas se transforma y cambia de estado; cuando está fresco (moldeable), su condición inicial es blanda, no tiene forma, pero con el transcurso del tiempo se vuelve rígido y toma la forma del

recipiente que lo contiene, luego continúa evolucionando para adquirir propiedades definitivas.

### **2.2.1 Estudio de los cambios de estado del concreto**

Al concreto recién mezclado se le considera en estado fresco mientras este se conserva suficientemente blando para ser moldeado, todo lo contrario cuando el concreto se encuentra ya colado se considera como un material en periodo de endurecimiento progresivo. Para poder dar un buen uso y tratamiento al concreto en ambos estados, es necesario que conozcamos sus respectivas características y propiedades.

El proceso de solidificación y endurecimiento del concreto es el resultado de las reacciones químicas que se producen cuando el cemento entra en contacto con el agua, lo cual corresponde al proceso de hidratación del cemento, para el cual se le considera en dos etapas, la del fraguado y la del endurecimiento.

La etapa del fraguado, normalmente dura pocas horas, es decir es el cambio de estado en que el concreto deja de ser un material sin una forma definida, para convertirse en un cuerpo rígido pero frágil, es decir el concreto recién fraguado es un material solidificado que prácticamente no tiene resistencia mecánica. Se considera que la etapa de la verdadera adquisición de resistencia mecánica, se inicia cuando termina el fraguado, y se prolonga durante un lapso que dura meses, e incluso años.

A continuación, en la figura 2.8, se presenta la evolución de la resistencia del concreto, aunque no se manifiesta alguna característica específica que permita precisar el final del fraguado y el principio del endurecimiento, ni tampoco se identifica el límite de conservación del estado fresco. Lo único que puede notarse que el concreto se conserva blando las primeras dos horas, y que a partir de ahí comienza a mostrar síntomas de rigidización.

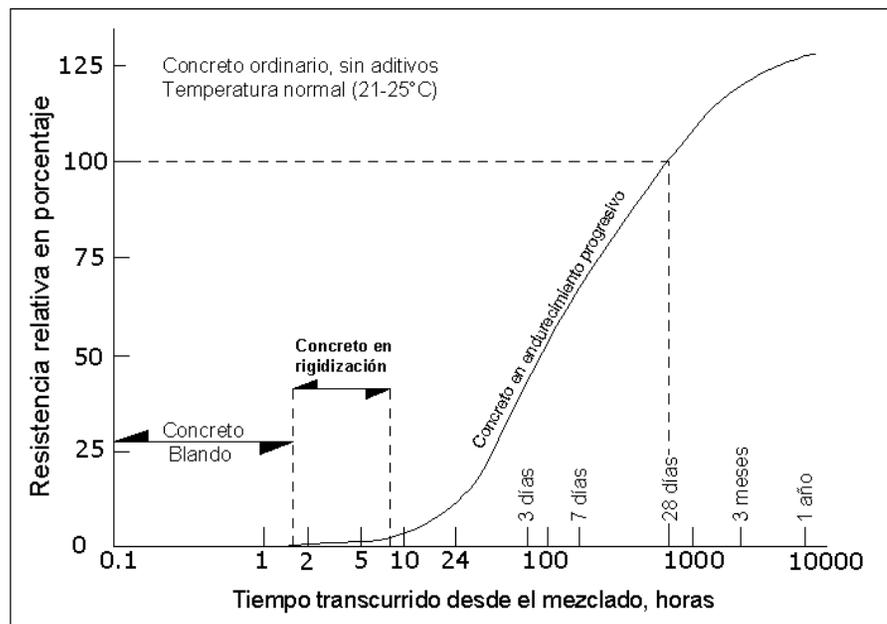


Figura 2.8: Avance de la Rigidización y Endurecimiento del Concreto con el Tiempo.  
Tomada del Manual de Tecnología del Concreto. Tomo II

Debido a la importancia que posee el concreto en estado fresco en la etapa constructiva, interesa estudiar la evolución de éste, desde que se elabora hasta ser colocado, compactado y en reposo dentro de los moldes que le darán su forma final; así como también el comportamiento en estado endurecido, ya que

es decisivo en el funcionamiento operativo de las estructuras durante su vida útil.

Para el seguimiento del estudio de la evolución de la fase de endurecimiento, resulta factible la determinación de la resistencia mecánica mediante el ensayo a la compresión, ya sea en la pasta de cemento o en concreto endurecido, de esta manera se obtiene la resistencia evolutiva del endurecimiento mostrado en la Figura 2.8, este procedimiento no es aplicable a la fase en donde el concreto se encuentra en proceso de rigidización o fraguado, debido a que no produce resistencia mecánica en esta fase.

Para salvar esta limitación, el seguimiento del avance de la rigidización o del fraguado del concreto, puede realizarse mediante pruebas de penetración en el que se evalúa la resistencia que el material en curso de rigidización opone para ser penetrado por agujas con determinadas características. Tratándose del concreto el proceso es seguido por ASTM C 403.

Con este procedimiento puede seguirse con relativa facilidad y precisión el progreso de la rigidización tal como se muestra en la Figura 2.9, en la cual se muestra la forma característica de la evolución del fraguado de una mezcla de concreto ordinario a temperatura normal.

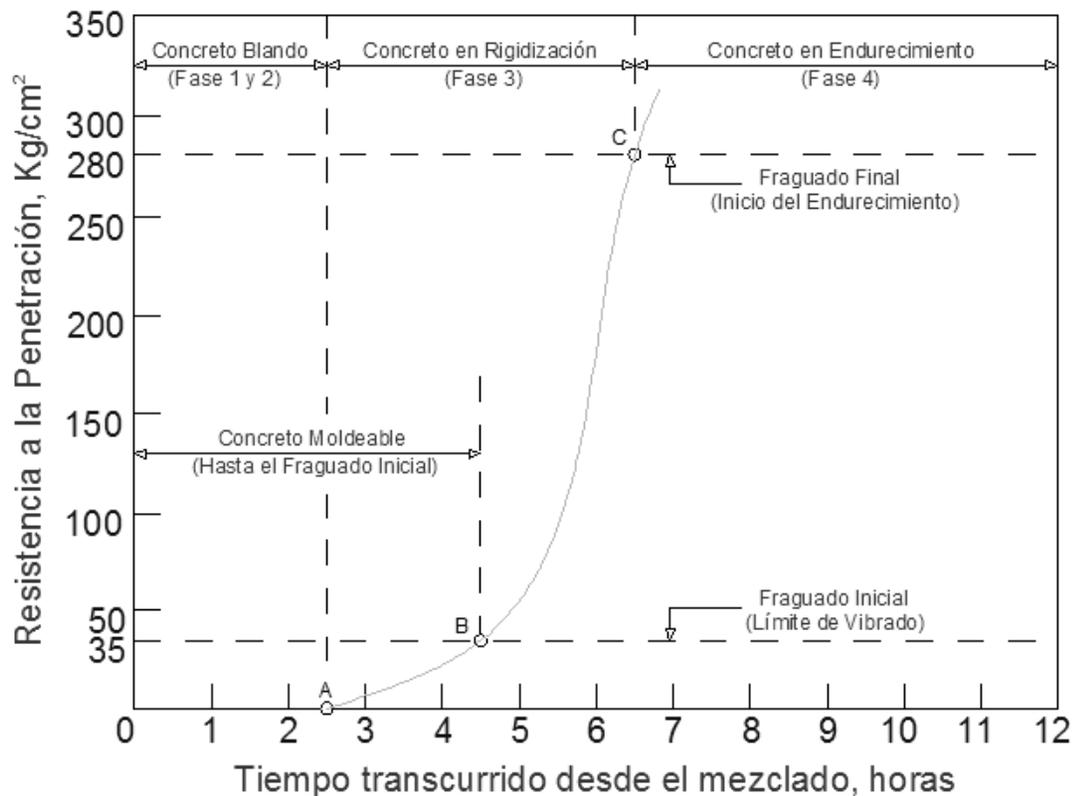


Figura 2.9: forma característica del proceso de fraguado del concreto  
 Tomada del Manual de Tecnología del Concreto. Tomo II

En la figura 2.9 se muestran tres puntos (A, B y C) sobre la curva de evolución del fraguado, los cuales son decisivos para definir el comportamiento en este aspecto de cada concreto en particular, en condiciones dadas. El punto “A” define el tiempo a partir del mezclado en el que el concreto comienza a oponer resistencia a la penetración, es decir, empieza a adquirir rigidez. El punto “B” corresponde al tiempo en que el concreto llega a una resistencia a la penetración de  $35 \text{ kg/cm}^2$  ( $500 \text{ lb/pulg}^2$ ), valor representativo de rigidez que por definición (ASTM C 403) se designa como “fraguado inicial”. Por último el punto “C” marca el tiempo en el cual el concreto manifiesta una resistencia a la

penetración igual a  $280 \text{ kg/cm}^2$  ( $4000 \text{ lb/pulg}^2$ ), el cual representa un estado de rigidez conocido como “fraguado final”.

Aún cuando el concreto experimenta gradualmente una serie de estados sucesivos, es conveniente establecer hasta donde se puede considerar en estado fresco el concreto y cuando se le debe juzgar en estado endurecido.

Concreto fresco se le llama a la mezcla recién elaborada, que en el caso del concreto convencional, es una masa plástica que puede ser moldeada con relativa facilidad, y que tal efecto permanece por muy poco tiempo.

El periodo del fraguado comienza cuando el concreto fresco empieza a perder plasticidad y finaliza hasta que alcanza un cierto grado arbitrario de rigidez (Fraguado final).

### **2.2.2 Límites de los estados del concreto fresco**

Al examinar las características y propiedades que definen el comportamiento del concreto, de ordinario solo se le consideran dos estados básicos, el fresco y el endurecido, debido a que representan dos aspectos esencialmente opuestos en el curso de su utilización en la construcción de estructuras. El comportamiento del concreto en estado fresco es importante en toda la etapa constructiva, desde su elaboración hasta que se encuentra colado, compactado y en reposo dentro del espacio moldeado, y el comportamiento del concreto en estado endurecido es decisivo en el funcionamiento operativo de las estructuras a lo largo de su vida útil. Pero como ya se indicó el concreto pasa por una serie

de cambios graduales, por lo tanto es conveniente establecer hasta donde se le puede considerar en estado fresco y a partir de cuando se le debe juzgar como un concreto en estado endurecido.

El término concreto fresco comúnmente se aplica a la mezcla recién elaborada que, en el caso del concreto convencional, es una masa plástica que puede ser moldeada con relativa facilidad, y que a la temperatura normal de prueba (21-25°C) permanece en ese estado durante pocas horas. A partir del momento en que el concreto fresco comienza a perder plasticidad y hasta que alcanza un cierto grado de rigidez, conocido como fraguado inicial, se dice que se encuentra en periodo de fraguado.

Una vez rebasado el fraguado inicial, el concreto entra a un estado de rigidización progresiva, en el que ya no debe ser perturbado a manera de evitar el riesgo de producirle un daño irreversible, lo cual significa que, al cumplirse el tiempo de fraguado inicial, el concreto ya debe estar perfectamente colocado y compactado en su posición definitiva dentro de la estructura. Este proceso de rigidización o de fraguado avanza con relativa rapidez hasta llegar al fraguado final, y continua hasta entrar al periodo de endurecimiento. Al concreto recién fraguado, el cual se encuentra en el inicio del periodo de endurecimiento y que por ello casi no posee mucha resistencia mecánica, se le denomina concreto "verde", el cual es llamado comúnmente concreto "tierno". El curado en esta condición es indispensable para que el periodo de endurecimiento continúe; de ahí la necesidad de proveer un buen sistema de curado para el concreto en la

estructura a partir del fraguado, este proceso debe mantenerse el tiempo que sea posible.

El desarrollo del periodo de endurecimiento puede prolongarse durante meses o años, mientras subsista en el concreto alguna porción de cemento anhidro, en condiciones de ser hidratado. Sin embargo, en ningún momento puede descartarse la posibilidad de que la completa hidratación del cemento, y el correspondiente endurecimiento del concreto, no alcance a realizarse nunca, ya que los productos de hidratación suele formar una costra alrededor de los granos de cemento, que tiende a inhibir progresivamente el acceso de agua hacia el núcleo del material anhidro.

La mayoría de las veces, el proyecto se realiza con base en las propiedades que el concreto debe adquirir al cabo de 28 días de endurecimiento, por lo cual se considera que a esta edad el estado del concreto es representativo al de un concreto ya endurecido. Sin embargo, un concreto no alcanza el 100 por ciento de su resistencia a esta edad, sólo alcanza a desarrollar el 80 por ciento de su endurecimiento potencial; de modo que el concreto después de los 28 días seguirá adquiriendo resistencia.

La resistencia a compresión del concreto, es la propiedad que frecuentemente se toma como medida de su endurecimiento y como índice de sus propiedades mecánica general. Es por ello que se propone como una alternativa el método de la madurez del concreto, para obtener información de la etapa anterior al endurecimiento, con tres fines principales:

- Obtener información temprana que permita establecer la evolución de las características del concreto,
- Conocer la resistencia del concreto desde sus primeras edades, con el objeto de definir el tiempo adecuado para la remoción de moldes.
- Determinar la resistencia del concreto a edades cortas, medianas y largas, incluyendo la de proyecto, para seguir su evolución y para poder verificar el cumplimiento del nivel de resistencia que es requerido en las especificaciones de la obra.

A continuación se presenta la figura 2.10, que nos muestra la duración de los lapsos correspondientes a los cambios de estado, para el caso de un concreto convencional realizado con cemento Pórtland ordinario, sin aditivos, a temperatura normal (21-25°C). Aquí también se indican las principales actividades que realmente se efectúan en dichos lapsos, al utilizar el concreto en la construcción de estructuras.

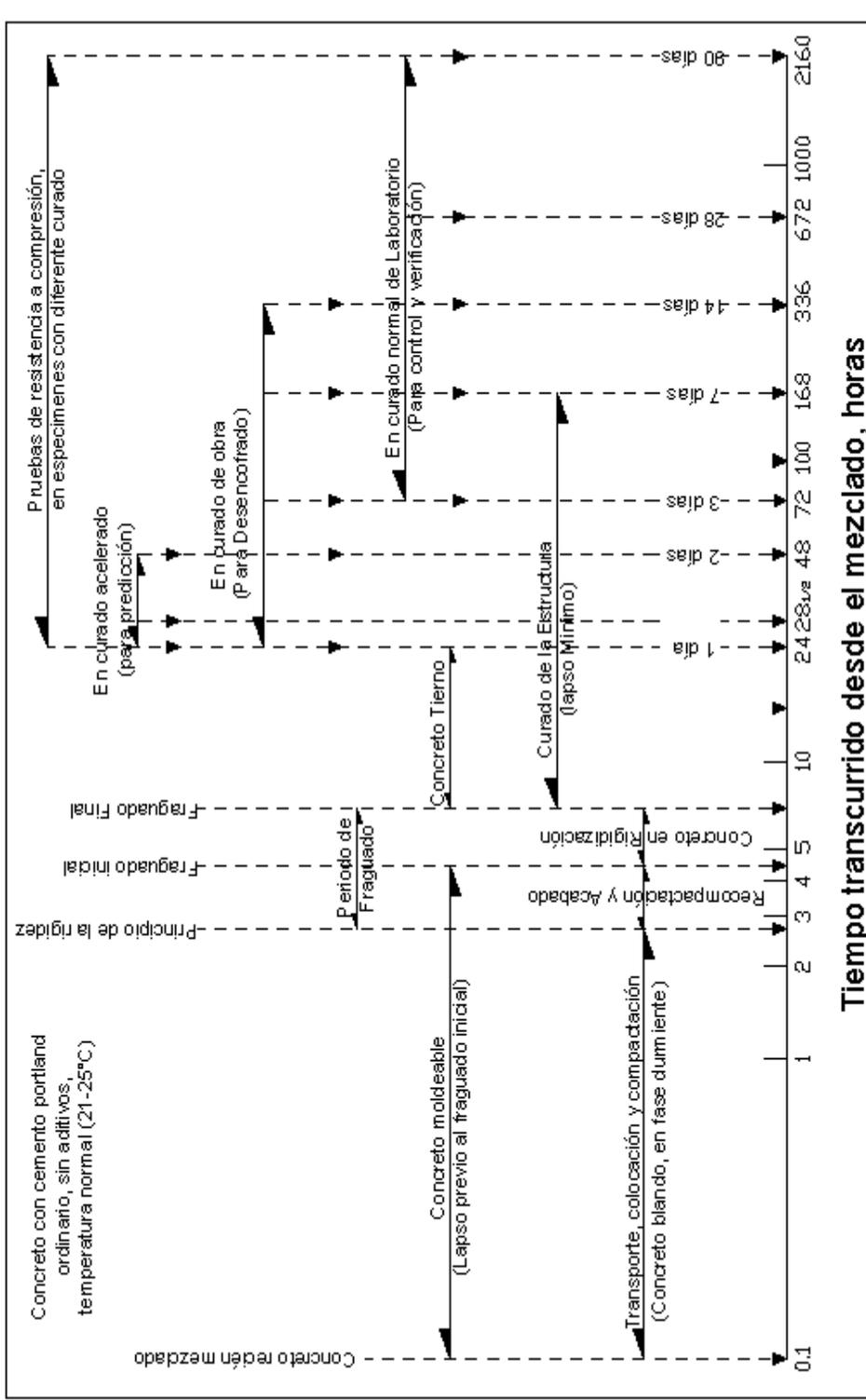


Figura 2.10: Lapsos y Actividades Características en los Diferentes Estados de un Concreto Ordinario a Temperatura Normal.

Tomada del Manual de Tecnología del Concreto. Tomo II

### **2.2.3 Rigidización del concreto a edades tempranas**

A partir del momento en que se elabora el concreto, dan inicio las reacciones químicas entre el cemento y el agua que conducen primero a la pérdida de fluidez y rigidización de la mezcla luego a su endurecimiento y adquisición de resistencia mecánica. El proceso evolutivo de este cambio de aspecto y propiedades se caracteriza por un periodo inicial llamado “durmiente”, durante el cual la mezcla de concreto permanece sin grandes cambios en su consistencia o fluidez inicial; a continuación se manifiesta un segundo periodo en el que la mezcla comienza a perder fluidez notoriamente hasta convertirse en una masa rígida pero quebradiza pero ya no es moldeable, y al cual se le denomina periodo de fraguado; finalmente, en este punto se inicia un tercer periodo que puede durar varios años , que se manifiesta por el endurecimiento propiamente dicho o adquisición de resistencia mecánica del concreto.

No hay características precisas que permitan establecer con exactitud las fronteras entre estos periodos, ya que se trata de la evolución gradual de un mismo proceso. Sin embargo, con el ensayo de la resistencia a la penetración (ASTM C 403) se puede determinar el momento de inicio y finalización del fraguado del concreto.

La duración del tiempo de fraguado del concreto depende de varios factores extrínsecos dados por las condiciones de trabajo en obra, en los que destaca por sus efectos la temperatura. En condiciones fijas de temperatura, el tiempo de fraguado puede experimentar variaciones de menor cuantía derivadas del

contenido unitario, la clase y la finura del cemento. Así, por ejemplo, tienden a fraguar un poco más rápido:

- Las mezclas de concreto de alto consumo de cemento que las de bajo consumo.
- Las mezclas de concreto de cemento Pórtland-puzolana.
- Las mezclas de concreto de cemento Pórtland tipo III que las de tipo II.

Sin embargo, normalmente estas variaciones en el tiempo de fraguado son de poca importancia práctica y no justifica hacer un cambio por este solo concepto.

Otro aspecto relacionado con la influencia del cemento sobre el tiempo de fraguado del concreto, se refiere al uso que frecuentemente se hace de aditivos con el fin de alargar ese tiempo en situaciones que lo requieren, como es el caso de los colados de grandes volúmenes de concreto, particularmente cuando se realizan en condiciones de alta temperatura ambiental. Hay antecedentes en el sentido de que algunos aditivos retardadores del fraguado pueden reaccionar adversamente con ciertos compuestos del cemento, ocasionando una rigidez prematura en la mezcla que dificulta su manejo. Para prevenir este inconveniente, es recomendable verificar mediante pruebas efectuadas anticipadamente, el comportamiento del concreto elaborado con el cemento y el aditivo propuesto.

## 2.2.4 Ensayos al concreto fresco

### 2.2.4.1 Temperatura

Debido a la importante influencia que la temperatura del concreto tiene sobre las propiedades del concreto fresco y endurecido, muchas especificaciones delimitan la temperatura del concreto fresco. El termómetro con el cual se mide la temperatura deberá tener una precisión de 1 °C y deberá permanecer dentro de la muestra representativa un tiempo mínimo de dos minutos o hasta que la lectura se estabilice, con una inmersión en el concreto de 3 pulg (75mm) o menos durante la operación. Una cantidad mínima de 7.5 cm de concreto deberá rodear la porción sensitiva del termómetro. También se puede disponer de medidores electrónicos con pantallas digitales de precisión y con cuadrante indicador (figura 2.11 y 2.12). La medición de la temperatura (norma ASTM C 1064 “Método Estándar de Ensayo para Temperatura del Concreto de Cemento Portland Recién Mezclado”) deberá completarse dentro de los 5 minutos siguientes a la obtención de la muestra.



Figura 2.11 Termómetros digitales  
Tomada de presentación del ISCYC



Figura 2.12 Termómetros análogos  
Tomada de presentación del ISCYC

### **2.2.4.2 Revenimiento**

El propósito de la prueba de revenimiento es determinar la consistencia del concreto. Esta es una medida de la fluidez o movilidad relativa de la mezcla, es el mayor o menor trabajo que hay que aportar al concreto en estado fresco en los procesos de fabricación, transporte, colocación, compactación y acabado. Esta propiedad del concreto está influenciada principalmente por la pasta, el contenido de agua y el equilibrio adecuado entre gruesos y finos.

El revenimiento se mide tradicionalmente por la consistencia, pero es una manera limitada de evaluarla, siendo más una prueba de uniformidad que de trabajabilidad. Es común que esta prueba sea un condicionante de aprobación o desaprobación del concreto fresco.

Este ensayo está basado en el método ASTM C-143 "Método de ensayo estándar para la consistencia del concreto de cemento hidráulico". Es verdad que el incremento o disminución en el contenido de agua causará el correspondiente aumento o disminución en el revenimiento del concreto, siempre y cuando todos los otros materiales y condiciones permanezcan constantes. Sin embargo, muchos factores pueden causar que el revenimiento del concreto cambie sin que varíe el contenido de agua. Además, el contenido de agua puede aumentar o disminuir sin producir un cambio aparente en el revenimiento. Ciertos factores como el cambio de las propiedades de los agregados o granulometría, proporciones de la mezcla, contenido de aire,

temperatura del concreto o el uso de aditivos especiales; pueden influir en el revenimiento del concreto.

Se han establecido 3 tipos de asentamientos característicos:

- Normal: Es el propio de una mezcla rica y con una correcta cantidad de agua. En este caso el concreto no sufre grandes deformaciones, sus componentes permanecen unidos debido al cemento que los liga.
- Corte: Se produce por un exceso de agua, la pasta pierde su poder aglutinante produciendo asentamientos mayores y reduciendo el coeficiente de rozamiento.
- Desplomado: Se produce cuando el concreto tiene mucha agua y es pobre en arena, el lugar de asiento se produce rotura por derrumbamiento y algunas veces por corte.

#### **2.2.4.3 Tiempo de fraguado del concreto**

Durante el fraguado el concreto pasa de un estado plástico, donde se deforma indefinidamente por la aplicación de carga, a un estado en donde se comporta de manera elástica ante la acción de la misma. Los cambios que se pueden observar en el concreto durante este proceso son los tiempo de fraguado (inicial y final).

### **2.2.4.3.1 Tiempo de fraguado**

Al considerar el cambio de estado plástico al endurecido del concreto, de acuerdo con la regulación de tiempos de mezclado, transporte, colocación y compactación, se encuentra que hay que ajustar los tiempos a los intereses particulares de las personas que trabajan con este material.

Para el constructor es necesario que el concreto pueda ser vibrado hasta cierto tiempo después de depositado en las formaletas y así remover los encofrados lo más rápido posible para utilizarlos en otro punto de la obra. Para un prefabricado puede ser deseable que el concreto fragüe rápido para utilizar más veces al día los moldes y poder mover los elementos prefabricados a los patios de almacenamiento a las pocas horas de vaciados.

La clasificación de acuerdo con el tiempo de fraguado se hace en concretos de fraguado lento, normal y rápido. Los de fraguado lento son aquellos que al incluir un aditivo retardante demoran más en endurecer. Los de fraguado normal son los adicionados con aditivos reductores de agua que endurecen prácticamente con la misma velocidad que un concreto sin aditivos. Por último, los concretos acelerados son los que endurecen más rápido debido a la adición de aditivos acelerantes que permiten que la mezcla fragüe mucho más rápido que una normal.

### **2.2.4.3.2 Determinación del tiempo de fraguado**

Se ha encontrado que el tiempo de fraguado del cemento se puede utilizar como índice del tiempo de fraguado del concreto, correlacionándose razonablemente con el del mortero.

Como en el caso del cemento, el tiempo de fraguado del concreto es necesariamente un valor arbitrario tomado en algún punto del proceso gradual de endurecimiento, definido en términos de un método de ensayo y un aparato particular. Se han propuesto varios métodos en los que se incluyen medidas de resistencia eléctrica, consistencia, velocidad de onda, características de exudación, calor de hidratación, tiempo límite replastificación por vibración, y resistencia a la penetración.

De los anteriores métodos, la norma ASTM C 403 describe el de la resistencia a la penetración para concreto con asentamientos mayores que cero. Este ensayo es similar al efectuado con el de las agujas de Vicat, y consiste en tomar una muestra de mortero procedente del tamizado a través de una malla de 4.76 mm. (No 4) en una porción de concreto fresco. Se somete periódicamente a la penetración (ver Figura 2.13) de agujas de punta plana y se registra el tiempo a partir del momento de mezclado y se dibuja una curva esfuerzo a la penetración vs. tiempo.



Figura 2.13: Ensayo de fraguado del concreto  
Tomada de presentación del ISCYC

De dicha curva se toma como tiempo de fraguado inicial aquel cuya resistencia a la penetración es de 500 PSI (35 kg/cm<sup>2</sup>) y como tiempo de fraguado final aquel que alcanza un valor de 4000 PSI (280 kg/cm<sup>2</sup>). Estos puntos arbitrariamente escogidos, son de mucha ayuda en estudios comparativos de varios factores y en la especificación de límites de velocidad de endurecimiento del concreto que se está utilizando. La penetración de 500 PSI corresponde a la “vibración límite”, después de la cual el concreto no puede replastificarse por vibración. El valor de 4000 PSI corresponde a la resistencia a la compresión de un mortero de aproximadamente 100 PSI. Una vez se obtiene el fraguado final, se dice que comienza el endurecimiento del concreto.

Los parámetros que más inciden sobre el tiempo de fraguado son: el tipo de cemento utilizado, la temperatura ambiente y la temperatura del concreto. De tal forma, que el fraguado de un concreto elaborado con cemento tipo III es más

rápido. Por otro lado, en climas fríos, el proceso de la hidratación del cemento es más lento con el consecuente retardado del tiempo de fraguado, mientras que cuando la temperatura es elevada, se reduce esta duración con un consiguiente aumento de la resistencia a muy temprana edad. El tiempo de fraguado normalmente no es afectado por el agregado, sin embargo, la presencia de sales solubles o materia orgánica pueden influir en esta propiedad.

En la Figura 2.14, se muestra un ejemplo del efecto de la temperatura en el tiempo de fraguado del concreto.

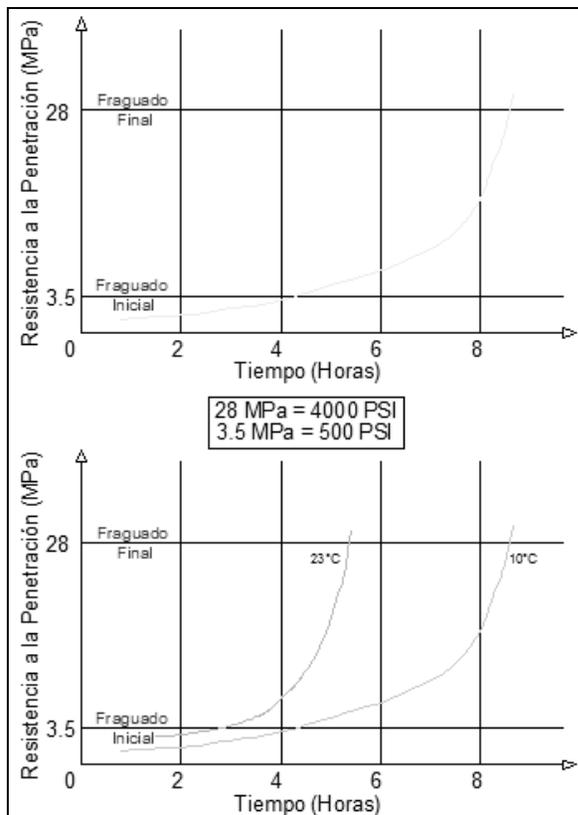


Figura 2.14: Efecto de la temperatura sobre el tiempo de fraguado  
Tomada de Tecnología y propiedades 2ª edición

### **2.2.5 Resistencia del concreto**

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a la carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) a una edad de 28 días se le designa con el símbolo  $f'c$ . Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas especímenes cilíndricos de concreto que miden 6 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de altura. La resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseño de estructuras. El concreto de uso generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 210 y 350  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Un concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de al menos 420  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Resistencia de 1,400  $\text{kg}/\text{cm}^2$  se ha llegado a utilizar en aplicaciones de construcción.

En la sección 2.3 se estudia el ensayo del método de madurez del concreto, el cual será el que objetivo de esta investigación para determinar la evolución de resistencia en una vivienda moldeada y colada en el sitio, ya que precisamente es esa la finalidad del ensayo, conocer la evolución de las características del concreto desde el momento que inicia la hidratación del cemento hasta que cumple su resistencia potencial o hasta que el usuario desea conocer.

## **2.3 Madurez del concreto**

El método de la madurez es una técnica que considera los efectos combinados del tiempo y temperatura en el desarrollo de la resistencia, es posible estimar el desarrollo de resistencia midiendo la temperatura del concreto durante el periodo de curado a diferentes temperaturas, por medio del índice de madurez. Figura 2.15.

La ganancia de resistencia del concreto es más rápida a temperaturas altas en edades tempranas, a temperaturas más bajas, la ganancia de resistencia es más lenta, en cambio una temperatura muy baja, generalmente en el rango de  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la hidratación del cemento cesa y por consiguiente la ganancia de resistencia también. La temperatura exacta a la cual la ganancia de resistencia cesa depende de cada mezcla, de su composición y de las propiedades químicas del material cementante.

### **2.3.1 Definición de madurez**

La definición de madurez del concreto es amplia y no se limita solo al desarrollo de resistencia, ya que dentro del concepto de madurez son varias las propiedades de la mezcla que se pueden desarrollar y estudiar a través del tiempo, para este caso en particular la propiedad en estudio será el desarrollo de la resistencia mecánica.

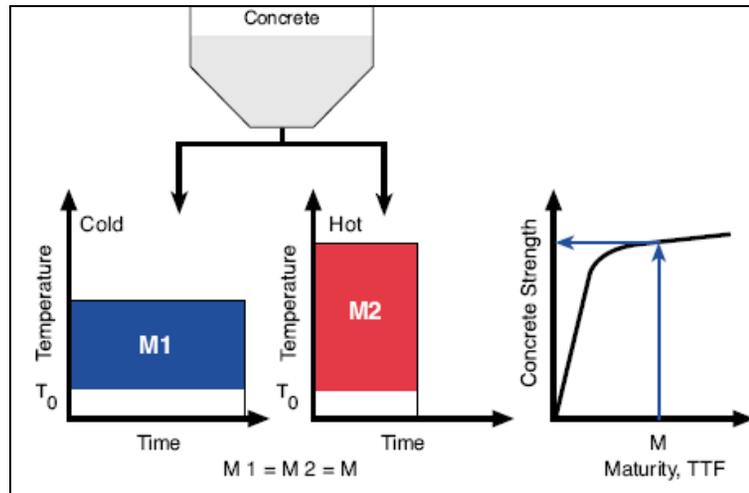


Figura. 2.15: Evaluación de la Madurez del concreto bajo dos distintas temperaturas de curado  
Tomado de IPRF-01-G-002-03-6

### 2.3.2 Reseña histórica y antecedentes del método de madurez

Los orígenes del método se remontan a trabajos en concreto curado a vapor, en Inglaterra a finales de los años 40 y comienzos de los 50.

Como resultado de los esfuerzos para la transferencia de tecnologías por la administración federal de la carretera (FHA por sus siglas en ingles), existió en Estados Unidos un interés renovado por el método.

El 2 de marzo de 1973, el segmento de un edificio de varios pisos, en construcción en el condado de Fairfax sufrió un derrumbamiento progresivo, Figura 2.16, por el percance murieron catorce obreros y 34 resultaron heridos. La oficina nacional de los estándares (NBS por sus siglas en ingles) fue pedida por la administración ocupacional de la seguridad y sanidad (OSHA por sus siglas en ingles) determinar la causa técnica del derrumbamiento.

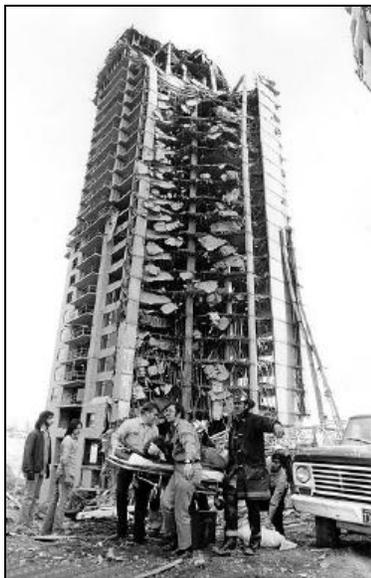


Figura. 2.16 Colapso de un segmento del edificio debido al retiro prematuro del encofrado.  
Tomado de IPRF-01-G-002-03-6

El informe de la NBS concluyó que la causa más probable del percance fue el retiro prematuro del encofrado, dando lugar a esfuerzos que excedieron la capacidad del concreto relativamente joven [Carino y otros 1983a].

A la hora del percance, el concreto de la losa del piso donde se cree que se inicio la falla tenia solo cuatro días de edad. Durante ese período, la temperatura media registrada en un aeropuerto próximo era de alrededor de 7°C, los investigadores de NBS encontraron dificultad al usar datos publicados relativos al desarrollo de resistencia, obtenidos bajo condiciones de temperatura constante para realizar una estimación confiable de la resistencia del concreto en el sitio a la hora de la falla. Esto generó interés en un concepto, relativamente nuevo, conocido como el método de la madurez.

El historial de temperatura es utilizado para calcular un valor llamado índice de madurez, para cada mezcla de concreto la relación entre la resistencia y el índice de madurez se establece de antemano, y se utiliza en campo para estimar la resistencia en el sitio en base a la madurez que presenta.

En un estudio posterior bajo condiciones simuladas de campo la NBS, investigó la aplicabilidad del método de la madurez [Carino y otros 1983b], por medio de tres diversas mezclas de concreto, utilizadas para fabricar losas que contenían moldes cilíndricos push-out (ASTM C 873). Además de los cilindros del push-out fueron moldeados otros cilindros y almacenados en un cuarto de curado húmedo, y las losas fueron curadas al aire libre. El objetivo era determinar si la relación resistencia-madurez del concreto de los cilindros del push-out curados en campo era igual que para los cilindros compañeros curados en laboratorio.

Los resultados de este estudio fueron reveladores: En una mezcla había concordancia para la misma madurez entre las resistencias de especímenes curados en campo y los curados en laboratorio.

Para las otras dos mezclas había diferencias significativas, el análisis del historial de temperatura de todos los especímenes reveló que, para esas dos mezclas, los especímenes curados al aire libre experimentaron diversas temperaturas a edad temprana comparada con los especímenes curados en laboratorio.

Para valores iguales de índice de madurez los especímenes con temperaturas más altas a edad temprana dieron lugar a resistencias iniciales más altas y baja resistencia a largo plazo, Este comportamiento se le conoce como efecto “Crossover”. Ilustrado en la figura 2.17.

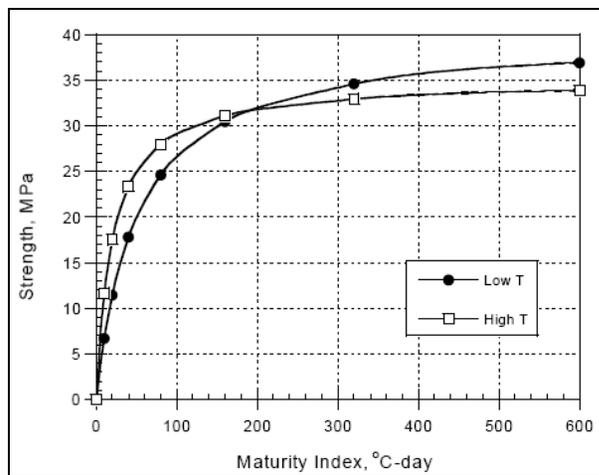


Figura. 2.17: Efecto crossover en dos mezclas de concreto a diferentes temperaturas a edades tempranas, durante el desarrollo de la Relación Resistencia – Madurez.

Tomado de National Institute of Standards and Technology

El 27 de abril de 1978, hubo un percance considerable en la construcción de una torre de enfriamiento en la isla del sauce, W.V (Figura 2.18a y 2.18b). El accidente produjo la muerte de 51 trabajadores que estaban en el sistema de andamio anclado al cascarón parcialmente terminado.

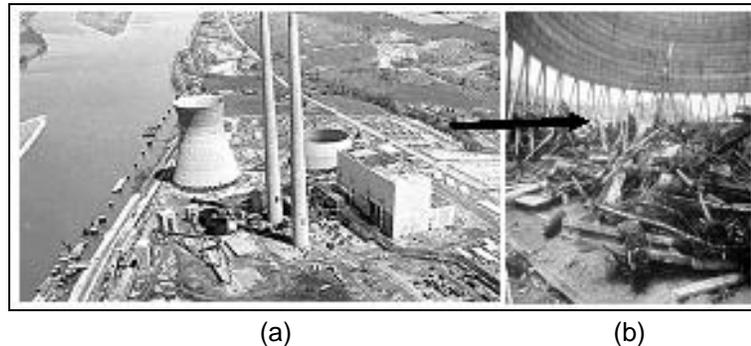


Figura. 2.18: Colapso de una torre debido a la aplicación de cargas a edades tempranas, en la imagen (a) se observa una torre similar a la del colapso y en la (b) imagen del resultado del colapso.

Tomado de IPRF-01-G-002-03-6

La NBS fue pedido otra vez para asistir al OSHA en la determinación de la causa técnica de la falla. Los investigadores concluyeron que la causa más probable del derrumbamiento era la poca resistencia del concreto para soportar las cargas aplicadas durante la construcción [Lew 1980]. En el momento del percance el concreto fundido en el interior del cascarón tenía un día de edad, y había sido expuesto a una temperatura ambiente de menos de 10 °C en promedio.

Este percance convenció a los investigadores de NBS que había una necesidad urgente de estándares para el cálculo de la resistencia del concreto en el sitio durante la construcción.

Por lo tanto, el personal de la NBS comenzó un estudio profundo del método de la madurez con el objetivo de obtener una profunda comprensión de las causas del efecto de “crossover” y desarrollar procedimientos alternativos para eliminar el problema [Carino 1981; Carino y Lew 1983; Carino 1982; Carino 1984].

La investigación de NBS propuso las bases para el desarrollo del primer estándar en el mundo en el uso del método de la madurez (ASTM C 1074).

A mediados de finales de los años 90's, la administración federal de carreteras emprendió esfuerzos para publicar los resultados, frutos del programa de investigación estratégico en carreteras (SHRP por sus siglas en ingles). Y como no existían nuevas investigaciones del método de madurez, el proyecto C-204 de SHRP lo recomendó como tecnología existente para estimar la evolución de resistencia en estructuras de carreteras en el sitio.

### **2.3.3 Fundamentos teóricos del método de madurez**

El método de madurez se basa en el historial de temperatura del concreto para la estimación del desarrollo de resistencia, siempre y cuando exista humedad disponible para la hidratación del cemento durante el tiempo de curado, utilizando ese historial de temperatura se calcula el índice de madurez.

Es importante mencionar que para cada mezcla de concreto la relación entre la resistencia y el índice de madurez es establecida de antemano (calibración de la mezcla). La relación y las mediciones del índice de madurez en campo son usadas para determinar la resistencia en el sitio.

#### **2.3.3.1 Teoría de Nurse-Saúl**

Los orígenes del método de la madurez se remontan a una serie de documentos en Inglaterra, donde se utilizaban métodos de curado acelerado [McIntosh, 1949; Nurse, 1949; Saúl, 1951].

Existiendo la necesidad de un procedimiento que explicara los efectos combinados del tiempo y temperatura sobre el desarrollo de resistencia bajo temperaturas de curado elevado.

Fue así que se propuso que el producto del tiempo y temperatura se podría utilizar para ese fin. Estas ideas condujeron a la famosa función de madurez de Nurse-Saúl.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

- M: Índice de madurez, en °C-horas ó °C-días
- T: Temperatura promedio del concreto, en °C, durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ .
- $T_0$ : datúm de temperatura
- t: tiempo transcurrido
- $\Delta t$ : intervalo de tiempo (días u horas)

El índice calculado por la Ecuación 2.3 fue llamado madurez, sin embargo, la terminología actual es el factor temperatura-tiempo según ASTM C 1074.

La figura 2.19 muestra un historial esquemático de la temperatura y del factor temperatura-tiempo según la Ecuación 2.3

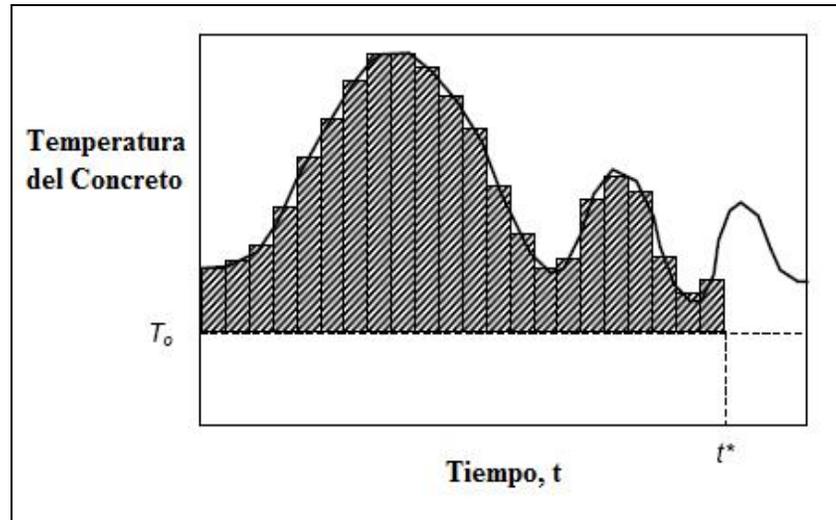


Figura. 2.19 Área bajo la curva, equivale a la madurez del concreto en un tiempo  $t$ , limitada por la temperatura del concreto y el datum de temperatura.  
Tomado de Nacional Institute of Standards and technology.

El factor temperatura-tiempo en una cierta edad iguala el área bajo la curva entre la temperatura y el datúm, definiendo este ultimo como la temperatura bajo la cual el concreto deja de ganar resistencia. Es por eso que en el gráfico de la figura 2.19 se toma el área bajo la curva limitada por la temperatura y el Datum ( $T_0$ ), que depende del tipo de cemento y de cómo es la ganancia de resistencia con respecto al tiempo.

Saúl en 1951 presentó el principio siguiente que se ha conocido como la regla de la madurez: *“El concreto de la misma mezcla con la misma madurez (medido en temperatura-tiempo) tendrá aproximadamente la misma resistencia, y cualquier combinación de temperatura y tiempo dará como resultado esa madurez.”*

La ecuación 2.3 se fundamenta en el principio de que el índice inicial de desarrollo de resistencia (durante el periodo acceleratory<sup>2</sup>) es una función lineal de temperatura [Carino 1984, 1991].

Tiempo después de la introducción de la ecuación 2.3 fue observado que esta aproximación lineal no pudo ser válida cuando las temperaturas de curado varían sobre una amplia gama. Consecuentemente, otros investigadores propusieron una serie de alternativas a la función de Nurse -Saúl [Malhora, 1971; Carino, 1991].

Sin embargo ninguna de las alternativas recibieron aceptación, y la función de Nurse – Saúl fue utilizada por todo el mundo hasta que una función mejorada fue propuesta a finales de los 70.

### **2.3.3.2 Teoría de Arrhenius**

En 1977, Freiesleben Hansen y Pedersen propusieron una nueva función para calcular un índice de madurez a partir del historial de temperatura del concreto. Esta función fue basada en la ecuación de Arrhenius [Brown y LeMay, 1988] la cual se utiliza para describir el efecto de la temperatura en el índice de una reacción química. La nueva función permitió el cálculo de la edad equivalente del concreto como sigue:

---

<sup>2</sup> Después de que el cemento y el agua se mezclan existe un retraso de tiempo, poco tiempo antes de que el desarrollo de resistencia comience. Este período se llama el período de inducción. Después del período de inducción hay un desarrollo rápido de resistencia, es éste el período acceleratory.

$$t_e = \sum_0^t -\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \Delta t \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

- $t_e$ : Edad equivalente a la temperatura de referencia
- $E$ : Energía de activación equivalente, J/mol
- $R$ : Constante universal del gas, (8.314 J/mol-K)
- $T$ : Temperatura absoluta promedio del concreto durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  en grados Kelvin
- $T_r$ : Temperatura absoluta de referencia

Usando la ecuación 2.4, la edad real del concreto se convierte en su edad equivalente, en términos de ganancia de resistencia a la temperatura de referencia. En Europa, la temperatura de referencia se toma generalmente a 20°C, mientras que en Estados Unidos se toma de 23 °C.

La implementación de esta función superó una de las limitaciones principales de la función de Nurse-Saúl porque permitió una relación no lineal entre el índice inicial de desarrollo de resistencia y la temperatura de curado. Esta dependencia de la temperatura es descrita por el valor de la energía de activación aparente,  $E$ . Los estudios comparativos demostraron que esta nueva función de la madurez es superior a la de función de Nurse - Saúl [Byfors, 1980; Carino, 1982]. El uso de la Ecuación 2.4 eliminó en gran parte las discrepancias

entre las relaciones de resistencia - madurez desarrollada con diversas temperaturas de curado inicial, es decir, eliminó las discrepancias en la madurez temprana mostrada en la fig. 2.17.

La nueva función, sin embargo, no puede explicar los efectos de la temperatura a edad temprana sobre la resistencia a edad tardía. Ésta es una limitación inherente del método de la madurez.

El parámetro dominante en la ecuación 2.4 es la “energía de activación” que describe el efecto de la temperatura sobre el índice de desarrollo de la resistencia.

A principios de los años 80, el autor comenzó una serie de estudios para obtener una mejor comprensión del método de la madurez [Carino, 1984], de este trabajo un procedimiento fue desarrollado para obtener la “energía de activación” de una mezcla de concreto dada.

El procedimiento se basa en la determinación del efecto de la temperatura de curado sobre la tasa constante de desarrollo de resistencia.

La tasa constante se relaciona con el tiempo de curado necesario para alcanzar cierta fracción de resistencia a largo plazo, obtenido por medio de una ecuación apropiada entre la resistencia adquirida versus la edad bajo curado (isotérmico) a temperatura constante.

Para determinar la “energía de activación” incluye los pasos siguientes:

- Elaboración de especímenes y curados bajo diversas temperaturas.
- Determinación de la resistencia a compresión a intervalos regulares de tiempo.
- Determinación del valor de la tasa constante, para cada temperatura de curado, por medio de una relación de resistencia – tiempo, también para cada juego de datos de Resistencia – Tiempo.
- Grafique los logaritmos naturales de la razón constante versus el inverso de la temperatura de curado en grados Kelvin.
- Determine la mejor tendencia de la ecuación de Arrhenius (ver ecuación 2.6) que representa la variación de la razón constante con la temperatura.

Usando el procedimiento anterior para especímenes de concreto y mortero con diversos materiales cementantes (Tank y Carino, 1991; Carino y Tank, 1992) y distintas relaciones agua - cemento, la “energía de activación” se extendió de 30 a 64 kJ/mol para la relación A/C de 0.45; mientras que para una relación A/C de 0.60 se extendió de 31 a 56 kJ/mol.

En resumen, la figura 2.20 muestra efectivamente el error en el factor de conversión de la edad, si el valor incorrecto de la energía de activación fuese utilizado para una mezcla de concreto en particular, la magnitud del error

aumentaría con el aumento de la diferencia de temperatura de curado a partir de 23 °C.

Es importante mencionar que el valor de E que se determina cuando la tasa constante se grafica en función de la temperatura de curado no es equivalente a la energía de activación usada en la ecuación fundamental de Arrhenius, lo que significa que la energía de activación determinada según el procedimiento de la norma (C 1074) es una equivalente a la que determino Arrhenius.

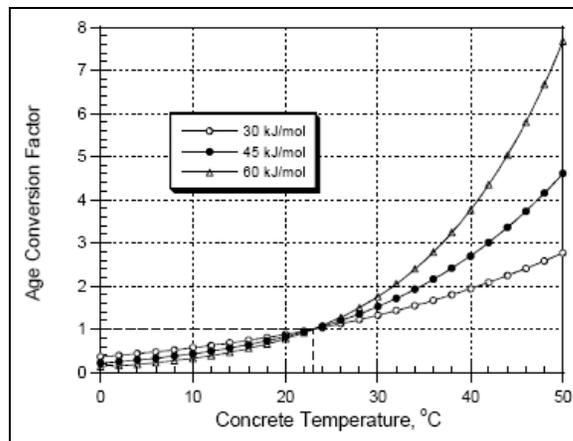


Figura. 2.20: Factor de conversión de la edad según la Ec. 3 para diversos valores energía de activación aparente. Tomado de National Institute of Standards and technology

La idea de la “energía de activación” fue propuesta por Svante Arrhenius en 1888 para explicar porqué las reacciones químicas no ocurren instantáneamente cuando se unen los reactivos, incluso, aunque el producto de las reacciones estén en un estado de energía más bajo [Brown y LeMay, 1988]. Arrhenius propuso que antes de que el estado de energía más bajo se alcance los reactivos deben tener suficiente energía para superar la barrera de energía que separa los estados de no reacción y de reacción.

Para los sistemas moleculares, las moléculas del reactivo están en movimiento constante y la energía es transferida entre ellas cuando chocan [Brown y LeMay, 1988], algunas de las moléculas adquirirán suficiente energía para superar la barrera de energía y formar como consecuencia de la reacción un estado de energía más bajo, mientras que el sistema entra a mayor temperatura, la energía cinética de las moléculas aumenta y superan la barrera. Así el índice de reacción aumenta con el aumento de temperatura. Arrhenius observó que la tasa constante,  $k$ , da muchas reacciones crecientes con la temperatura, de acuerdo a esto a la ecuación de Arrhenius, se modifica a:

$$K = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde:

- A: Factor de Frecuencia
- E: Energía de activación equivalente, J/mol
- R: Constante universal del gas, (8.314 J/mol-K)
- T: Temperatura absoluta promedio del concreto durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  en grados Kelvin

La ecuación 2.5 es originalmente la ecuación de Arrhenius, el término A se llama “factor de frecuencia” y se relaciona con la frecuencia de colisiones y de la probabilidad de que las moléculas serán orientadas de manera favorable para la reacción [Brown y LeMay, 1988], Esto puede ser visto como el factor de

conversión de la edad dado por la ecuación 2.4, que es la razón constante de dos diversas temperaturas.

La ecuación de Arrhenius se derivó empíricamente de observaciones de sistemas químicos homogéneos que experimentan una sola reacción. Los investigadores Roy e Idorn [1982] observaron que "... se deberá tener cautela puesto que el cemento es un material polifásico y que el proceso de hidratación del cemento no es una reacción simple, por lo tanto la cinética de reacciones homogéneas no pueden ser aplicada." Así la energía de activación obtenida de la ganancia de resistencia o del grado de hidratación no es una energía de activación verdadera para una sola reacción según lo propuesto originalmente por Arrhenius.

La clave para el desarrollo mas apropiado de la función de madurez de una mezcla en particular es determinar la variación de la tasa constante con la temperatura de curado.

Como se mencionó, la tasa constante está relacionada con el índice de ganancia de resistencia para una temperatura constante, y puede ser obtenido por medio de una ecuación apropiada producto del aumento de resistencia (o grado de hidratación) versus la edad.

Por lo tanto, es necesario considerar algunas de las relaciones que han sido utilizadas para representar el desarrollo de resistencia del concreto.

Algunos autores han utilizado con éxito la ecuación hiperbólica siguiente, para el desarrollo de resistencia bajo curado isotérmico hasta edades equivalentes de 23 °C por alrededor de 28 días:

$$S = S_u \frac{K(t - t_0)}{1 + K(t - t_0)} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde:

S = Resistencia en la edad t,

$S_u$  = Resistencia limitadora,

k = Tasa constante, 1/día

$t_0$  = Edad al inicio del desarrollo de resistencia.

La ecuación anterior asume que el desarrollo de resistencia comienza en la edad  $t_0$ , así el período de desarrollo gradual de la resistencia durante el fraguado no se considera, Los parámetros  $S_u$ , k, y  $t_0$  son obtenidos por el ajuste de curvas de mínimos cuadrados de la resistencia versus edad. La fuerza limitadora,  $S_u$ , es el valor asintótico de la resistencia para la función hiperbólica que ajusta los datos, el mejor valor de ajuste para  $S_u$  no representa necesariamente la resistencia real a largo plazo del concreto.

Para el modelo hiperbólico, la tasa constante tiene la característica siguiente: cuando la edad más allá de  $t_0$  es igual a  $1/k$ , la resistencia iguala el 50% de la fuerza limitadora,  $S_u$ .

Una ecuación similar a la ecuación anterior también fue utilizada por Knudsen [1980] y Geiker [1983] para representar el grado de hidratación y desarrollo de

la reacción química en función de la edad, sin embargo, notaron que la ecuación 2.6 dio un pobre ajuste para ciertos sistemas de cemento, dando lugar a la versión siguiente que dio un mejor ajuste a la ecuación hiperbólica [Knudsen, 1984]:

$$S = S_u \frac{\sqrt{K(t-t_0)}}{1 + \sqrt{K(t-t_0)}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

S = Resistencia en la edad t,

$S_u$  = Resistencia limitadora,

k = Tasa constante, 1/día

$t_0$  = Edad al inicio del desarrollo de resistencia.

Knused [1984] explicaría las diferencias entre la ecuación 2.6 y 2.7 en términos de la hidratación cinética de las partículas individuales de cemento. La ecuación 2.6 está basada en *cinética lineal*, fundamentada en el grado de hidratación de una partícula individual de cemento que refleja una función lineal del producto del tiempo y la tasa constante. La ecuación 2.7 se basa en cinética parabólica, lo que significa que el grado de hidratación es una función de la raíz cuadrada del producto del tiempo y de la tasa constante. Estas ecuaciones 2.6 y 2.7 se llaman hiperbólicos lineal y modelos hiperbólicos parabólicos.

Relación entre los tiempos de fraguado inicial y la madurez Pinto y Hober (1999) investigaron si el método de la madurez era aplicable a la etapa del

fraguado del concreto que se determina por medio de la normativa ASTM C 403.

Los círculos sólidos en la figura 2.21 (a) muestran resultados de tiempos de fraguado inicial en función de la temperatura media, encontrando que los tiempos de fraguado a diversas temperaturas se podrían utilizar para obtener la energía de activación aparente que reflejara la temperatura en función de los tiempos de fraguado.

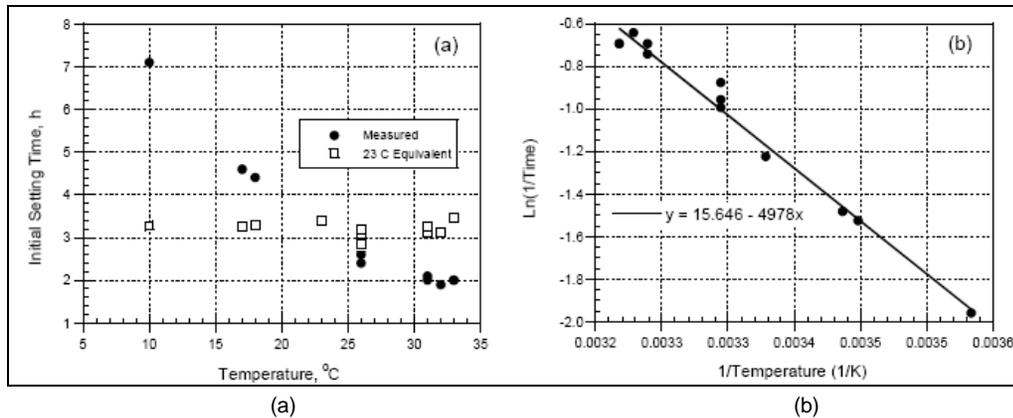


Figura.2.21: (a) Tiempo de fraguado inicial versus temperatura; b) ploteo de los logaritmos naturales del inverso de los tiempos de fraguado versus el inverso de la temperatura absoluta (Pinto y Hober 1999).

Tomado de National Institute of Standards and technology.

El inverso de los tiempos de fraguado fueron utilizados como tasa constante y los logaritmos naturales de las tasas constantes fueron trazados en función del inverso de la temperatura absoluta, como se muestra en la figura 2.21 (b), una línea de tendencia se puede proyectar de los datos transformados, donde la pendiente negativa de la recta representa la energía de activación aparente dividida por la constante de los gases (ecuación 2.4), que en ASTM C 1074 se designa como Q.

Las mediciones de los tiempos de fraguado pueden ser convertidos a tiempos de fraguado equivalentes a 23 °C usando la ecuación 2.4, estos valores se muestran como los cuadrados abiertos en figura. 2.21 (a), observándose que los tiempos de fraguado equivalentes del ajuste están muy cercanos al valor original, así al medir los tiempos de fraguado en dos temperaturas extremas, es posible estimar los tiempos de fraguado para cualquier temperatura dentro de los extremos.

#### **2.3.4 Normativa estándar para la determinación de la madurez**

Como ya se mencionó anteriormente la relación de madurez ha sido conocida desde mediados de los años cincuenta, pero no se usó mucho fuera del laboratorio ya que no se contaba con un equipo de fácil manejo.

En 1987, gracias a los aportes de la NBS la Sociedad Americana para ensayos y materiales (ASTM por sus siglas en inglés) por primera vez aprobó la norma C 1074 que estandarizó el procedimiento para desarrollar relaciones de resistencia-madurez.

Los pasos más sobresalientes que plantea la normativa consisten en desarrollar primero un diseño de mezcla que se planea utilizar en la estructura (pavimento o losa). Luego, colar y curar 17 cilindros en el laboratorio usando esta mezcla, con sensores empotrados en el centro de dos de estos cilindros. Cabe mencionar que varios proveedores fabrican sensores que proporcionan lecturas de temperaturas a través de tiempo, o proporcionan directamente el TTF o

valores de edad equivalente. A varias edades (1, 3, 7, 14, y 28 días), se toma un valor de madurez de los cilindros con sensores, y dos cilindros se ensayan a compresión (más uno extra en caso de algún resultado dudoso), y así contar con valores de resistencia a compresión para la respectiva madurez. Llamándosele a este proceso calibración de la mezcla, figura 2.22. Ahora tenemos una relación entre índice de madurez - edad equivalente o el factor de temperatura-tiempo y la resistencia del concreto. Si se conoce el índice de madurez de este concreto en cualquier momento, entonces se sabrá su resistencia y así poder validar la curva obtenida, por medio de resultados de resistencia de cilindros curados en condiciones diferentes a las que estuvieron los cilindros ensayados para obtener la curva de calibración. Figura 2.23.

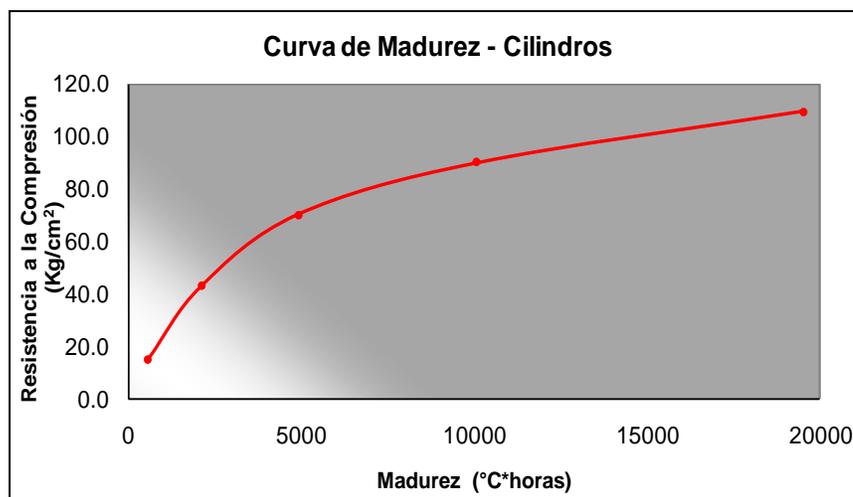


Figura 2.22 Curva de calibración de la mezcla la cual se determina en la primera fase para la determinación de la resistencia por el método de la madurez

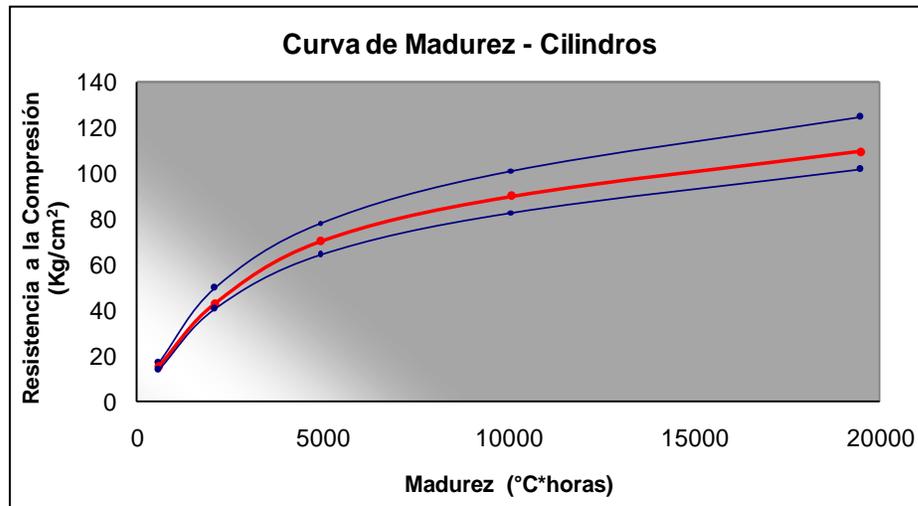


Figura 2.23 Para que un resultado de resistencia a la compresión sea valido este debe estar dentro del  $\pm 10\%$  de la resistencia obtenida por el método

Además, se proporciona un procedimiento para obtener el datúm de temperatura o la energía de activación, que según el método utilizado será requerido. El procedimiento para determinar el datúm de temperatura o la energía de activación se basa en los fundamentos discutidos previamente en la sección 2.3.3 “fundamentos teóricos del método de la madurez”; procedimientos alternativos se pueden desarrollar para obtener valores de razón constante para la determinación de la energía de activación, considerando tres condiciones de temperatura de curado.

La aproximación más simple es utilizar un software de análisis estadístico que permita ajustar los mínimos cuadrados de la ecuación 2.6, ó si el usuario no tiene esta capacidad, un acercamiento alternativo es determinar los tiempos de

fraguado a tres temperaturas de curado constante usando el método de la resistencia a la penetración (ASTM C 403) para obtener el valor de Q.

### **2.3.5 Equipos para medición de madurez.**

A diferencia de la época en que surgió el método, cuando no existía un equipo portátil para la medición de madurez, hoy en día existe variabilidad de equipos de medición, ya sea si estos trabajan bajo la ecuación de Arrhenius ó Nurse-Saúl.

Los equipos de medición de madurez han evolucionado desde sistemas manuales simples, sistemas electrónicos complejos hasta micro electrónicos avanzados, existiendo actualmente una variedad de equipos, que proporcionan a la vez variabilidad en el grado de exactitud, automatización, seguridad, e integridad de los datos. Estos equipos se dividen en dos “generaciones distintas”, la distinción entre los equipos de la primera y segunda generación es la discrepancia en el registro de datos y la tecnología de almacenaje.

Más específicamente, la distinción difiere en la localización de donde se registran y se almacenan los datos. Todos los equipos de primera generación almacenan los datos externamente a la estructura que se está supervisando, en cambio los equipos de segunda generación almacenan todos los datos de temperatura y/o madurez dentro del concreto mismo, esto protege los datos y al equipo de peligros externos.

En general un equipo de madurez consiste en las siguientes partes (Tabla 2.12):

Sensores de temperatura	
Almacenador electrónico de datos	
Un sistema de cálculo	Software interno del almacenador: Command Center
El operador	

Tabla 2.12 Componentes de un equipo de madurez

### 2.3.5.1 Primera generación de equipos de medición de madurez.

La primera generación de equipos de madurez se agrupa en las tres categorías siguientes.

- Método manual (Figura 2.24)
- Colector de datos externo (Figura 2.25)
- Mecanismo de cálculo externo de madurez (Figura 2.26)

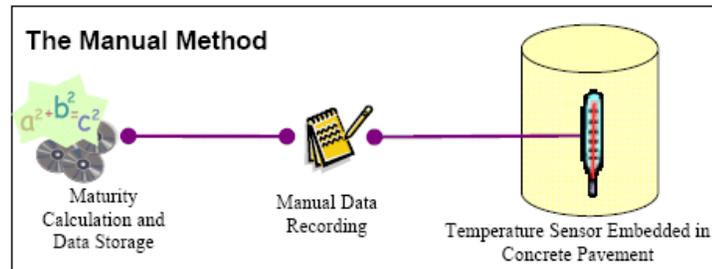


Figura 2.24 Método manual para la determinación de madurez.  
Tomado de Report IPRF-01-G-002-03-6

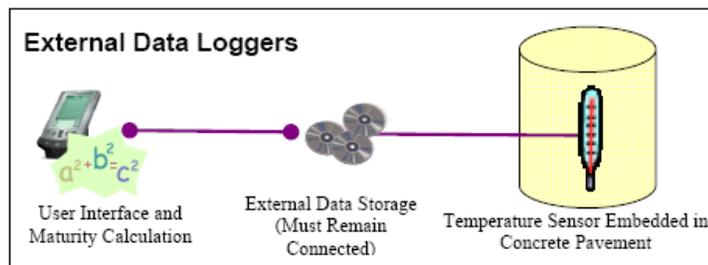


Figura 2.25 Colector de datos para la determinación de madurez.  
Tomado de Report IPRF-01-G-002-03-6

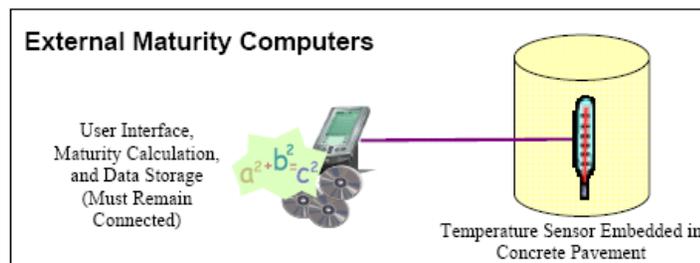


Figura 2.26: Mecanismo de cálculo externo para la medición de madurez.  
Tomado de Report IPRF-01-G-002-03-6

### 2.3.5.2 Segunda generación equipos de medición de madurez

Los equipos de madurez de segunda generación representan un cambio importante en la tecnología para determinar la madurez del concreto. La distinción principal con los equipos de primera generación difiere en su confianza sobre la tecnología de registros de datos integrados.

Esta tecnología permite a los equipos de segunda generación proporcionar en campo en cualquier momento lecturas reales de madurez sin la necesidad de dispositivos externos colocados permanentemente. Los equipos de segunda generación de madurez se pueden agrupar en las tres categorías siguientes:

- Colector interno de datos (Figura 2.27a y 2.27b)
- Mecanismo interno de cálculo de madurez (Figura 2.28)
- Colector de datos internos de manera inalámbrica (Figura 2.29)

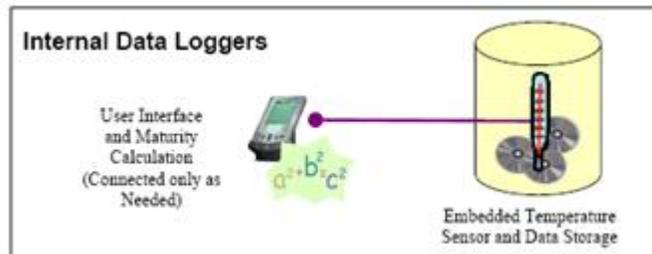


Figura 2.27 Colector Interno de datos por la medición de madurez.  
Tomado de Report IPRF-01-G-002-03-6

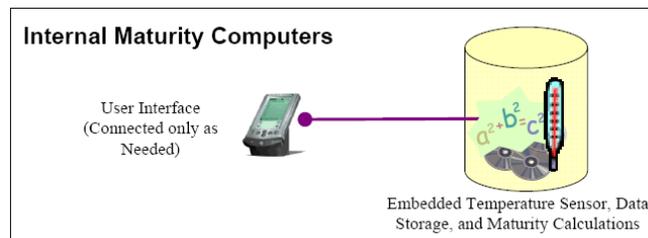


Figura 2.28 Mecanismo interno de cálculo para la medición de madurez.  
Tomado de Report IPRF-01-G-002-03-6

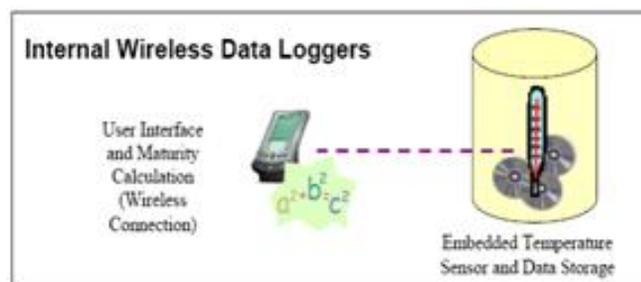


Figura 2.29 Colector inalámbrico de datos para la medición de madurez.  
Tomado de Report IPRF-01-G-002-03-6

### **2.3.6 Otros ensayos útiles para la determinación de la resistencia del concreto.**

La normativa que rige el ensayo recomienda que cuando se realicen actividades críticas, como retiro de moldes o postensado, se debe asegurar que las resistencias determinadas en la estructura sean potencialmente cercanas a las resistencias obtenidas para la determinación de la relación de resistencia madurez. Por medio de ensayos que proporcionan resistencia en campo, tales como:

- **Cilindros colados en el sitio**

ASTM C 873: Método de ensayo estándar para la compresión de cilindros de concreto colados en el sitio en moldes cilíndricos (Figura 2.30).

Este método de ensayo tiene como fin la determinación de la resistencia a compresión de especímenes de concreto cilíndricos, que han sido moldeados en campo usando moldes especiales embebidos. Este método de ensayo es limitado para losas con espesores de 5 a 12 pulgadas (125 a 300 mm.).



Figura 2.30 Moldes cilíndricos para especímenes colados en el sitio,  
Tomado de “El Método de la Madurez del Hormigón  
y su Aplicación en Pavimentos Rígidos”

- **Resistencia a la penetración**

ASTM C 803: Método de ensayo estándar para la resistencia a la penetración de concreto endurecido (Figura 2.31).

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia del concreto endurecido por medio de la penetración de probetas o pines de acero.



Figura 2.31 Equipo para el impulso de pines para la determinación  
de la resistencia a la penetración.  
Tomado de “El Método de la Madurez del Hormigón y su Aplicación en Pavimentos Rígidos”

- **Arrancamiento**

ASTM C 900: Método de ensayo estándar para la resistencia a la adherencia del concreto endurecido (Figura 2.32).

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la adherencia del concreto endurecido, midiendo la resistencia a la tracción requerida para retirar un fragmento de metal embebido en un espécimen de ensayo o estructura de concreto.

La inserción se realiza por el proyectado en el concreto fresco o la colocación en el concreto endurecido.

Este método de ensayo no proporciona un procedimiento estadístico para estimar otras propiedades de resistencia.



Figura 2.32 Colocación de dispositivo para la determinación de la resistencia mecánica del concreto por medio del ensayo de la adherencia.  
Tomado de "El Método de la Madurez del Hormigón y su Aplicación en Pavimentos Rígidos"

Además de los métodos de ensayo siguientes:

ASTM C 918: Método de ensayo estándar para la medición de la resistencia a compresión a edades tempranas y proyectadas a edades posteriores.

Este método de ensayo cubre el procedimiento para la elaboración y curado de especímenes de concreto, para ensayarlos a edades tempranas. Los especímenes son almacenados bajo condiciones de curado estándar, y el

historial de temperatura es usado para calcular un índice de madurez que se relaciona con la ganancia de resistencia

ASTM C 684: Método de ensayo estándar para la elaboración y compresión de especímenes de concreto bajo curado acelerado.

Este método de ensayo cubre cuatro procedimientos para la elaboración, curado y ensayo de los especímenes de concreto endurecido, pero de manera relevante son los cuatro métodos de curado que aceleran el desarrollo de resistencia a la compresión. Estos cuatro procedimientos son: Procedimiento A – método de agua caliente, Procedimiento B – método de agua hirviendo, procedimiento C -método de curado autógeno y el procedimiento D - método de presión y alta temperatura.

Todo lo anterior será útil para obtener la resistencia del concreto en el sitio y proceder en base a los resultados obtenidos al desmoldado de las viviendas coladas y moldeadas en campo.

## **2.4 Viviendas coladas en el sitio – Aplicación del método de madurez**

### **2.4.1 Antecedentes del sistema de casas coladas en el sitio**

Antes de 1950, en El Salvador, el panorama de la vivienda mostraba la persistente precariedad, en la mayoría de las viviendas dispersas por todo el

país. En este contexto se observó un mercado habitacional poco desarrollado y una débil intervención pública y social en torno a esta problemática.

Esta situación cambia enérgicamente, con la necesaria implementación de otros sistemas constructivos, no tradicionales, esto con el fin de brindar una oportunidad de vivienda digna a personas de bajos ingresos; y que dicha incorporación poco a poco conlleva a una configuración de mercado habitacional progresiva.

En la medida que transcurre el tiempo el objetivo primordial ha sido aminorar el déficit habitacional que ha aquejado al país; debido a muchos factores, entre los que sobresalen: el impacto negativo que causó la guerra interna, desastres naturales (ocurridos a través de los años); y asimismo el incremento poblacional experimentado, que dieron la pauta para poner en práctica nuevas alternativas de construcción de viviendas, tales como: el Sistema Cast in Place “colado en el sitio”; generando así una nueva opción para la producción en serie de viviendas de forma industrializada, es decir: producir viviendas reemplazando la mano de obra artesanal, con máquinas utilizadas por obreros especializados en su manejo; que para el caso se realiza la construcción utilizando moldes metálicos, sustituyendo así la mano de obra de los albañiles, por mano de obra especializada.

El Comité ACI 332, cubre el trabajo realizado en la construcción de viviendas de concreto coladas en el sitio, tanto uni como bi familiares. Incluyen las

prácticas recomendadas para las cimentaciones (fundaciones), zapatas, paredes y losas en rasante (interiores y exteriores).

Las recomendaciones prácticas son proporcionadas en este documento, para aquellas personas comprometidas en la construcción de viviendas de concreto.

## **2.4.2 Proceso constructivo sugerido por el comité ACI 332**

### **2.4.2.1 Requisitos para el concreto en la construcción de viviendas.**

- **Generalidades.**

El concreto para la construcción de viviendas involucra un equilibrio entre una economía razonable y los requisitos para lograr un concreto trabajable, con buenos acabados, durable, resistente y a la vez con una buena apariencia.

Las características requeridas son gobernadas por el uso previsto del concreto, las condiciones imperantes en el momento de la colocación y los factores medio ambientales que afectan el uso del producto.

- **Resistencia.**

La mínima resistencia a la compresión del concreto en libras/pulgadas cuadradas (Mpa) a los 28 días es la propiedad generalmente especificada para la mayoría de las construcciones con concreto. Esto es fácilmente medible e indica otras características deseables.

La dosificación para lograr un adecuado nivel de resistencia a la compresión es usualmente garantizada con propiedades vinculadas como resistencia a la tensión y baja permeabilidad para su satisfactorio empleo.

Cuando el concreto tiene un diseño especializado, puede ser necesario especificar la resistencia que será requerida a edades tempranas, por ejemplo para concreto post-tensado, la resistencia a los siete días debe ser especificada o sino la resistencia de trabajo en el sitio por postensionamiento. Sin embargo, la durabilidad puede ser un factor de calidad controlado en determinado tipo de concreto.

Especificar diseños por resistencia a la compresión no siempre garantiza una adecuada resistencia al deterioro producto de los ciclos de hielo-deshielo, ataque de sulfatos o exposición al agua de mar. Además un buen proporcionamiento de aire incluido es siempre esencial para lograr una durabilidad adecuada. El Comité ACI 332 especifica que para Viviendas Coladas en el sitio la resistencia exigida es de  $175 \text{ kg/cm}^2$ .

#### **2.4.2.2 Proporcionamiento, producción y transporte de concreto.**

- **Concreto.**

Proporcionamiento del concreto

El proporcionamiento del concreto es normalmente la responsabilidad del productor del concreto (premezclado). Sólo las consideraciones principales se perfilan aquí. El objetivo del proporcionamiento es determinar la más económica y práctica combinación de materiales disponibles para producir un concreto que cumpla, bajo las condiciones de servicio, satisfactoriamente las expectativas.

Esto requiere un buen conocimiento de las sollicitaciones de servicio y de las características básicas de los materiales disponibles, de las condiciones de colado y construcción, y de las características requeridas para el concreto a largo plazo.

Para alcanzar la calidad deseada, en el proceso de proporcionamiento de la mezcla se debe de tomar en cuenta las siguientes características: La resistencia de diseño, la durabilidad necesaria para la estructura, y que la trabajabilidad y consistencia de la mezcla sea tal que pueda llenar fácilmente el encofrado y envolver el refuerzo. Para lograr buenos acabados en las losas de concreto el diseñador de la mezcla deberá seleccionar los materiales para el concreto de modo que se logre una dosificación adecuada de cemento, agregados, agua y adiciones químicas ó minerales.

El uso de cemento con demasiado fino mineral o demasiada cantidad de arena que pase los tamices N° 50, N°100 ó N° 200 pueden llegar a producir una mezcla demasiado viscosa o pegajosa. Asimismo si es necesario el uso de un

aditivo inclusor de aire puede reducirse la cantidad de finos en la mezcla ya que podrían darse problemas de acabado.

En la tabla 2.13 se muestran las proporciones para concreto mezclado en el sitio para agregados en condiciones húmedos y sueltos.

Tamaño máximo del agregado		Mínimo contenido de cemento		Máximo contenido de agua		Proporción aproximada por volumen					
						Cemento		Agregado fino		Agregado grueso	
In	M m	b/yd <sup>3</sup>	b /m <sup>3</sup>	gal/b	l/b	ft <sup>3</sup> /b	m <sup>3</sup> /b	ft <sup>3</sup> /b	m <sup>3</sup> /b	ft <sup>3</sup> /b	m <sup>3</sup> /b
<sup>3</sup> / <sub>8</sub>	9	6.4	8.4	5	18.9	1	0.028	2 ½	0.07	2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	0.067
½	13	6.3	8.3	5	18.9	1	0.028	2 ½	0.07	2 ½	0.070
<sup>3</sup> / <sub>4</sub>	19	6.0	7.9	5	18.9	1	0.028	2 ½	0.07	2 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	0.077
1	25	5.8	7.6	5	18.9	1	0.028	2 ½	0.07	3	0.084
1 ½	38	5.4	7.1	5	18.9	1	0.028	2 ½	0.07	3 ½	0.098
2	50	5.2	6.8	5	18.9	1	0.028	2 ½	0.07	4	0.112

Donde b: Es el número de bolsas.

**Tabla 2.13 Proporciones de Concreto para Mezclado en el Sitio.**

Tomada de Guide to Residential Cast-in-Place Concrete Construction.

- **Encofrados.**

El encofrado se utiliza para mantener el concreto fresco en una posición y forma determinada. El encofrado utilizado puede ser fabricado en madera, plywood, o secciones modulares de acero, aluminio o fibra de vidrio. La hechura, alquiler o compra de los moldes depende de la precisión en las dimensiones, el rápido

montaje y desmontaje de sus piezas, y del número de rehusos que se le puedan dar.

La mayoría de los sistemas utilizados pertenecen a las siguientes categorías:

- Marcos de madera laminada o metálica.
- Todo de aluminio
- Madera laminada, con revestimiento metálico,
- Madera laminada
- Metálico.

### **2.4.2.3 Colocación del concreto en paredes.**

- **Preparación de encofrados y de la subrasante.**

Antes de que el concreto se coloque en las cimentaciones, la subrasante debe ser humedecida. Los interiores de los encofrados y la subrasante bajo las cimentaciones se deben humedecer para prevenir la absorción excesiva del agua de mezcla del concreto. La humedad adicional no tiene que ser aplicada a los encofrados engrasados o a la subrasante húmeda. Los charcos de agua lluvia que se han formado en los encofrados de la cimentación o en la rasante deben ser bombeados antes de colocar el concreto. No siempre es posible conseguir una superficie totalmente seca, especialmente donde el nivel del agua es alto. Si esto sucede el concreto debe colocarse de una manera que desplace el agua sin mezclarse.

Los encofrados deben estar apoyadas y ser alineados antes de que el concreto se coloque para formar las paredes. Los encofrados deben ser construidos con seguridad. Cuando el sistema de encofrado es instalado, estos deben estar sujetos unos con otros con seguridad y estar apoyados de acuerdo con las instrucciones del fabricante. La alineación de los encofrados debe ser comprobada antes y después de la colocación para asegurarse que la pared esté dentro de tolerancias requeridas.

- **Revenimiento.**

Revenimientos de  $6 \pm 1$  pulg ( $150 \pm 25$  milímetros) está se utiliza para la construcción residencial de paredes. La mezcla se debe proporcionar con bastante cemento para que la relación agua-cemento produzca la resistencia necesaria para tales revenimientos. La segregación y el sangrado excesivo puede ocurrir fácilmente con estos revenimientos. La proporción de la mezcla debe superar estos efectos aumentando la proporción de la arena y del cemento, por la adición de aire en el concreto o introduciendo una cantidad seleccionada de materiales tales como: cenizas volantes u otra adición mineral; logrando así reducir el contenido de agua, a través del control de las adiciones. Si la colocación del concreto va a ser bombeado, la cantidad de agregado grueso es disminuida generalmente en cantidades hasta de un 10 %, esta práctica es mejor cuando el revenimiento se ha aumentado.

El concreto con la alta fluidez, a veces es llamado “concreto fluido”, esta hecho usando varias adiciones.

El alto costo del concreto fluido puede ser compensado por ahorros en trabajos de colocación más eficiente, Los materiales siguientes se pueden utilizar en proporciones para la mezcla con la finalidad de hacer fluido el concreto:

- Es un Reductor del agua de alto rango (HRWR) conocido como súper plastificante.
- Aditivo convencional reductor de agua del (Tipo A\*) usada en dosificación muy altas.
- Un sistema de aditivos que incluye una alta dosificación de ajuste normal, aditivo reductor de agua (Tipo A \*) combinado con un acelerante, Tipo C o E, \* y así balancear el retraso causado por la alta dosificación.

- **Colocación del concreto en paredes.**

El concreto se debe colocar en una operación continua y en elevaciones uniformes de no más de 4 pies (1.2 m). La colocación del concreto se debe programar para llenar totalmente los encofrados.

- **Compactación del concreto.**

El apisonamiento a mano y la consolidación del concreto proporciona la compactación adecuada. El concreto residencial es generalmente compactado moviendo un pedazo de madera de construcción, o una barra de acero, hacia

arriba y hacia abajo verticalmente, para consolidar el concreto y deshacer las bolsas de aire atrapado. Debe tenerse cuidado en este proceso para no golpear o raspar las superficies interiores de los moldes; tal acción podría quitar el desencofrante y crear problemas que pelen el molde.

Los vibradores son muy útiles en los moldes que se llenan debajo de los bloques que salen de la ventana, alrededor de los tapajuntas y de otros rellenos; también se recomiendan donde el aspecto arquitectónico de la pared es importante. Cuando se usa, el vibrador debe insertarse en muchos intervalos cerrados, para que el campo en el que influye cada inserción se traslape levemente en la inserción anterior. Este debe ser hundido en una masa colocada recientemente y bastante profunda para penetrar 6 pulg (150 milímetros) y este es removido lentamente con un movimiento continuo. Los vibradores deben moverse de arriba hacia abajo, nunca deben permanecer en una posición en el concreto por seguridad, y ellos no debe ser arrastrado.

### **2.4.3 Normativa salvadoreña para viviendas en El Salvador**

#### **Procedimientos de construcción.**

##### **Generalidades.**

La construcción de una vivienda deberá realizarse de acuerdo con los planos y especificaciones del proyecto integral aprobado por las instancias correspondientes.

- **Concreto fluido o mortero de relleno (Grout).**

- Preparación. El concreto fluido puede ser fino o grueso, tal como lo establece la Norma Técnica para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, y la Norma Técnica para Control de Calidad de los Materiales Estructurales. El tamaño máximo del agregado grueso del concreto fluido tipo grueso no deberá exceder de 0.01 m (10 mm), el concreto fluido fino no contendrá agregado grueso. El concreto fluido preparado en el sitio se debe mezclar durante un período entre 3 y 10 minutos en equipo mecánico, con la cantidad de agua requerida para la trabajabilidad deseada.

- **Fluidez.**

Al momento de la colocación del concreto fluido, éste debe presentar las condiciones de fluidez requeridas sin que haya iniciado el endurecimiento por hidratación del cemento, de manera que el mortero de relleno fluya sin segregación por los espacios que hay que colar.

- **Colocación.**

El concreto fluido o mortero de relleno se debe colocar directamente con bomba o manualmente con embudo, teniendo la precaución de que todo el espacio a colar quede homogéneo y compacto, buscando vinculación íntima entre el mortero de relleno y las unidades de mampostería. En proyectos habitacionales de más de 20 viviendas es recomendable un centro de producción de concreto

y mortero de relleno dentro de la obra para garantizar la calidad de la mezcla que empleen.

- **Concreto estructural.**

- Dosificación.

A falta de un diseño de la mezcla de concreto, podrán utilizarse las dosificaciones que se presentan en la tabla 2.14.

Tipo de Elemento	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup> (Mpa)	Proporción volumétrica	Bolsas Cemento	Arena (m <sup>3</sup> )	Grava (m <sup>3</sup> )	Agua (litros)
Pisos	100 (10)	1:2.5:4	6.7	0.48	0.77	218
Paredes	175 (17.5)	1:2:2.5	9.1	0.51	0.64	226
Nervios y soleras	150 (15)	1:2.5:2.5	8.3	0.58	0.58	232
Losas y Cimentación	210 (21)	1:2:2	9.8	0.55	0.55	227

**Tabla 2.14 Dosificación Recomendadas para la Elaboración del Concreto**

Tomada de Norma de Vivienda de El Salvador

- **Cimbras.**

- La cimbra podrá ser de madera o metálica.
- Se deberá desechar la madera que presente nudos, huecos, rajaduras o excesiva curvatura o torcedura. Igualmente se desecharán aquellos moldes metálicos defectuosos que presenten abolladuras o excesiva curvatura o torcedura.
- Se deberán proveer aberturas en la parte inferior de las cimbras de paredes de concreto, nervios o columnas, para efectuar la limpieza antes del colado.

- Antes de colocar el refuerzo se deberá barnizar la cimbra con algún producto antiadherente como: desmoldantes patentados, aceite diesel o aceite mineral. En ningún caso se deberá usar el aceite quemado.
- No se permitirá la iniciación del colado hasta que la cimbra se encuentra limpia, exenta de partículas sueltas y se haya hecho la última revisión de apoyos, contravientos, geometría, niveles, plomos y rigidez de los moldes.
- En las cimbras de madera se efectuará un riego de agua antes del colado para evitar la absorción del agua del concreto por la cimbra y las deformaciones posteriores por hinchamiento de la madera; en las cimbras metálicas se hará un riego de agua antes del colado cuando el metal se encuentre caliente.

- **Mezclado del concreto.**

- El concreto debe ser mezclado por medio de equipo mecánico o en forma manual siempre que se garanticen las condiciones de uniformidad exigidas, es decir, que cualquier porción de la mezcla presente la misma consistencia.
- El equipo mecánico debe contar con aspás en buen estado que impidan la segregación de los componentes y ser mantenido limpio, libre de grasa, polvo o residuos de mezcla. El mezclado del concreto con este equipo debe durar 1.5 minutos como mínimo.

- En el caso de seleccionar el método manual, el mezclado deberá hacerse en bateas fabricadas para tal fin.
- Cada componente de la mezcla debe ser cuidadosa y exactamente medido antes de iniciar la producción.
- Vibrado del concreto.
- Cuando se utilice un vibrador mecánico, debe verificarse que trabaje al menos a 3000 rpm. Se cuidará también que su cabeza penetre en forma vertical por aproximadamente 15 segundos o hasta que el concreto deje de tener burbujas y floten aguas de sangrado.
- Una vez colocado en la cimbra o molde, el concreto deberá ser vibrado mecánicamente o picado utilizando una varilla limpia lisa, recta y con punta redondeada. Durante el procedimiento, el concreto será adecuadamente acomodado en el molde, eliminando burbujas de aire y evitando las colmenas.

- **Curado del concreto.**

- El concreto debe mantenerse completamente húmedo por lo menos durante siete días, a menos que se usen membranas de curado.
- El curado debe iniciarse de 2 ½ a 3 horas después de finalizado el colado. En el caso de utilizar membranas de curado, estas deben aplicarse inmediatamente después del colado tan pronto desaparezca el agua de sangrado.

- **Descimbrado.**

- La cimbra debe ser removida en tiempos no menores que los indicados en la Tabla 2.15.
- La remoción de la cimbra debe ser efectuada sin que el concreto reciba golpes o sea dañado.
- Después de retirar la cimbra el apuntalamiento debe ser mantenido durante los siguientes 14 días o hasta que se cumpla la edad de 28 días del concreto. Los puntales podrán ser de madera, acero o mixtos.

<b>Elemento</b>	<b>Tiempo mínimo recomendado</b>
Paredes de concreto, nervios y costados de vigas o soleras	24 horas
Losa	8 días
Fondo de vigas o soleras	12 días
Voladizos	18 días

**Tabla 2.15 Desmoldado de Elementos**  
Tomada de Norma de Vivienda de El Salvador

# **CAPITULO III**



### **3 Estudio de la evolución de resistencia a edades tempranas en un sistema de paredes de concreto coladas en el sitio.**

En este capítulo se abordará la aplicación del Método de Madurez (ASTM C 1074) en un sistema de paredes coladas en el sitio, con el objetivo de conocer las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla utilizada en éste tipo de sistemas constructivos; de acuerdo a las características observadas durante una visita y posterior muestreo del concreto en un proyecto habitacional para una posterior reproducción en laboratorio y aplicación del método de madurez en un sistema de paredes coladas en el sitio.

Al mismo tiempo y de manera complementaria a la investigación se realizan ensayos para la determinación de parámetros de resistencia por métodos destructivos (compresión de especímenes cilíndricos, compresión de núcleos extraídos de pared) y no destructivos (velocidad de pulso ultrasónico, martillo de rebote).

### 3.1 Descripción y Ubicación del Proyecto habitacional “Los Almendros”

El Proyecto urbanístico “Los Almendros”, ubicado sobre la Carretera de Oro (Figura 3.1) es uno de los proyectos más grandes de la capital donde se aplica el sistema de viviendas de concreto coladas en el sitio.

- Nombre del Proyecto: Urbanización “Los Almendros” (Figura 3.2)
- Dirección: Carretera de Oro, Km 9 ½ Lateral Derecho
- Empresa Constructora: Grupo Roble
- Empresa Supervisora: Rivera Harrouch

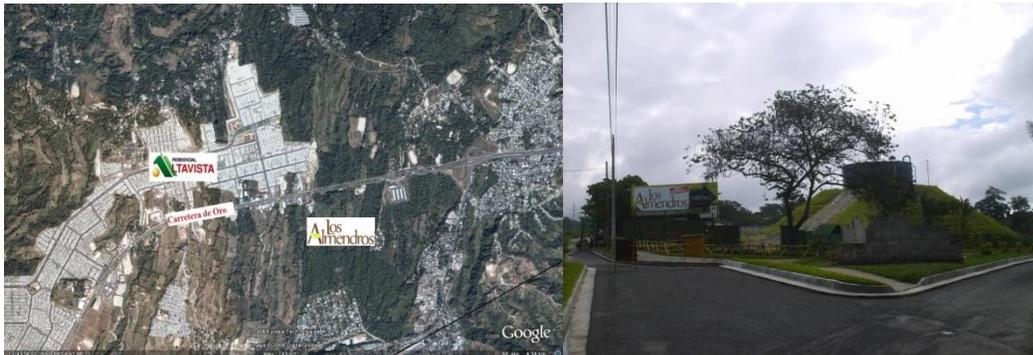


Figura 3.1 Ubicación del Proyecto Los Almendros, Carretera de Oro Km 9 1/2

### **3.2 Elaboración de especímenes para la determinación de las características físicas y mecánicas de la mezcla de concreto utilizada en el proyecto “Los Almendros”.**

En la visita realizada al proyecto muestreamos y elaboramos especímenes cilíndricos, así como ensayos de revenimiento y temperatura (fig. 3.2 y 3.3); bajo las especificaciones de las normas ASTM C172, C31, C43 y C1064 respectivamente.

Los especímenes elaborados permanecerán bajo dos tipos de curado, por lo tanto destinarán 10 especímenes en condiciones de curado estándar y los 10 restantes en condiciones de curado de campo, de acuerdo a las normas ASTM C 192 ASTM C 31 respectivamente.



Figura 3.2 Muestreo de la mezcla de concreto y ensayos de revenimiento y temperatura en la muestra de concreto

Los resultados de revenimiento y temperatura producto del muestreo realizado se muestran en la tabla 3.1

<b>Bachada</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Revenimiento	8 ½ pulgadas	7 pulgadas
Temperatura	32° C	30° C

**Tabla 3.1 Resultados de temperatura y revenimiento para cada bachada muestreada**



Figura 3.3 Elaboración de especímenes.

Una vez elaborados los 20 cilindros se procede a desmoldar (figura 3.4) 10 de ellos a las 4 horas de edad, los cuales serán curados en campo de acuerdo a lo descrito en la norma ASTM C 31, que dicta desmoldar los especímenes a la misma edad del desmoldado de la estructura.



Figura 3.4 Desmoldado de especímenes al mismo tiempo del desmolado de la vivienda

Los 10 cilindros restantes se desmoldaron aproximadamente 24 horas después de elaborados, trasladándose a las instalaciones del CI-ISCYC (Centro de Investigación del Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto) en una cama de arena para evitar daños y pérdida de humedad, ver (figura 3.5)



Fig.3.5 Desmoldado y transporte de especímenes 24 horas después de elaborados

Al final los especímenes permanecieron de acuerdo a las condiciones establecidas; en campo (fig. 3.6) y laboratorio (fig. 3.7).



Figura 3.6 Curado en condiciones de campo



Figura 3.7 Curado en condiciones de laboratorio

Durante el periodo de curado los especímenes se ensayarán a compresión a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días; 2 cilindros por edad para tipo de curado.

A continuación (Tabla 3.2 y 3.3) se muestran los registros de resistencia a compresión según el tipo de curado.

Cilindro N°	Fecha de Ensayo	Edad [días]	Rev. [pul]	Diám. [cm]	Altura [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	Masa [g]	Carga [kg]	Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	8-10-08	1	8 3/4	15,2	30,6	181,5	11957	5380	30
2	8-10-08	1	8 3/4	15,2	30,5	181,5	11876	5270	29
<i>promedio</i>									<b>29</b>
3	10-10-08	3	8 3/4	15,1	30,6	179,1	11947	9140	51
4	10-10-08	3	8 3/4	15,2	30,5	181,5	11809	9150	50
<i>promedio</i>									<b>51</b>
5	14-10-08	7	8 3/4	15,5	30,4	188,7	11843	13350	71
6	14-10-08	7	8 3/4	15,2	30,6	181,5	11598	13290	73
<i>promedio</i>									<b>72</b>
7	21-10-08	14	8 3/4	15,2	30,5	181,5	11579	18210	100
8	21-10-08	14	8 3/4	15,1	30,5	179,1	11872	16690	93
<i>promedio</i>									<b>97</b>
9	4-11-08	28	8 3/4	15,2	30,5	181,5	11215	19940	110
10	4-11-08	28	8 3/4	15,2	30,5	181,5	11623	22370	123
<i>promedio</i>									<b>117</b>

Tabla 3.2 Registro de valores de resistencia de especímenes curados en campo

Cilindro Nº	Fecha de Ensayo	Edad [días]	Rev. [pul]	Diám. [cm]	Altura [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	Masa [g]	Carga [kg]	Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	8-10-08	1	7	15,2	30,5	181,5	11795	5170	28
2	8-10-08	1	7	15,2	30,6	181,5	11782	5430	30
<i>promedio</i>									<b>29</b>
3	10-10-08	3	7	15,1	30,6	179,1	11750	9140	51
4	10-10-08	3	7	15,2	30,5	181,5	11718	9150	50
<i>promedio</i>									<b>51</b>
5	14-10-08	7	7	15,2	30,6	181,5	11780	12600	69
6	14-10-08	7	7	15,2	30,4	181,5	11798	12110	67
<i>promedio</i>									<b>68</b>
7	21-10-08	14	7	15,2	30,6	181,5	11579	15080	83
8	21-10-08	14	7	15,2	30,4	181,5	11872	14690	81
<i>promedio</i>									<b>82</b>
9	4-11-08	28	7	15,2	30,5	181,5	11587	17540	97
10	4-11-08	28	7	15,2	30,5	181,5	11765	17160	95
<i>promedio</i>									<b>96</b>

**Tabla 3.3 Registro de valores de resistencia de especímenes curados en laboratorio**

### **3.3 Diseño de mezcla de concreto a partir de las propiedades físicas y mecánicas, observadas del muestreo de especímenes y caracterización de agregados utilizados en el proyecto “Los Almendros”.**

Luego de conocer a través de ensayos al concreto fresco y endurecido las características de la mezcla utilizada en el proyecto, se obtuvo información de las particularidades y origen de los agregados para determinar un diseño propio, que cumpla con las características de la mezcla utilizada en campo.

A continuación se presentan algunas de las características obtenidas:

- Resultados de esfuerzo a compresión obtenidos a partir de los especímenes ensayados (tabla 3.4), con una resistencia especificada a los 28 días de 120 Kg/cm<sup>2</sup>.

Edad (días)	Resistencia a compresión promedio. Curados Estándar (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión promedio. Curados en Campo (Kg/cm <sup>2</sup> )
1 día	29	29
3 días	51	51
7 días	68	72
14 días	82	97
28 días	96	117

**Tabla 3.4 Resistencias obtenidas en muestreo de concreto en campo.**

- Predominancia de agregado fino en la mezcla.
- Consistencia de la mezcla con rangos de 7 a 8 ½ pulgadas. (Tabla 3.5, datos obtenidos en campo).

Bachada	1	2
Revenimiento	8 ½ pulgadas	7 pulgadas
Temperatura	32° C	30° C

**Tabla 3.5 Revenimiento y Temperatura obtenidos en la mezcla utilizada en campo.**

### 3.3.1 Ensayos para la caracterización de agregados

Para todo diseño de mezcla la caracterización de agregados se vuelve indispensable ya que de ello dependen los parámetros a utilizar como verificación del cumplimiento de los requisitos establecidos por la norma ASTM

C 33 y especificaciones para la construcción de los sistemas de viviendas Cast in Place.

### **3.3.1.1 Muestreo de Agregados**

Se muestrearon los agregados utilizados en el proyecto para la elaboración de la mezcla, de acuerdo a la metodología de ensayo de la norma ASTM D 75 como se muestra en la figura 3.8. El material fue colocado en sacos, debidamente identificados para posteriormente ser transportados al laboratorio donde fueron almacenados. Se obtuvo la información de la fuente de los agregados; el agregado fino es procedente del Río Las Cañas y el grueso de la Cantera Protersa.



Figura 3.8 Muestreo de agregados.

### **3.3.1.2 Ensayos para la caracterización de los agregados.**

Los ensayos requeridos para la caracterización de los agregados son los siguientes:

Reducción de muestra a tamaño de ensayo.

Granulometría de agregado grueso y fino.

Gravedad específica de agregado grueso y fino.

Peso Volumétrico de agregado grueso y fino.

*Reducción de muestra a tamaño de ensayo:* en base a la norma ASTM C 702 mediante cuarteadores mecánicos.

*Granulometría de agregado grueso y fino:* En base a la norma ASTM C 136, los resultados obtenidos se presentan en las tablas 3.6 y 3.7, así como en las figuras 3.9 y 3.10 que representan la distribución granulométrica de los agregados; presentándose en líneas punteadas las especificaciones y en líneas continua la granulometría obtenida, observándose en ambas curvas una tendencia suave dentro de los límites, cumpliendo así con las especificaciones de la norma ASTM C-33, y clasificándose el agregado grueso como Grava # 67.

Ensayo granulométrico de agregado grueso ASTM C 136					
Malla	Peso retenido (g)	% retenido			% que pasa
		parcial	acumulado		
1	0	0	0	0	100
¾	0	0	0	0	100
½	672.2	21.2	21	21	79
3/8	817.7	25.8	26	47	53
4	1469.2	46.4	46	93	7
8	164.8	5.2	5	98	2
16	19.7	0.6	1	99	1
fondo	23.4	0.7	1	100	0

**Tabla 3.6 Análisis Granulométrico del Agregado Grueso.**

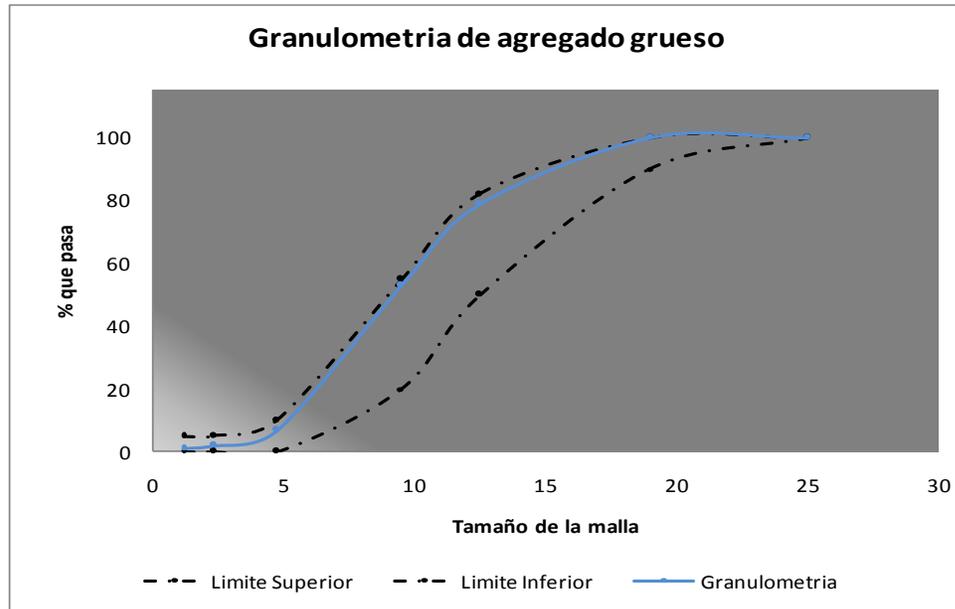


Figura 3.9 Requisitos de granulometría para agregado grueso según ASTM C33

Ensayo granulométrico de agregado fino ASTM C 136					
Malla	Peso retenido (g)	% retenido			% acumulado que pasa
		parcial		acumulado	
Nº 4	13.3	3.3	3	3	97
Nº 8	28.4	7.0	7	10	90
Nº 16	56.6	13.9	14	24	76
Nº 30	103.8	25.6	26	50	50
Nº 50	120.7	29.7	30	80	20
Nº 100	66.3	16.3	16	96	4
fondo	16.6	4.1	4	100	0

Modulo de Finura (M.F.): 2.6

Tabla 3.7 Análisis Granulométrico del Agregado Fino.

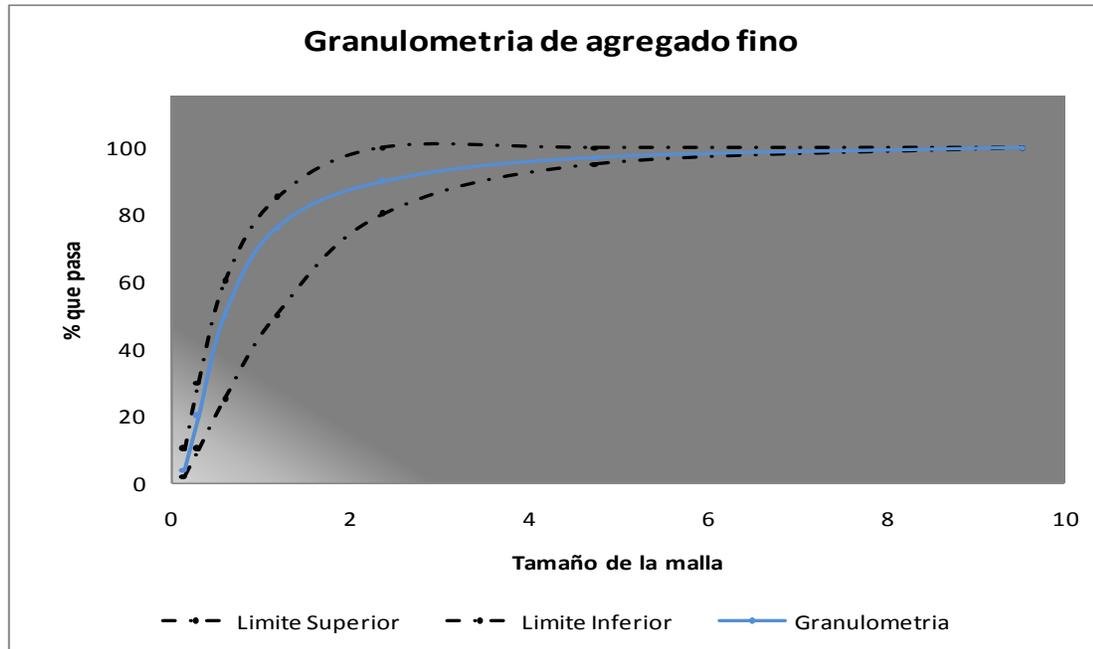


Figura 3.10 Requisitos de granulometría para agregado fino de acuerdo a ASTM C 33

*Gravedad específica y Absorción de Agregado grueso y fino:* los resultados del ensayo de acuerdo a la norma ASTM C 127 se presentan en la tabla 3.8, el cual corresponde a la gravedad específica y absorción del agregado grueso. En la tabla 3.9 se presenta los resultados de ensayo basados en la norma ASTM C 128 que corresponden a la gravedad específica y absorción del agregado fino.

<b>Gravedad específica y absorción de agregado grueso ASTM C 127</b>			
<b>Muestra 1</b>		<b>Muestra 2</b>	
(Masa + Tara) sss (g)	2208	(Masa + Tara) sss (g)	2292
Tara sss (g)	17	Tara sss (g)	17
Masa sss (g)	2191	Masa sss (g)	2275
(Masa + Tara) sumergida (g)	2209	(Masa + Tara) sumergida (g)	2237
Tara sumergida (g)	847	Tara sumergida (g)	847
Masa sumergida (g)	1362	Masa sumergida (g)	1390
(Masa + Tara) seca (g)	2350	(Masa + Tara) seca (g)	2360
Tara seca (g)	207	Tara seca (g)	172
Masa seca (g)	2143	Masa seca (g)	2188
G.E	2.60	G.E	2.50
% Absorción	2.24	% Absorción	3.98
G.E sss	2.64	G.E sss	2.57
Gravedad específica:	2.55		
Gravedad específica sss:	2.61		
% de absorción:	3.11		

**Tabla 3.8 Cálculo de la Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso**

<b>Gravedad específica y absorción de agregado fino ASTM C 128</b>			
<b>Muestra 1</b>		<b>Muestra 2</b>	
Pic + agua (g)	1443.3	Pic + agua (g)	1443.9
Pic + agua + muestra (g)	1739.1	Pic + agua + muestra (g)	1739.4
Tara (g)	169.5	Tara (g)	297.5
Masa + tara (g)	652.8	Masa + tara (g)	781.1
masa seca (g)	483.3	Masa seca (g)	483.6
Grav específica (sss)	2.45	Grav específica (sss)	2.44
Grav específica seca	2.37	Grav específica seca	2.36
% Absorción	3.46	% Absorción	3.39
Gravedad específica:	2.37		
Gravedad específica sss:	2.45		
% de adsorción:	3.42		

**Tabla 3.9 Cálculo de la Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino**

*Peso Volumétrico de agregado grueso y fino:* Los resultados de peso volumétrico suelto y varillado de los agregados se presentan a continuación. Peso volumétrico del agregado grueso y fino (tabla 3.10) y peso volumétrico varillado del agregado fino (tabla 3.11).

<b>Peso volumétrico suelto y varillado de grava ASTM C-29</b>						
Condiciones	Peso volumétrico varillado			Peso volumétrico suelto		
Ensayo	1	2	3	1	2	3
Masa del recipiente(kg)	1.729	1.729	1.729	5.44	5.44	5.44
vol. del recip.(m <sup>3</sup> )	0.00284	0.00284	0.00284	0.00944	0.00944	0.00944
Masa recip + muestra(Kg)	5.964	5.91	5.933	18.611	18.594	18.592
masa de muestra(Kg)	4.235	4.181	4.204	13.171	13.154	13.152
peso vol. (Kg/m <sup>3</sup> )	1491	1472	1480	1395	1393	1393
Promedio (Kg/m <sup>3</sup> )	1481.2			1394.0		

**Tabla 3.10 Determinación del Peso Volumétrico del Agregado Grueso**

<b>Peso volumétrico suelto de arena ASTM C-29</b>			
Ensayo	1	2	3
Masa del recipiente(Kg)	1.727	1.727	1.727
Vol. del recip.(m <sup>3</sup> )	0.002843	0.0028428	0.002843
Masa de recip + muestra (Kg)	5.464	5.5	5.488
Masa de muestra (Kg)	3.737	3.773	3.761
Peso vol. (Kg/m <sup>3</sup> )	1315	1327	1323
Promedio (Kg/m <sup>3</sup> )	1321.6		

**Tabla 3.11 Determinación del Peso Volumétrico del Agregado Fino**

### **3.3.2 Determinación del proporcionamiento de la mezcla de concreto**

A partir de las propiedades de la mezcla anteriormente descritas y de las características del agregado se tiene que: El proporcionamiento de mezcla que se realice debe ser tal que se cumplan las condiciones observadas en el proyecto, siendo necesario el análisis siguiente: (1) la metodología de diseño de mezcla de acuerdo al comité ACI 211.1 parte en primer lugar de una relación agua - cemento para una resistencia a compresión a 28 días predefinida, esta

resistencia varia de 140 a 420 Kg/cm<sup>2</sup> , para relaciones agua-cemento de 0.82 a 0.40 respectivamente, el valor de resistencia potencial a 28 días para nuestro diseño de mezcla es de 120 Kg/cm<sup>2</sup>, quedando fuera del rango antes citado. (2) la cantidad de arena en mezclas diseñadas de acuerdo al comité ACI 211.1 en algunos casos es menor o igual a la cantidad de grava, por lo tanto si se desea realizar la mezcla basada en dicho comité la proporción de arena en la misma no sería de acuerdo a las características observadas en el proyecto.

En vista de tales condiciones se procede a realizar un proporcionamiento basado en mezclas de prueba, para ensayar cilindros a 3, 7 y 28 días y comparar dichos resultados con los valores de resistencia obtenidos a la misma edad de los especímenes muestreados en el proyecto, a partir de una relación agua – cemento de 0.70 con un porcentaje de arena cercano al doble de la cantidad de grava.

Las proporciones que se obtuvieron se muestran en la Tabla 3.12.

	<b>A/C = 0.82</b>	<b>A/C =0.7</b>	<b>A/C = 0.80</b>
Cemento (Kg)	278	326	285
Arena (Kg)	556	652	889
Grava (Kg)	278	326	386
Agua (l)	228	228	228

**Tabla 3.12 Proporcionamiento de acuerdo a relaciones Agua-Cemento**

Resultando la proporción correspondiente a la relación A/C igual a 0.80 la que nos arroja valores más cercanos a la muestreada en el proyecto, con un revenimiento de 7½ pulgada.

### **3.4 Metodología para la obtención de Madurez y Calibración de la mezcla diseñada, para la estimación de la resistencia del concreto en el sistema de paredes coladas en el sitio.**

En este apartado se expondrá la metodología para la obtención de Madurez que servirá de base para la calibración de la mezcla, que consiste en determinar la relación Resistencia-Madurez. Para esto se elaborarán especímenes de concreto para ensayar a compresión a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, así mismo se instrumentaran especímenes para registrar la madurez a las mismas edades. Como complemento de esta etapa de calibración paralelamente a la elaboración de los especímenes se obtendrán tiempos de fraguado inicial y final del concreto de acuerdo a la norma ASTM C 403.

#### **3.4.1 Metodología para la determinación de la madurez del concreto**

Así como se explicó en el capítulo II de este documento existen dos funciones para calcular la madurez del concreto, de las cuales una se basa en la teoría de Arrhenius (edad equivalente) y la otra en la teoría de Nurse-Saúl (Factor-Temperatura-Tiempo), siendo esta última la que regirá en la investigación para la determinación de la resistencia del concreto en el sistema de viviendas coladas en el sitio, definiéndose esta función por medio de la ecuación siguiente.

$$FTT = \Delta t \sum (t_a - t_0) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

FTT: Factor Temperatura Tiempo

$\Delta t$ : intervalo de tiempo de lecturas de temperatura interna del concreto, en horas

$t_a$ : Temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , en °C

$t_0$ : Datum de temperatura

La ecuación anterior se basa en conocer el historial de temperatura interna del concreto a través del tiempo, siendo la madurez del concreto igual al área bajo la curva definida por la temperatura interna del concreto y el Datum, donde cada rectángulo (FTT) es un diferencial de madurez del concreto, la figura 3.11 esquematiza el área bajo la curva que define la madurez del concreto.

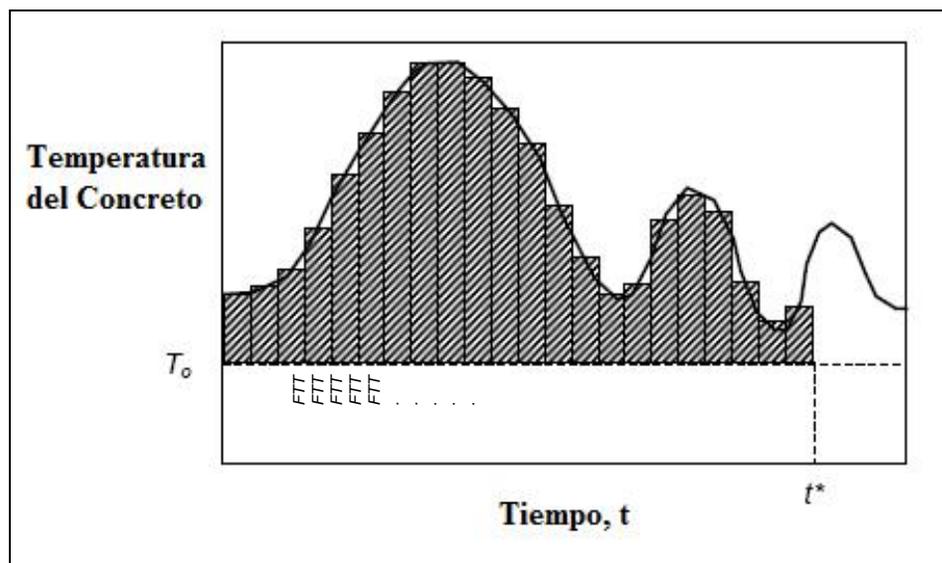


Figura 3.11. Esquematación de la madurez del concreto en función del área bajo la curva limitada por el historial de temperatura, el Datum y la edad para la cual se requiere conocer la madurez

Por lo tanto es importante determinar el valor del Datúm de temperatura, ya que será el límite de las áreas del rectángulo, a la vez, es necesario definir los intervalos de tiempo para cada FTT, el equipo utilizado en esta investigación permite conocer la temperatura promedio cada 20 minutos en un lapso de 28 días.

### **3.4.2 Metodología para la determinación de la temperatura de referencia o Datúm de temperatura**

El procedimiento requerido para determinar experimentalmente la temperatura de referencia o Datúm de temperatura se realiza usando especímenes de mortero con el cemento a utilizar en el proyecto, ya que de otra manera dichos cálculos no serían aplicables.

El proporcionamiento del mortero a utilizar para la elaboración de los cubos debe ser de una relación agregado fino-cemento (en masa), igual a la relación agregado grueso – cemento del proporcionamiento de la mezcla de concreto bajo investigación, y a la vez de la misma relación agua-cemento.

El Procedimiento para la elaboración de los cubos de mortero consiste en preparar tres juegos de cubos de mortero de 50 mm, de acuerdo con el Método de Ensayo ASTM C 109, con la proporción arriba mencionada, donde cada juego consiste en 18 cubos, que deben desmoldarse y sumergirse en agua a tres diferentes temperaturas de curado, dos baños deben ser a la temperatura

máxima y mínima esperada del ambiente del lugar donde se colocará el concreto en estudio, y la tercera temperatura de curado será el promedio de los dos extremos. Para cada juego de cubos se determinará la resistencia a la compresión de tres especímenes, de acuerdo al Método de Ensayo ASTM C 109, a una edad aproximadamente igual a dos veces el tiempo de fraguado final y en caso de que el tiempo de fraguado final no fuese medido se efectúa el primer ensayo cuando la resistencia a compresión de los cubos sea aproximadamente 4 Mpa.

Para los subsecuentes compresiones (de tres cubos por cada juego), las edades de ensayo serán de aproximadamente el doble de la edad del ensayo anterior, por ejemplo, si la edad del primer ensayo de compresión fue a las 12h los posteriores ensayos deben ser efectuados a las edades de 1, 2, 4, 8 y 16 días.

Los datos de la resistencia y edad de los cubos obtenidos de las tres temperaturas de curado, son analizados para determinar la relación entre la razón constante para el desarrollo de resistencia (valor K) y la temperatura de curado.

$$K = \frac{f'c}{Temperatura} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

El procedimiento consiste en establecer la relación resistencia a la compresión de los cubos de mortero contra la edad a la cual han sido ensayados y curados a las tres diferentes temperaturas. Si la información de resistencia será

analizada usando el procedimiento de ploteo recíproco del numeral 1, descrito a continuación, el tiempo de fraguado final debe de ser estimado, debiéndose preparar tres muestras de mortero con la misma proporción que la de los cubos para la determinación del tiempo de fraguado por el Método de Ensayo ASTM C 403, para lo cual se debe mantener sumergido cada espécimen que será penetrado a las tres diferentes temperaturas antes mencionadas, calculando su fraguado final para cada una de ellas. Para tal ensayo los especímenes deben ser sumergidos con mucho cuidado y removerlos del baño de agua solamente para el momento de la penetración y remover con mucho cuidado el exceso de agua previo a efectuar el ensayo.

A continuación se presentan los tres distintos procedimientos para la determinación de la razón constante para el desarrollo de resistencia (valor K) y la temperatura de curado.

1. Análisis por ploteo recíproco: para usar este procedimiento, los tiempos de fraguado final a las tres distintas temperaturas de curado deben ser conocidos, y preparar una gráfica con el recíproco de cada uno de las resistencias promedio de los cubos ensayados para cada edad y temperatura de curado en el eje "Y" y el recíproco de las edades posteriores al tiempo de fraguado final en el eje "X", luego se determina la pendiente y el intercepto de la mejor tendencia a través de los datos para cada una de las temperaturas de curado, así como se muestra en la figura 3.12. Para cada línea de tendencia dividir el valor del intercepto por el valor de la pendiente.

Este cociente es el valor de (K), el cual se utiliza para calcular la temperatura de referencia o Datúm.

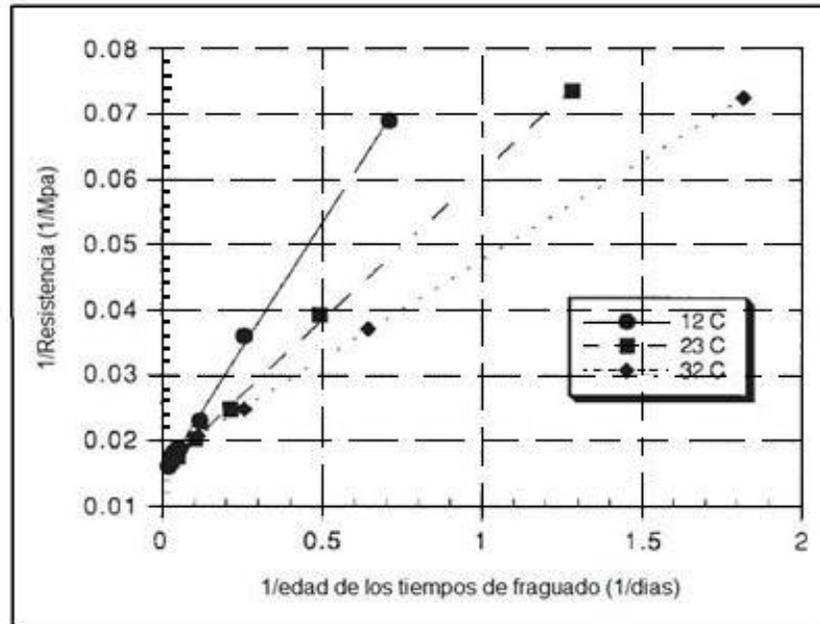


Figura 3.12 Líneas de tendencia para cada temperatura de curado

2. A diferencia del procedimiento anterior en este no es necesario determinar los tiempos de fraguado, ya que para conocer el valor de K se necesita contar con algún programa que permita el ajuste de una ecuación general a un conjunto de datos. El valor de K se determina mediante el ajuste de la ecuación siguiente a los datos de resistencia y edad obtenidos para cada temperatura de curado

$$S = S_u \frac{K(t - t_0)}{1 + K(t - t_0)} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

S= resistencia a compresión promedio en cubos a la edad t

t= edad de ensayo

S<sub>u</sub>= resistencia limitada

t<sub>0</sub>= edad a la cual se presume que la resistencia comienza

K= razón constante.

Y el programa determinará los valores de S<sub>u</sub>, t<sub>0</sub>, K.

3. El último método igual que el anterior no necesita conocer los valores de tiempo de fraguado. Únicamente utilizando la información de resistencia y edad para los últimas cuatro edades de ensayo.
  - a. graficar el recíproco de la resistencia en el eje “Y” y el recíproco de la edad en el eje “X”.
  - b. Determinar el intercepto con el eje “Y” y el inverso de ese valor es la resistencia limitada (S<sub>u</sub>)
  - c. Repetir este procedimiento para cada temperatura de curado, y para cada una de ellas use la información de resistencia - edad de las primeras cuatro edades de ensayos y los valores de (S<sub>u</sub>) determinados, esto para calcular el valor de (A) para cada resistencia, donde (A) es dado por la ecuación siguiente:

$$A = \frac{S}{(S_u - S)} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde:

S= resistencia a compresión promedio en cubos a la edad t

Su= resistencia limitada

- d. Para cada temperatura de curado, graficar el valor de (A) contra la edad. Determine la pendiente de la mejor tendencia para cada temperatura. Estas pendientes son los valores de (K).
- e. Graficar cada valor (K) como una función de la temperatura de los baños de agua del curado. Determine la mejor tendencia a través de los tres puntos y el intercepto de la línea con el eje de temperatura es la temperatura de referencia  $t_0$  o Datúm (figura 3.13), que es utilizado en la ecuación de Nurse- Saúl.

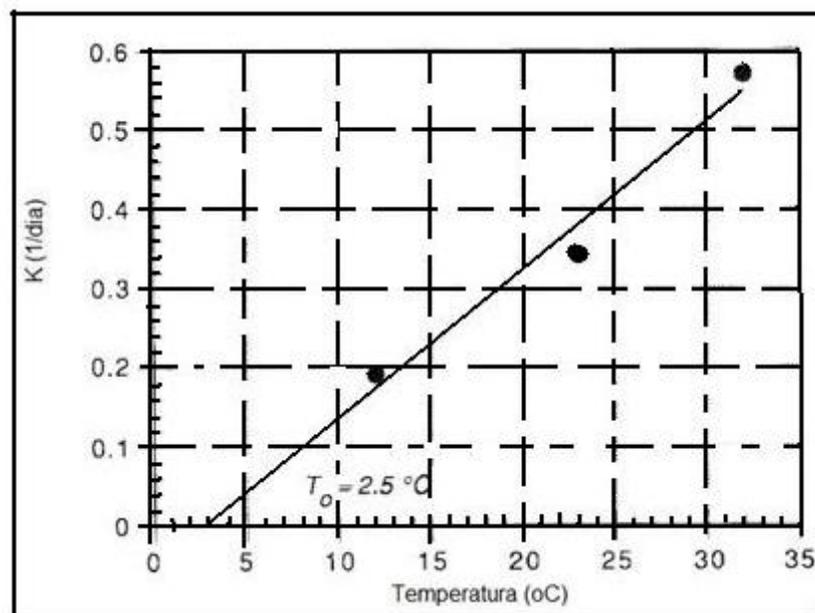


Figura 3.13 Determinación de la temperatura de referencia

Cabe mencionar que en esta investigación dicho dato se ha asumido basándonos en las especificaciones de la norma que rige el ensayo, debido a que no se cuenta con las condiciones para determinarlo.

### 3.4.3 Método de cálculo de la madurez del concreto

En alguna ocasión puede ser que no se cuente con un equipo que determine la madurez y que sólo se cuente con uno que mida temperatura interna del concreto, resultando necesario calcular la madurez de forma manual, siguiendo el procedimiento que se describe a continuación y apoyándose de la tabla 3.13.

- a. En primer lugar se debe conocer todo el historial de temperatura del concreto hasta la edad que se desee determinar la madurez. Por lo tanto a manera de ejemplo se muestran en la tabla 3.13 las primeras dos horas de temperatura registradas por sensores embebidos en dos cilindros.

Sensor 1		Sensor 2	
Hora	Temperatura (°C)	Hora	Temperatura (°C)
10:40:00 a.m.	26	11:20:00 a.m.	27.5
11:00:00 a.m.	26	11:40:00 a.m.	27
11:20:00 a.m.	27	12:00:00 p.m.	28
11:40:00 a.m.	28.5	12:20:00 p.m.	27.5
12:00:00 a.m.	28	12:40:00 p.m.	27.5
12:20:00 a.m.	28	01:00:00 p.m.	27
12:40:00 a.m.	27.5	01:20:00 p.m.	27

**Tabla 3.13 Valores de temperatura obtenidos por equipo**

Luego se determina el rango de tiempo en horas para el cual se obtendrán las lecturas, que para el caso los sensores reportan datos de temperatura cada veinte minutos, por lo tanto para ese intervalo de tiempo es posible determinar los Factores Temperatura Tiempo (FTT), y por ende conocer la evolución de madurez del concreto para dichos momentos con la ayuda de la tabla 3.14 y 3.15, en la tercera columna se coloca el intervalo de tiempo en horas, luego la cuarta columna se determina multiplicando el tiempo de la columna tres, con la diferencia de la temperatura interna del concreto menos el valor del Datúm de temperatura<sup>3</sup>, representando dichos resultados los valores de FTT para cada intervalo de tiempo. Para la columna cinco el valor en cada intervalo de tiempo es la suma acumulada de los FTT hasta el intervalo de tiempo en cuestión, siendo ese valor la madurez del concreto a esa edad.

$$\begin{aligned}
 10:40 \text{ am} & \quad \text{FTT} = (0.000 * (26 - 0)) = 0.0 \\
 11:00 \text{ am} & \quad \text{FTT} = (0.333 * (27 - 0)) = 9.0 + 0.0 = 9.0 \\
 11:20 \text{ am} & \quad \text{FTT} = (0.333 * (28 - 0)) = 9.3 + 9.0 = 18.3 \\
 11:40 \text{ am} & \quad \text{FTT} = (0.333 * (28 - 0)) = 9.3 + 18.3 = 27.3 \\
 12:00 \text{ md} & \quad \text{FTT} = (0.333 * (27 - 0)) = 9.0 + 27.3 = 36.3
 \end{aligned}$$

---

<sup>3</sup> Para el ejemplo así como para la investigación el Datúm de temperatura se considerara igual a cero basado en la norma ASTM C1074

<b>SENSOR 1*</b>				
<b>Hora</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Rango de tiempo (horas)</b>	<b>FTT (°C-h)</b>	<b>Madurez (°C-h)</b>
10:40:00* a.m.	26	0	0	0.0
11:00:00 a.m.	26	0.333	8.7	9
11:20:00 a.m.	27	0.333	9.0	18
11:40:00 a.m.	28.5	0.333	9.5	27
12:00:00 a.m.	28	0.333	9.3	37
12:20:00 a.m.	28	0.333	9.3	46
12:40:00 a.m.	27.5	0.333	9.2	55

**Tabla 3.14** Calculo de valores de madurez del sensor 1 para las primeras dos horas

De igual forma para la determinación de los valores de madurez del sensor 2

<b>SENSOR 2</b>				
<b>Hora</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Rango de tiempo (horas)</b>	<b>FTT (°C-h)</b>	<b>Madurez (°C-h)</b>
11:20:00 a.m.	27.5	0	0	0.0
11:40:00 a.m.	27	0.333	9.2	9
12:00:00 p.m.	28	0.333	9.0	18
12:20:00 p.m.	27.5	0.333	9.3	28
12:40:00 p.m.	27.5	0.333	9.3	37
01:00:00 p.m.	27	0.333	9.2	46
01:20:00 p.m.	27	0.333	9.2	55

**Tabla 3.15** Calculo de valores de madurez del sensor 2 para las primeras dos horas

---

\* La hora exacta a la cual se colocó el sensor no fue las 10:40 sino las 10:35, en el caso del cilindro 1, reportándose de esa manera debido a las características mismas del equipo, el cual únicamente toma rangos de tiempo de 20 minutos y no fracciones, por lo que se podría determinar el FTT para el lapso de tiempo entre la colocación y las 10:40, incrementando el valor de madurez de manera despreciable (2.17 °C-h).

### **3.4.4 Calibración de la mezcla de acuerdo a la norma ASTM**

#### **C1074**

A partir de que el Datúm<sup>4</sup> de temperatura ya es conocido la calibración de la mezcla es el siguiente paso para la aplicación del método de madurez, lo cual consiste en determinar la relación Resistencia – Madurez.

El procedimiento para desarrollar la relación se describe a continuación (De acuerdo norma ASTM C 1074).

#### **3.4.4.1 Procedimiento para determinar la Relación Resistencia-Madurez (ASTM C 1074)**

Se deberán elaborar 17 cilindros<sup>5</sup> de concreto de acuerdo a la norma ASTM C192. Se deben preparar los moldes limpiándolos y agregando desmoldante en sus paredes, luego se elaboran los especímenes en tres capas iguales distribuidas en altura y varillando 25 veces cada capa y golpeando las paredes del molde con un martillo de hule para eliminar espacios vacíos (figura 3.14). En la figura 3.15 se muestra los especímenes ya elaborados, de los cuales se destinarán a compresión 15 para ensayar a las edades de 1, 3, 7, 14, 28 días.

---

<sup>4</sup> En nuestro caso el valor del Datúm de temperatura será considerado igual a cero de acuerdo al tipo de cemento utilizado en base a la norma ASTM C 1074, debido a que el proceso de determinación del mismo no es factible realizarlo.

<sup>5</sup> Si es necesario preparar dos bachadas para cumplir con el número de especímenes requeridos, deberán elaborarse igual número de cilindros de cada bachada, así mismo al momento de ensayar a la compresión, se ensayará un cilindro de cada bachada y se instrumentará con sensores al menos uno por bachada.

Para nuestro caso se hicieron dos bachadas de concreto, a las cuales se les registró temperatura y consistencia, para corroborar con los datos observados en campo. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.16.

Bachada	1	2
Revenimiento	6 $\frac{3}{4}$ pulgadas	7 pulgadas
Temperatura	23° C	24° C

**Tabla 3.16 Resumen de datos y características de la mezcla de concreto por bachada**

Los especímenes serán desmoldados de acuerdo a la norma ASTM C 192 y curados en agua (figura 3.16) o en un cuarto húmedo reuniendo los requisitos de la especificación ASTM C 511.



Figura 3.16 Curado de especímenes de concreto.

Se ensayarán a la compresión dos especímenes por edad (figura 3.17 y 3.18), de estos se calculará la resistencia promedio. Si el rango de resistencia a

compresión de los dos especímenes excede 10% de su resistencia promedio, se ensayará un tercer cilindro y se calculará el promedio de los tres ensayos. Si el resultado de un ensayo es bajo debido a un defecto obvio del espécimen, se descartará el resultado (ASTM C 1074).



Figura 3.17 Ensayo de especímenes a la compresión



Figura 3.18 Especímenes ensayados

Para registrar los valores de temperatura se insertaran sensores en al menos dos especímenes de los 17 elaborados, a la mitad de la altura del cilindro como en el centro de la circunferencia en un rango de tolerancia de  $\pm 15$  mm de los centros.

Para introducir los sensores se utiliza una varilla rígida con la que se estima la altura media del cilindro que será instrumentado (figura 3.19), luego se introduce la varilla en la mitad de la circunferencia y hasta la mitad de la altura (figura 3.20) con esto se empujará cualquier partícula que interfiera en el trayecto del sensor (figura 3.21). Una vez el sensor es introducido, se retira la

varilla y el molde es golpeado con un martillo de hule para acomodar el concreto y cerciorarse que el sensor está en contacto con el concreto (figura 3.22).



Figura 3.19 Se estima el centro de la altura del cilindro con la varilla rígida



Figura 3.20 Se introduce la varilla hasta la altura media del cilindro



Figura 3.21 La varilla empujara cualquier partícula que interfiera en el trayecto del sensor



Figura 3.22 El concreto es acomodado dando golpes al molde con el martillo de hule

Los sensores deberán conectarse al dispositivo que registrará la temperatura (figura 3.23) inmediatamente después de ser embebidos, si el sensor no posee una memoria interna capaz de almacenar datos.

A menos que se indique lo contrario, el registro de temperaturas deberá hacerse utilizando intervalos de tiempo de media hora o menos, para las primeras 48 horas, pudiendo alargar el intervalo en el registro subsecuente.

En nuestro caso utilizaremos una computadora manual (PocketPC) (figura 3.24) con un programa que registra temperatura en intervalos de 20 minutos (0.333 horas) y sensores con una memoria interna para 28 días. (Figura 3.25)



Figura 3.23 Se conectan los terminales de los sensores al dispositivo para registrar lecturas de temperatura

Para cada edad de ensayo a compresión se debe registrar su correspondiente madurez de los especímenes instrumentados.



Figura 3.24 Dispositivo para registrar temperaturas a través de los sensores



Figura 3.25 Sensores Térmicos con memoria interna para registrar datos por 28 días

### **3.4.4.2 Procedimiento para la determinación de la madurez del concreto utilizando una Pocket PC**

La utilización del equipo para la aplicación del método de la madurez, está dividido en dos etapas:

- Obtención de datos de madurez para la calibración de la mezcla.
- Estimación de Resistencia en campo

En este apartado se explicará el uso del equipo<sup>6</sup> para la primera etapa. La cual consiste en el registro de la madurez del concreto durante el periodo de 28 días, y que será utilizada para la calibración de la mezcla.

Al encender el equipo aparecerá la pantalla de inicio, el cual al darle un click en el botón “start” se despliega una lista de programas; de la lista se selecciona el icono “Pocket COMMAND<sup>7</sup>”, así como se muestra en la figura 3.26

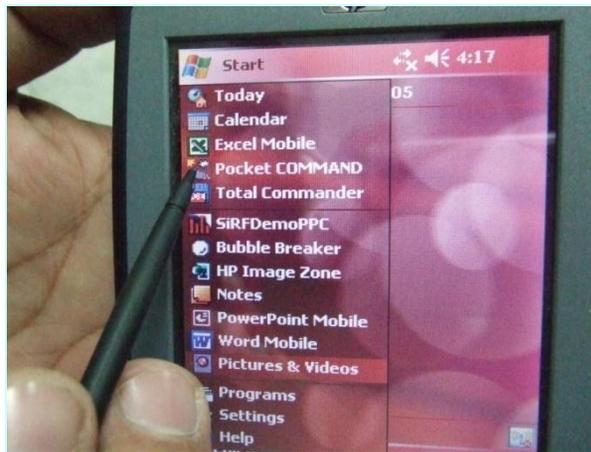


Figura 3.26 Pantalla de inicio al encender el equipo

Figura. 3.27. Después de seleccionar el icono de pocket COMMAND para ingresar al programa, esta es la pantalla que se despliega, la cual muestra en la parte inferior cuatro opciones: File, Input, Sensor, Help,

<sup>6</sup> Este procedimiento esta basado en el modelo y software con el cual se realizó la investigación, por lo que puede variar según el tipo

<sup>7</sup> Nombre del software para la determinación de la madurez del concreto

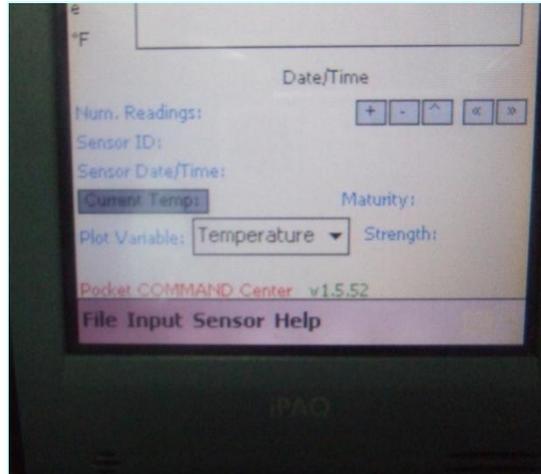


Figura 3.27 Pantalla de menú del programa

Figura. 3.28 Al dar click en el comando “File” se despliega una ventana que muestra cuatro opciones, abrir archivos guardados, guardar un archivo nuevo, cambiar el formato de archivo lo cual se debe realizar para descargar los archivos a una computadora y la ultima para salir de la aplicación.

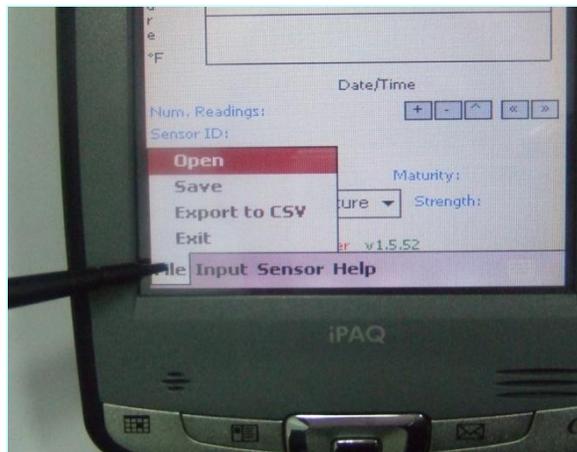


Figura 3.28 Opciones desplegable del menú FILE

Figura. 3.29 Al dar click en el comando “Input” se despliega la ventana mostrada con tres opciones, donde “Maturity” es la opción para introducir la

función de madurez y el Datum, la siguiente (Placement) donde se colocan las particularidades de la colocación del sensor, y la tercera (Preferences) donde se definen las unidades con las que se reportaran e introducirán los datos

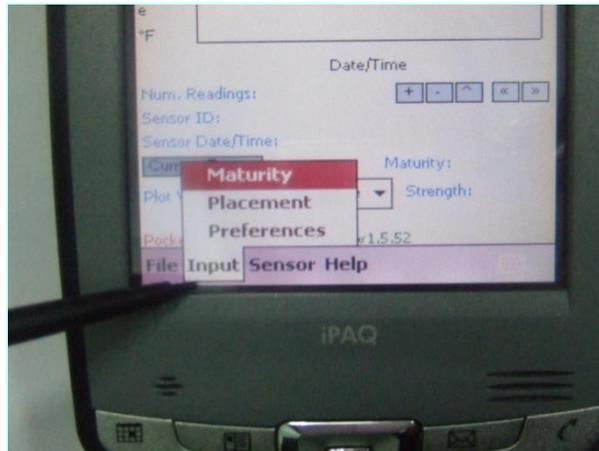


Figura 3.29 Opciones desplegable del menú INPUT

Figura. 3.30 Al dar click en el comando “Sensor” se despliega la ventana donde muestra la opción “Read” que es la que sirve para tomar las lecturas cuando el equipo está conectado a los sensores.

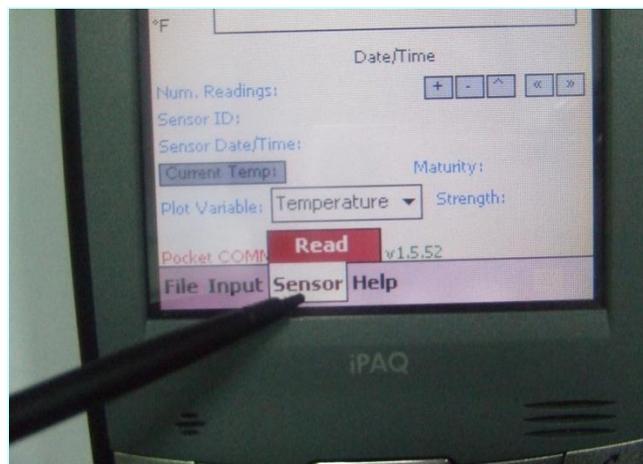


Figura 3.30 Opciones desplegable del menú SENSOR

Después de conocer las funciones que despliega el programa se muestra la forma de introducir las particularidades para la etapa de calibración.

Figura. 3.31 En el comando “Input” opción “Maturity”, en la etapa de calibración únicamente se activa la primera casilla y en la última casilla se coloca en valor del Datúm, el cual es cero grados centígrados para el caso en particular.

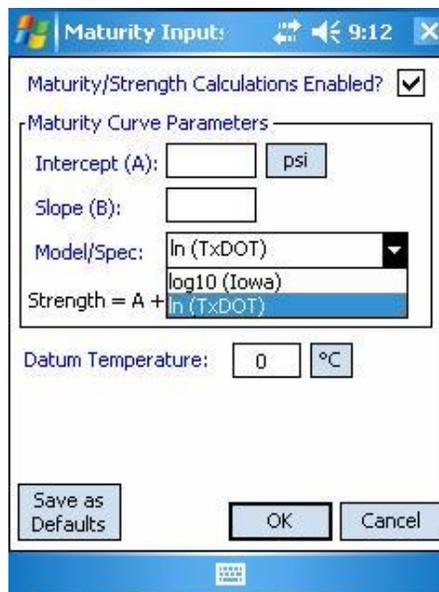


Figura 3.31 Pantalla de la Opción MATURITY del menú INPUT

Figura. 3.32 En el comando “Input” opción “Placement” se debe colocar en la primera casilla la fecha de elaboración de la calibración, en la segunda casilla se coloca la hora en que se colocó el sensor o la hora a partir de la cual se desea conocer los resultados, en la tercera la descripción del sensor, en la cuarta la localización del sensor o elemento en el cual se embebió, en la siguiente la profundidad a la cual está el sensor y en la última casilla se debe activar la opción (como se muestra en la imagen) para que los datos reportados sean a partir de la hora arriba definida.

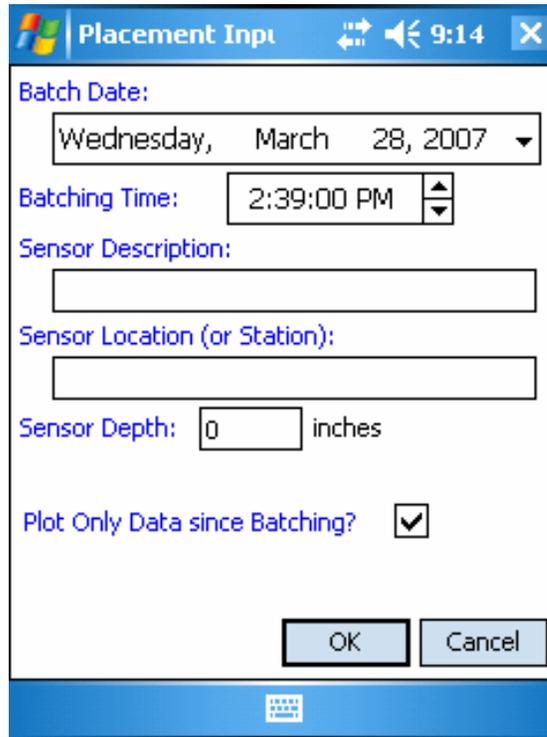


Figura 3.32 Pantalla de la Opción PLACEMENT del menú INPUT

Figura. 3.33 En el comando “Input” opción “Preferences”, en la primera casilla se definen las unidades en sistemas ingles y métrico, si se deja como se muestra se activan las unidades métricas, la siguiente casilla permanece como se muestra las dos siguientes también que tienen que ver con el código del sensor y número de puertos de la PocketPC y la última casilla está relacionada con el uso horario del equipo, en este caso se define como GMT lo cual significa hora del meridiano de Greenwich, para que el registro de la hora parta de acuerdo a la hora de la PocketPC.

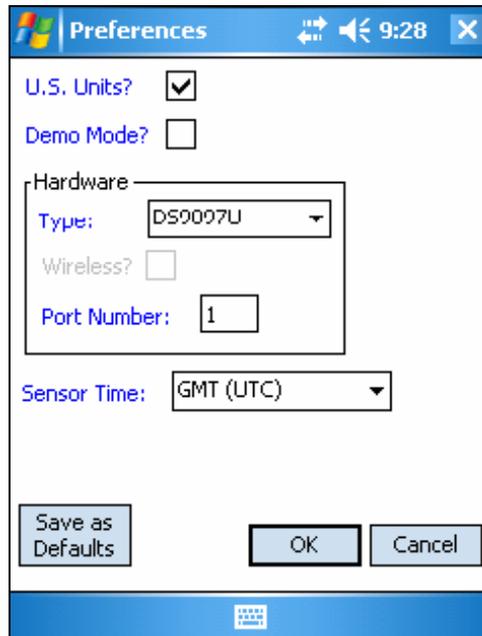


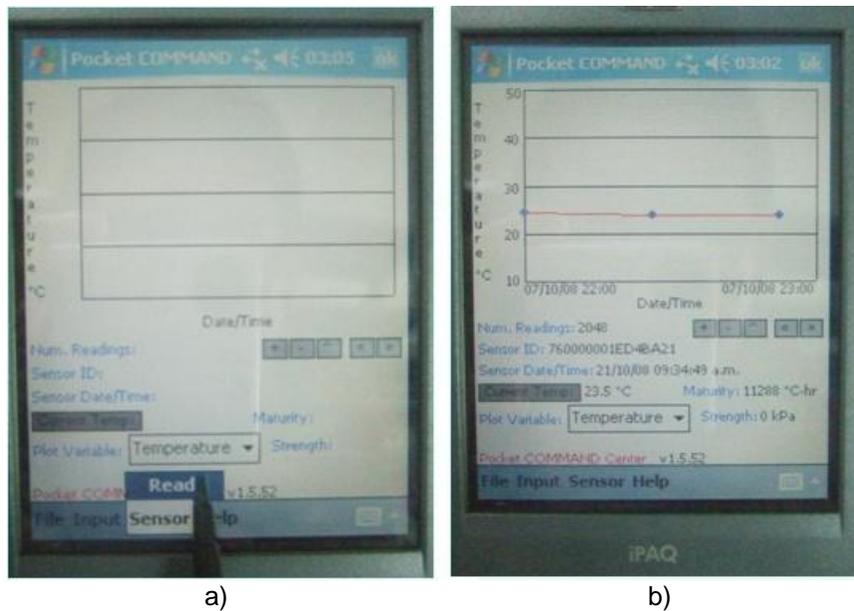
Figura 3.33 Pantalla de la Opción PREFERENCE del menú INPUT

Después de introducir toda la información descrita anteriormente, se está en las condiciones de coleccionar datos de madurez de la siguiente manera ver figura 3.34.



Figura. 3.34 Se conectan los clips del equipo a los sensores.

Figura. 3.35 Luego en el menú sensor dar click en la opción “Read”, y automáticamente inicia la recolección de datos e inmediatamente despliega una gráfica con los datos obtenidos.



a) b)  
Figura 3.35a muestra la opción READ que sirve para tomar la lectura  
Figura 3.35b la forma de cómo despliega en pantalla las lecturas obtenidas

Figura. 3.36. Luego en el menú “File” dar click en la opción “Save” para guardar los registros.

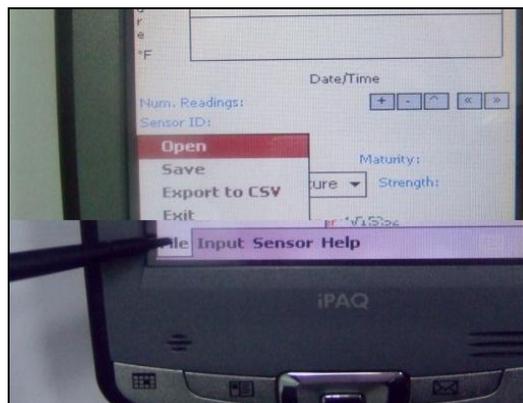


Figura 3.36 Opción SAVE de menú desplegable FILE

Figura. 3.37 Tal como en la imagen se muestra en la PocketPC la opción para guardar el archivo, cabe mencionar que cada vez que se realice una lectura se deberá guardar el archivo sustituyendo el anterior con la extensión .pce.

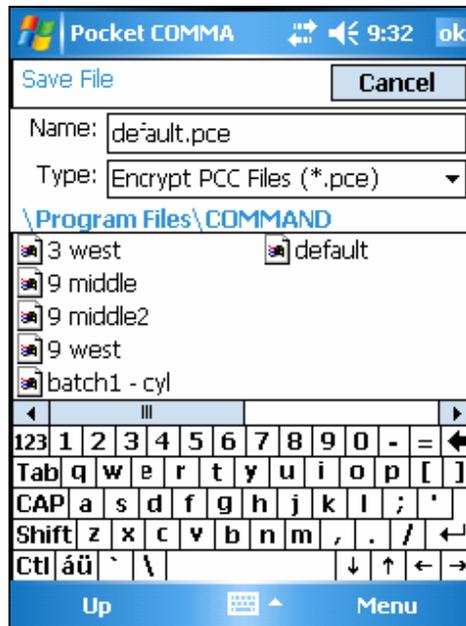


Figura 3.37 Pantalla de la Opción SAVE y teclado desplegable para asignar nombre del archivo

Al finalizar el periodo de 28 días el registro es descargado y se procede a seleccionar los valores de madurez para las edades de interés (1, 3, 7, 14 y 28 días).

Una vez se tienen los resultados de resistencia y madurez hasta la edad de 28 días, se grafica la resistencia a la compresión como una función del valor de la madurez de los especímenes instrumentados. Luego se traza la mejor tendencia. La curva resultante es la relación resistencia – madurez (calibración de mezcla) que será usada para estimar la resistencia del concreto curada bajo otras condiciones de temperatura.

La relación resistencia – madurez también puede ser establecida usando un análisis de regresión para determinar la mejor ecuación, la función más utilizada es aquella donde la resistencia se expresa como una ecuación lineal del logaritmo natural del índice de madurez. Así como se expone en el apartado 3.4.4.4.

### **3.4.4.3 Ensayo Complementario (Tiempos de Fraguado de la mezcla de concreto)**

Con el objeto de conocer el momento en el que la mezcla de concreto comienza a rigidizarse y ganar resistencia mecánica se procedió a definir los tiempos de fraguado inicial y final. Para esto: (1) se tomó dos muestras de concreto, una por cada bachada. (2) se separó el agregado grueso de la mezcla con el tamiz #4, ver figura 3.38. (3) luego se registra la hora en que fueron elaborados los cubos de mortero, ver figura 3.39.



Figura 3.38 Tamizado de concreto por malla #4



Figura 3.39 Elaboración de cubos para tiempos de fraguado

Posteriormente se realizó la primera penetración transcurrido las primeras 3 horas, para luego realizar las subsecuentes penetraciones a intervalos de una hora, registrando: el diámetro de la aguja de penetración, así como la carga necesaria para hincar una pulgada de la aguja, en aproximadamente  $10 \pm 2$  segundos, ver figura 3.40.



Figura 3.40 Penetración de cubos.

Los valores obtenidos para cada penetración se presentan en las tablas 3.17 y

3.18:

<b>Tiempos de Fraguado de muestra 1</b>			
<b>Hora</b>	<b>Lectura (lbf)</b>	<b>Área de aguja (pulg<sup>2</sup>)</b>	<b>PSI</b>
13:30	134	1	134
14:30	170	1/2	340
15:30	148	1/4	592
16:30	31	1/40	1250
17:05	50	1/40	1980
17:40	66	1/40	2640
18:20	87	1/40	3480
18:55	104	1/40	4160

**Tabla 3.17 Registro de Penetración muestra 1**

<b>Tiempos de Fraguado de muestra 2</b>			
<b>Hora</b>	<b>Lectura (lbf)</b>	<b>Área de aguja (pulg<sup>2</sup>)</b>	<b>PSI</b>
13:30	161	1	161
14:30	120	1/2	240
15:30	146	1/4	584
16:30	38	1/40	1500
17:05	55	1/40	2200
17:40	72	1/40	2880
18:20	91	1/40	3640
18:55	121	1/40	4840

**Tabla 3.18 Registro de Penetración muestra 2**

Para cada muestra se obtuvo un gráfico Penetración–Tiempo (figuras 3.41 y 3.42)

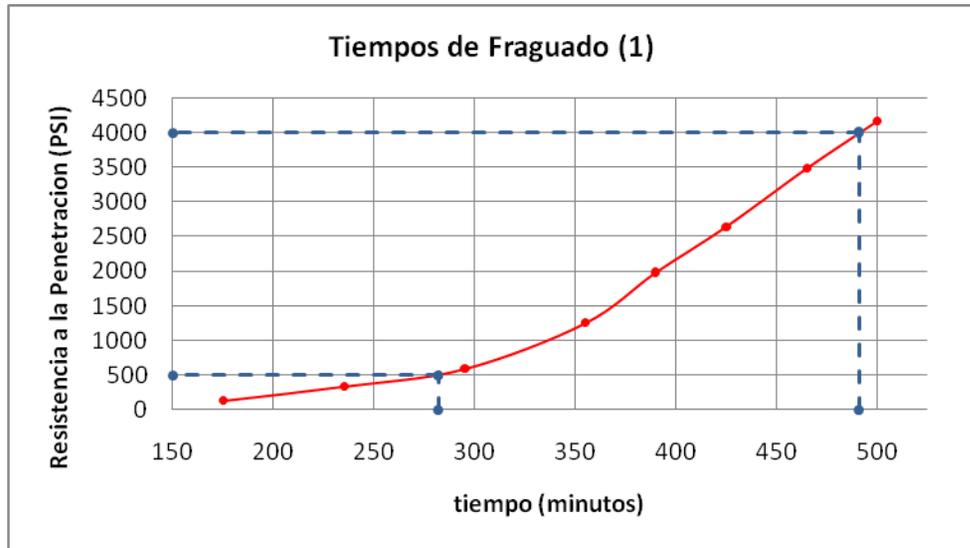


Figura 3.41 Curva de Fraguado muestra 1

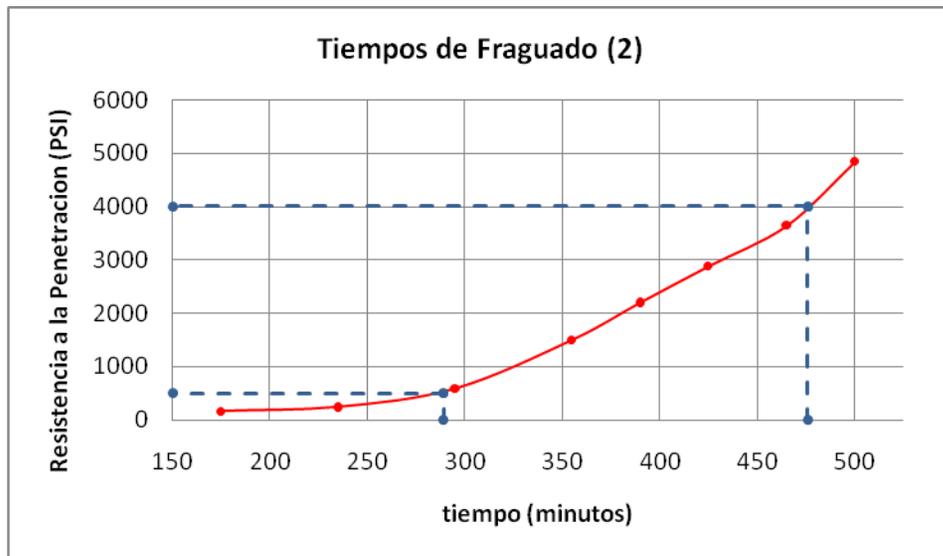


Figura 3.42 Curva de Fraguado muestra 2

De los gráficos se obtuvo que el Fraguado Inicial promedio para las dos muestras se dio a los 286 minutos (4 horas 46 minutos) y el fraguado Final a los 484 minutos (8 horas 4 minutos).

### 3.4.4.4 Determinación de la ecuación Resistencia – Madurez

Al obtener los valores de madurez y resistencia a la compresión para cada edad de ensayo de 1, 3, 7, 14 y 28 días, se procede a relacionar ambas variables mediante la ecuación de resistencia en función de la Madurez.

A continuación se muestra en la tabla 3.19 un resumen con los valores de madurez y resistencia a la compresión a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días.

Valores de Madurez y Resistencia			
Fecha y Hora	Edad (días)	Madurez* (°C-h)	Resistencia* (KPa)
26/11/2008 10:20	1	614.00	1765.20
28/11/2008 10:20	3	1687.50	4707.19
02/12/2008 10:20	7	3777.00	6766.59
09/12/2008 10:20	14	7383.50	8924.05
23/12/2008 10:20	28	14606.00	10100.85

**Tabla 3.19 \*Valores promedios de resistencia a compresión y cilindros instrumentados con sensores**

A partir de estos valores se grafica en el eje vertical la resistencia a compresión y en el horizontal la madurez. Luego se traza la tendencia logarítmica para definir la ecuación de aproximación así como se muestra en la figura 3.43.

$$y = 2916.9 \ln(x) - 17027 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

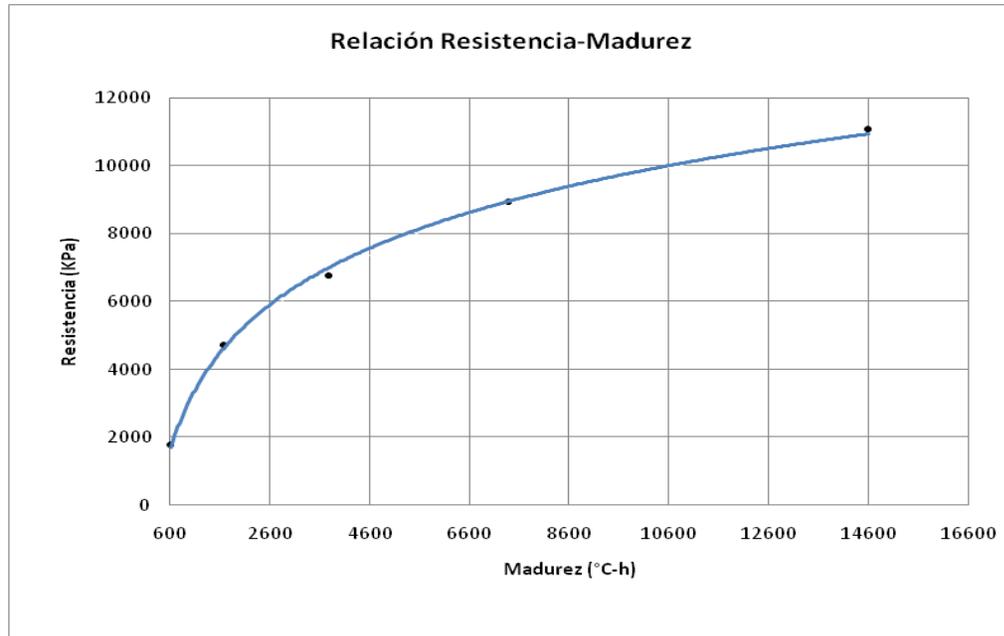


Figura 3.43 Gráfica Resistencia - Madurez

Esta ecuación en términos de la resistencia y madurez queda de la siguiente manera:

$$f'c = 2916.9 \ln(M) - 17027 \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

$f'c$  = resistencia del concreto a la compresión a cualquier edad (Kilo Pascales).

M = Madurez de concreto (°C-h)

### **3.5 Estimación de la resistencia del concreto por el Método de Madurez en un sistema de paredes coladas en el sitio.**

Después de que la ecuación de la relación Resistencia – Madurez ha sido determinada se está en las condiciones para estimar la resistencia del concreto utilizando el método de madurez.

Por lo tanto en esta sección se presenta la aplicación del método en un sistema de paredes moldeadas y coladas en el sitio y a la vez una serie de ensayos al concreto fresco, así como ensayos destructivos y no destructivos en la pared y en los especímenes muestreados, con la finalidad de conocer y comparar la evolución de resistencia obtenida por el método de madurez con los ensayos antes mencionados. Las paredes que se instrumentaran con los sensores tienen las siguientes características.

- Dimensiones de 1.2 x 1.2 m
- Espesor de 0.10 m
- Malla de acero por temperatura

El montaje del sistema se realizó de tal manera de asemejar lo más cercano a los sistemas construidos en campo así como se muestra en la secuencia figura 3.44.



Figura 3.44. Colocación de mallas para evitar contracciones por temperatura

Como parte de los procesos indispensables en este tipo de sistemas se coloca desencofrante, con la finalidad de impedir la adherencia del concreto a los moldes, evitando así daños al momento del retiro, figura 3.45



Figura 3.45 Colocación de desencofrante y helados para mantener espesor constante

Para el monitoreo de la evolución de resistencia del concreto se colocaron sensores a diferentes alturas con la finalidad de conocer el comportamiento de

la resistencia según la posición del mismo, a la vez permitirá conocer los puntos críticos de la estructura según su desarrollo de resistencia, ver figura 3.46.

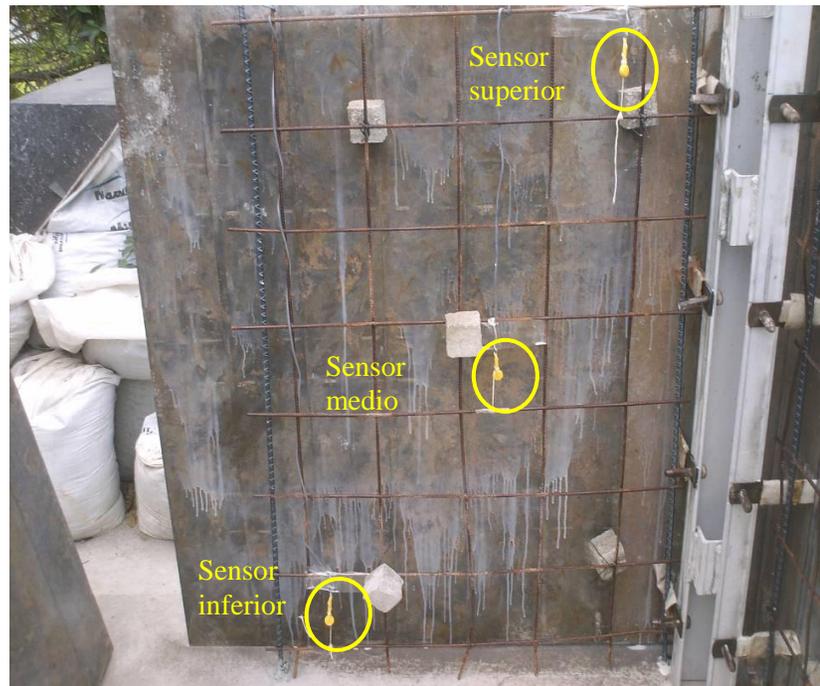


Figura 3.46 Colocación de sensores

En la figura 3.46 se observa la posición de los sensores a alturas de 10, 60 y 100 cm a partir del piso, y 30, 60 y 90 cm. a partir del borde lateral del molde, todos al centro del espesor de pared.

Posterior a la colocación de los sensores se procede a colocar el resto de moldes con sus respectivas accesorios, de tal manera que se proporcione un total confinamiento para el colado, ver figura 3.47.

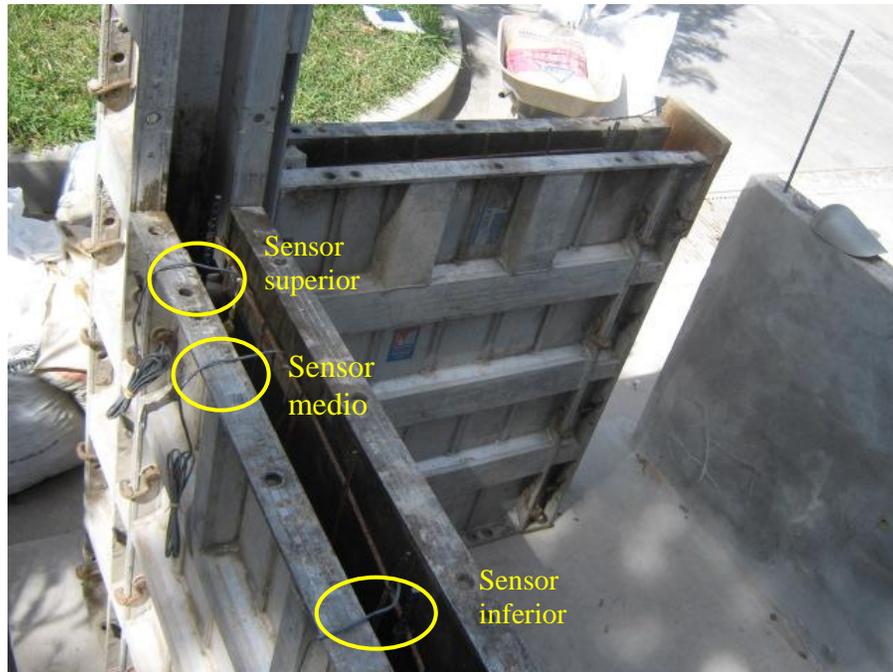


Figura 3.47. Moldes con sensores colocados listos para el fundido del concreto

Es importante mencionar que la mezcla para el colado de las paredes debe ser exactamente la misma proporción y con el mismo tipo de cemento con el que se realizó la calibración para la determinación de relación Resistencia – Madurez.

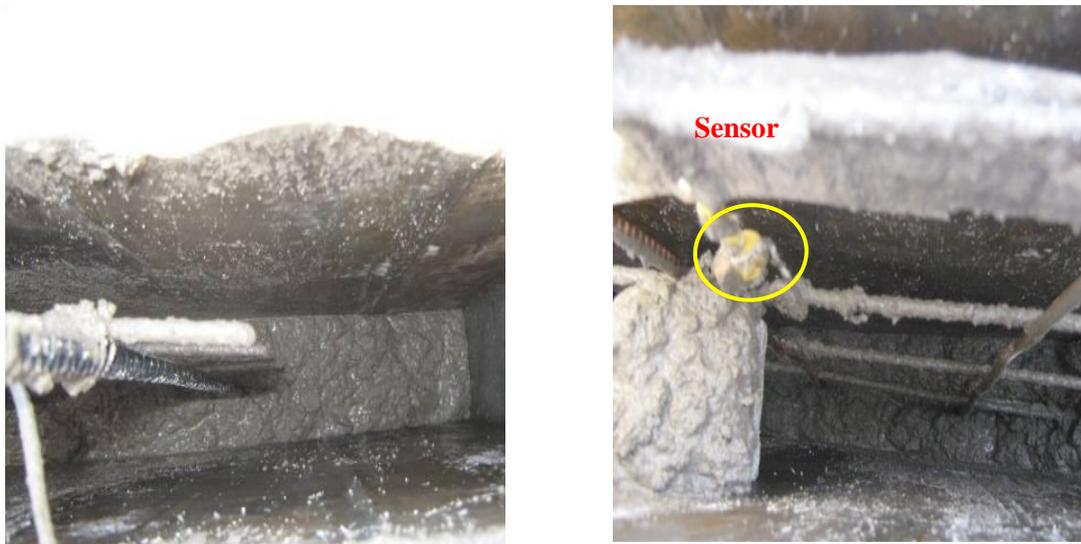


Figura 3.48: colado de las paredes con sensores



Figura 3.49: Sistema de paredes coladas con sensores embebidos

Inmediatamente después de que el concreto ha hecho contacto (figura 3.48) con los sensores es posible conocer la madurez del concreto, por lo tanto se hace necesario identificar los sensores así como se muestra en la figura 3.49.

El desmoldado de las paredes en este sistema es uno de los procesos que requieren una atención especial ya que de realizarse antes de que el concreto alcance la resistencia suficiente la estructura puede sufrir deformaciones o asentamientos, caso contrario si el desmoldado se realiza a edades tardías el concreto se puede adherir a los moldes y generaría grietas en la estructura.

El tiempo para el retiro de los moldes fue estimado en base a la experiencia expresada por los constructores de este tipo de sistemas y del proyecto visitado; el rendimiento de moldes utilizados en el sistema es de 2 usos diarios, debido a esto el desmoldado se realiza aproximadamente 4 horas después de terminar el colado.

Por lo tanto siguiendo el proceso constructivo realizado en el proyecto se procedió a realizar el desmoldado aproximadamente a las 4 horas de edad, a partir de la exploración empírica<sup>8</sup> del grado de rigidización del concreto en algunas zonas de la estructura, figura 3.50.

---

<sup>8</sup> Removiendo alguna sección del molde e insertando los dedos en el concreto para observar si se reflejan huellas superficiales, de ser así la estructura podría no estar apta para el retiro de los moldes



Figura 3.50: Exploración de las condiciones del concreto antes del desmoldado

Por lo que efectivamente el desmoldado de las paredes se inicio 4 horas después del colado y al mismo tiempo el de los cilindros, de tal manera que estos se curaran bajo las mismas condiciones de la estructura, figura 3.51.



Figura 3.51: desmoldado de cilindros y pared

Al mismo tiempo como parte del control de las características del concreto fresco y para la determinación de los tiempos de fraguado del concreto bajo las condiciones a las que estaría expuesta la estructura se realizaron los siguientes ensayos:

- Determinación de la temperatura del concreto fresco, ASTM C 1064 (Figura 3.52).

Parte del control del concreto durante el colado del es el ensayo de temperatura, reflejando valores de 27 °C y 28 °C, los cuales están por debajo del límite máximo permitido (32°C) para la colocación de la mezcla.



Figura 3.52: Ensayo de temperatura en el concreto fresco

- Determinación del revenimiento del concreto, ASTM C143

Para el control de la consistencia de la mezcla elaborada se realizó el ensayo de revenimiento, figura 3.53, que según el proporcionamiento elaborado en el apartado 3.3.2 el valor debe oscilar dentro de  $7 \pm \frac{1}{2}$  pulgadas garantizando así

un flujo adecuado del concreto a través de los moldes, resultando valores de 7” y 7 1/2 “. Permaneciendo dentro del rango permitido sin presentar ningún tipo de segregación ni heterogeneidad.



Figura 3.53: Ensayo de revenimiento de la mezcla

- Determinación del tiempo de fraguado del concreto de acuerdo a la norma ASTM C 403, en muestras curadas bajo las mismas condiciones de la pared.

Para conocer el comportamiento del fraguado del concreto de la estructura se realizó el ensayo en cubos colocados bajo el mismo escenario de las paredes, de tal manera que incidieran las mismas condiciones que a la estructura.

Se elaboraron 2 especímenes de acuerdo al procedimiento de la norma que rige el ensayo, así como se muestra en el registro fotográfico, donde se observa el tamizado del concreto fresco por la malla número cuatro (figura 3.54) tal

como lo recomienda la norma que rige el ensayo, luego el material que pasa la malla se deposita en moldes hasta una profundidad máxima de 1/2" a partir del borde superior del recipiente (figura 3.55).



Figura 3.54: Tamizado del concreto por la malla No 4 para elaboración de los cubos



Figura 3.55: Elaboración de los cubos con la mezcla que pasa el tamiz numero 4

Una vez elaborados los especímenes estos fueron colocados adyacentes a la estructura (figura 3.56) para reflejar el mismo comportamiento de fraguado que tendría el elemento.



Figura 3.56: Especímenes bajo las mismas condiciones de la estructura

El proceso de penetración se inicia a un tiempo estimado en el cual la mezcla refleja resultados en el dial (indicador de lecturas), cabe mencionar que las penetraciones se deben realizar en un tiempo no menor de 8 segundos ni mayor a 12, (figura 3.57), y que la distancia mínima a la cual se deben realizar las subsecuentes penetraciones deben ser a una distancia no menor de 1". El ensayo se da por finalizado cuando se obtiene una penetración mayor o igual a 4000 Psi.



Figura 3.57: Penetración de los especímenes bajo tiempo controlado

Los resultados obtenidos del ensayo se muestran en las tablas 3.20 y 3.21

#### Resultados de muestra 1

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Área de aguja (pulg <sup>2</sup> )	Lectura (Lbf)	Resistencia a la Penetración	
				PSI	Kg/cm <sup>2</sup>
13:55	195	1/4	82	328	23,06
14:25	225	1/10	75	750	52,73
15:00	260	1/20	92	1840	129,36
15:55	315	1/40	99	3960	278,42
16:55	375	1/40	152	6080	427,47

Tabla 3.20 Resultados de resistencia a la penetración de la muestra 1

#### Resultados de muestra 2

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Área de aguja (pulg <sup>2</sup> )	Lectura (Lbf)	Resistencia a la Penetración	
				PSI	Kg/cm <sup>2</sup>
13:55	195	1/4	90	360	25,31
14:25	225	1/10	62	620	43,59
15:00	260	1/20	62	1240	87,18
15:55	315	1/40	87	3480	244,67
16:55	375	1/40	156	6240	438,72

Tabla 3.21 Resultados de resistencia a la penetración de la muestra 2

Los gráficos para obtener el tiempo de fraguado inicial y final se muestran en las figuras 3.58 y 3.59.

Muestra 1

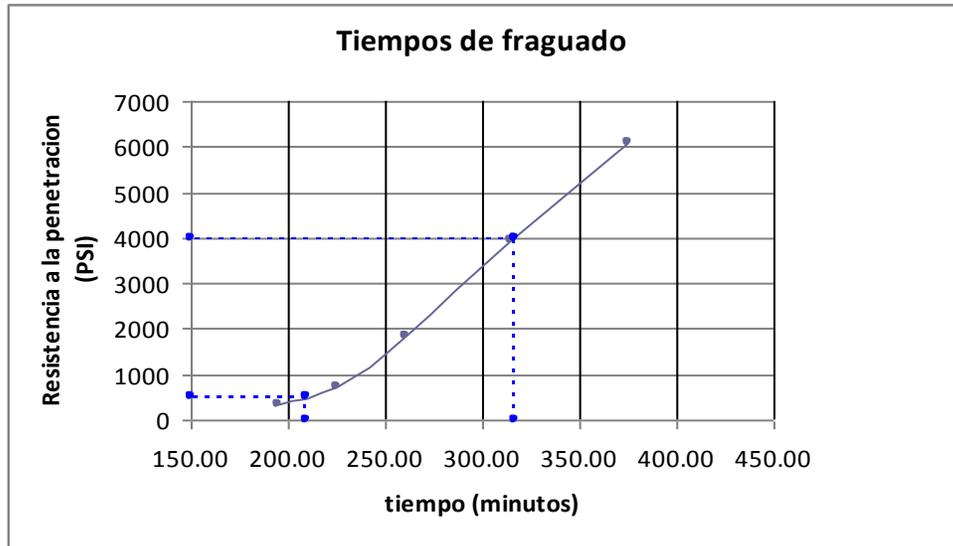


Figura 3.58 Gráfico para la determinación de fraguado inicial y final de las muestra 1

Muestra 2



Figura 3.59 Gráfico que muestra la edad del fraguado inicial y final de las muestra 2

De los gráficos se obtiene los valores de fraguado inicial y final, los cuales se muestran a continuación:

Muestra 1:

Fraguado inicial: 2 horas 29 minutos

Fraguado final: 5 horas 17 minutos

Muestra 2:

Fraguado inicial: 2 horas 37 minutos

Fraguado final: 5 horas 28 minutos

### **3.5.1 Registro de valores de madurez y resistencia del sistema de paredes coladas.**

Por la naturaleza misma del equipo el registro de los valores de resistencia del concreto no se requiere realizarlo inmediatamente después de que finaliza el colado sino que permite realizarlo en momentos posteriores sin que información alguna se pierda, por lo tanto el registro podría realizarse también al final del periodo de 28 días.

En este caso el registro se realizó aproximadamente 2 horas después de finalizado el colado para conocer la evolución de resistencia del concreto.

Es importante mencionar que la ecuación de calibración ya ha sido introducida de antemano al equipo siguiendo el procedimiento siguiente.

Se deberá crear un nuevo archivo por cada sensor colocado en la estructura, con todas las características de entrada de datos en las opciones, Placement, Preferences, y sobre todo la ecuación de Resistencia – Madurez obtenida en la calibración en la opción Maturity. Tal como se observa en la figura 3.60.

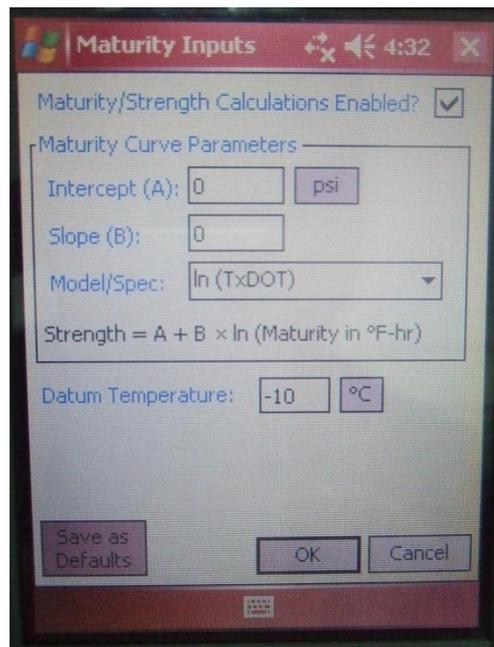


Figura: 3.60. Pantalla desplegada para el ingreso de la ecuación de madurez determinada

La ecuación se deberá ingresar con unidades congruentes a las activadas en el equipo. Siendo la ecuación determinada la siguiente: Resistencia = -17027 + 2916.9\* Ln (madurez), donde A= -17027, B= 2916.9 y de igual manera que en la calibración el Datúm de temperatura es igual a cero.

Luego de introducir la ecuación y los datos de Placement, Preferences se está en las condiciones de tomar datos de madurez y resistencia en la estructura

instrumentada, utilizando la opción “Read” así como se expuso en la sección de uso de equipo para la calibración.

Por lo tanto el proceso de lecturas de resistencia en la pared resulta bastante sencilla, únicamente con conectar a los sensores de la pared, figura 3.61, y luego los valores obtenidos son descargados una vez finaliza el periodo de monitoreo del sistema, el cual es de 28 días para nuestro caso.

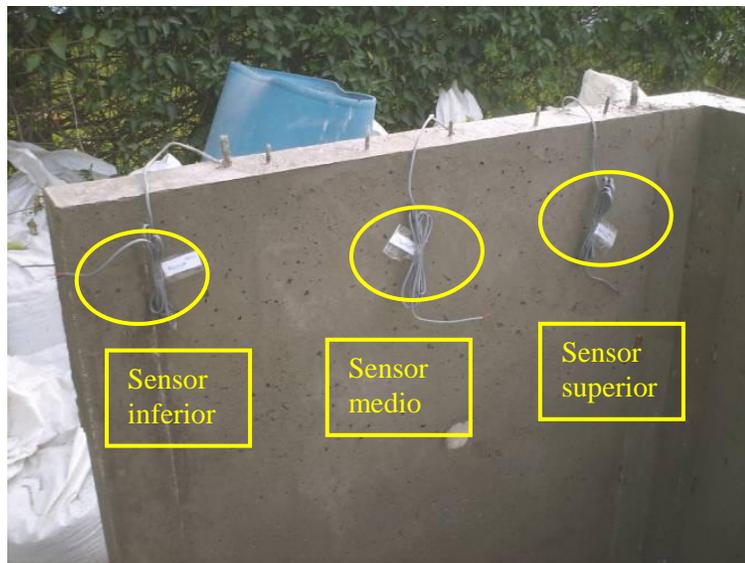


Figura 3.61: Sensores utilizados para las tomas de lecturas

En la tabla 3.22 se muestran los registros de resistencia y madurez para las primeras 24 horas de edad de la pared.

Hora	Sensor Superior			Sensor Medio			Sensor Inferior		
	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)
0	24.5	8	0	26.5	9	0	26.5	9	0
1	29.0	36	0	30.0	38	0	29.5	37	0
2	31.5	67	0	33.0	70	0	31.0	68	0
3	33.5	100	0	35.5	104	0	32.5	100	0
4	34.5	134	0	37.5	141	0	34.0	133	0
5	31.0	166	0	34.5	177	0	32.0	167	0
6	28.0	195	0	30.5	209	0	29.0	197	0
7	25.0	221	0	27.5	237	0	27.0	224	0
8	23.0	245	0	25.0	263	0	25.5	250	0
9	22.0	267	0	23.5	287	0	24.0	275	0
10	20.5	288	0	22.0	309	0	23.0	298	0
11	19.5	308	0	21.0	331	0	22.0	321	0
12	19.0	327	0	20.5	352	77	21.5	342	0
13	18.5	346	26	20.0	372	238	21.0	363	166
14	18.0	364	174	19.5	391	383	20.0	384	330
15	18.0	382	315	19.0	410	522	19.5	403	471
16	17.5	400	450	18.5	429	654	19.5	423	613
17	17.5	417	571	18.0	447	774	19.0	442	741
18	17.0	434	687	17.5	465	889	18.5	461	864
19	16.5	451	800	17.0	482	993	18.5	479	975
20	16.5	467	901	17.0	499	1095	18.0	497	1083
21	16.5	484	1006	17.0	516	1192	18.0	515	1187
22	17.5	501	1106	17.5	533	1287	18.5	534	1292
23	18.5	519	1209	18.5	551	1384	19.0	552	1389
24	20.5	538	1314	20.5	570	1483	20.0	572	1493

**Tabla 3.22 Resultados de de las primeras 24 horas de Temperatura, Madurez y Resistencia de sensores colocados en diversas alturas de la pared**

Igualmente se muestran los valores de resistencia a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días en la tabla siguiente (Tabla 3.23).

Edad (días)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )		
	Sensor superior	Sensor medio	Sensor inferior
1	13,4	15,1	15,00
3	44,9	45,2	45,00
7	71,7	71,6	71,00
14	92,7	92,6	92,00
28	114,1	114,1	113,00

Tabla 3.23 Valores de resistencia obtenidos por el método de madurez

### 3.5.2 Ensayos destructivos y no destructivos para la estimación de la evolución de resistencia del concreto del sistema de paredes.

Como parte del estudio del comportamiento de la resistencia a través del tiempo fueron realizados una serie de ensayos que sirven de referencia para conocer cómo evoluciona la resistencia de la estructura, al mismo tiempo se pueden comparar con los resultados de resistencia obtenidos por el método de madurez. Los ensayos que se realizaron son velocidad de pulso ultrasónico, número de rebote y compresión de cilindros y núcleos.

#### 3.5.2.1 Velocidad de pulso ultrasónico

El método del ultrasonido en la ingeniería es utilizado para ensayos en el concreto, es una técnica de ensayo no destructivo (Non destructive testing,

NDT) y su aplicación principal es conocer el interior de un material o sus componentes según la trayectoria de la propagación de las ondas sonoras, y que al procesarlas se conoce el comportamiento de las mismas durante su propagación en el interior del elemento.

Se sabe que el movimiento de una onda acústica es afectada por el medio a través del cual viaja.

La velocidad del sonido es usualmente el parámetro ultrasónico más fácil de medir, en un medio homogéneo está directamente relacionado con el módulo de elasticidad, densidad del material, módulo de Poisson, y el grado de homogeneidad. Según el tipo de onda la velocidad también es diferente. La velocidad se relaciona con la distancia en la que viaja, el tiempo, la longitud y frecuencia de onda. A partir de la relación de las variables anteriores es posible conocer el módulo de elasticidad dinámico que está directamente relacionado al grado de rigidez del elemento.

El aparato de prueba, mostrado esquemáticamente en la Fig. 3.62, consiste de un generador de pulso, un par de transductores (transmisor y receptor), un amplificador, un circuito medidor de tiempo, una pantalla (display) de tiempo y cables conectores.

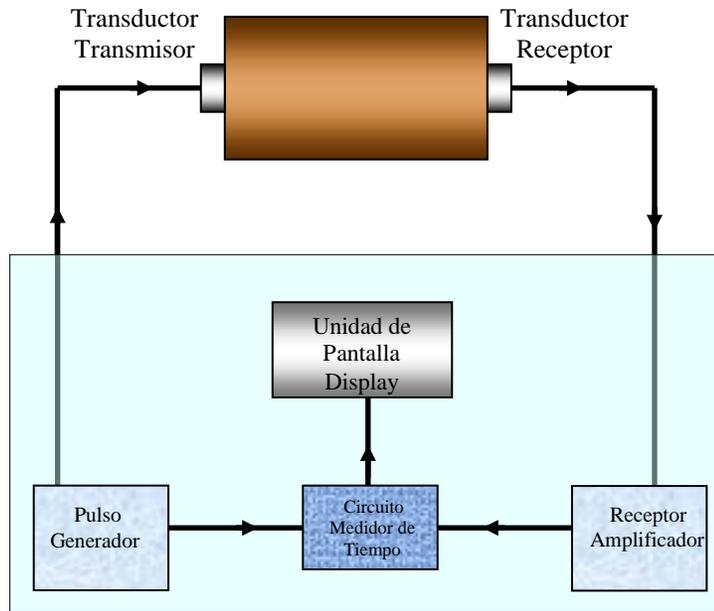


Figura 3.62: Esquema de equipo para ensayo de velocidad de pulso

El equipo utilizado para realizar el ensayo se muestra en la figura 3.63:



Fig. 3.63 Equipo utilizado en el ensayo de pulso ultrasónico.

Donde:

- 1: Teclado para control del equipo y ingreso de datos.
- 2: Pulso generador.
- 3: Transductor emisor de ondas.
- 4: Transductor receptor de ondas.
- 5: Receptor amplificador de pulso.
- 6: Pantalla de emisión de resultados de ensayos.

El método de ensayo está basado en la Norma ASTM D597 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto). El cual fue realizado en los especímenes curados en condiciones de campo y en la estructura misma en diferentes puntos, todo a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días.

Para la aplicación del ensayo en los cilindros es necesario obtener el peso volumétrico del espécimen a ensayar, así como la distancia entre los transductores, el cual sería la altura del cilindro, para el ensayo de pared el peso volumétrico utilizado sería el del espécimen mismo y la distancia entre los transductores es el espesor (10 cm).

Luego se procede a preparar y ajustar el equipo por medio de una iniciación de cero distancias y tiempo. La preparación consiste en la aplicación de un agente viscoso (grasa), figura 3.64, que permite un total contacto con los elementos, y para los ajuste de cero se logra colocando los transductores cara a cara, figura 3.65.



Figura 3.56: Especímenes bajo las mismas condiciones de la estructura



Fig. 3.65. Inicialización de equipo (calibración).

Posterior a la preparación de las superficies, los datos de peso volumétrico y distancias se ingresan al equipo para luego hacer el contacto entre las superficies del elemento a ensayar, Figura 3.66, manteniéndolas en la misma posición hasta que la lectura sea registrada.



Fig. 3.66. Colocación de los transductores para la toma de lecturas.

Con la finalidad de conocer la relación entre la evolución de resistencia del concreto obtenida por el método de madurez y la del módulo de elasticidad dinámico del concreto se realizó el ensayo a las alturas periféricas de los sensores superior e inferior. Resultando los datos siguientes ver tabla 3.24, 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28.

VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO ASTM C-597 V METER ( PULSO ULTRASONICO)										
N° de Ensayo	Edad ( días)	Masa (lb)	Vol. ( pie <sup>3</sup> )	Peso Volum. (lb/pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transd. (pulg)	DISTANCIA		Tiempo (µseg)	Velocidad (ft/s)	Módulo de Elasticidad Dinámico (psi) ( E6 )
						pie	m			
1	1	25,8	0,19	136	4,0	0,33	0,102	35,6	9320	2,289
								35,2	9438	2,490
<b>PROM</b>										<b>2,390</b>
2	3	25,2	0,19	130,6	4,0	0,33	0,102	34,3	9718,2	2,660
								34,1	9775,2	2,691
<b>PROM</b>										<b>2,676</b>
3	7	24,6	0,19	127,4	4,0	0,33	0,102	33,7	9891,2	2,688
								33,4	9980,0	2,736
<b>PROM</b>										<b>2,712</b>
4	14	24,0	0,19	124,7	4,0	0,33	0,102	31,7	10515,3	3,038
								31,9	10449,3	3,000
<b>PROM</b>										<b>3,019</b>
5	28	23	0,19	125,7	4,0	0,3	0,102	31,3	10649,63	3,042
								31,2	10683,76	3,062
<b>PROM</b>										<b>3,052</b>

Tabla 3.24 Resultados de pulso en la parte superior de la pared

VELOCIDAD DE PULSO A TRAVES DEL CONCRETO ASTM C-597 V METER ( PULSO ULTRASONICO)										
N° de Ensayo	Edad ( días)	Masa (lb)	Vol. ( pie <sup>3</sup> )	Peso Volum. (lb/pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transd. (pulg)	DISTANCIA		Tiempo (µseg)	Velocidad (ft/s)	Módulo de Elasticidad Dinámico (psi) ( E <sub>6</sub> )
						pie	m			
1	1	25,8	0,19	135,8	4,0	0,33	0,102	26,5	11467,6	3,421
								29,0	11495,4	3,260
<b>PROM</b>										<b>3,341</b>
2	3	25,2	0,19	130,6	4,0	0,33	0,102	29,9	11148,3	3,414
								29,7	11223,4	3,460
<b>PROM</b>										<b>3,437</b>
3	7	24,6	0,19	129,5	4,0	0,33	0,102	31,2	10683,8	3,214
								31,0	10752,7	3,256
<b>PROM</b>										<b>3,235</b>
4	14	24,0	0,19	126,3	4,0	0,33	0,102	36,7	10857,8	3,239
								30,8	10826,0	3,218
<b>PROM</b>										<b>3,229</b>
5	28	23,0	0,19	121,1	4,0	0,33	0,102	29,5	11299,4	3,425
								29,4	11337,9	3,448
<b>PROM</b>										<b>3,437</b>

Tabla 3.25 Resultados de pulso en la parte inferior de la pared

VELOCIDAD DE PULSO A TRAVES DEL CONCRETO ASTM C-597 V METER ( PULSO ULTRASONICO)										
N° de Ensayo	Edad ( días)	Masa (lb)	Vol. ( pie <sup>3</sup> )	Peso Volum. (lb/pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transd. (pulg)	DISTANCIA		Tiempo (µseg)	Velocidad (ft/s)	Módulo de Elasticidad Dinámico (psi) ( E <sub>6</sub> )
						pie	m			
1	1	25,8	0,19	135,8	6,0	0,50	0,152	105,7	9402,1	2,276
								106,6	9307,9	2,430
<b>PROM</b>										<b>2,353</b>
2	3	25,2	0,19	130,6	6,0	0,50	0,152	101,3	9871,7	2,744
								101,5	9852,2	2,775
<b>PROM</b>										<b>2,760</b>
3	7	24,6	0,19	129,5	6,0	0,50	0,152	97,2	10288,1	2,908
								96,9	10319,9	2,926
<b>PROM</b>										<b>2,917</b>
4	14	24,0	0,19	126,3	6,0	0,50	0,152	92,5	10810,8	3,143
								91,4	10940,9	3,219
<b>PROM</b>										<b>3,181</b>
5	28	23	0,19	123,2	6,0	0,5	0,152	87,6	11415,5	3,496
								88,1	11350,7	3,456
<b>PROM</b>										<b>3,476</b>

Tabla 3.26 Resultados de pulso en los cilindros ensayados

VELOCIDAD DE PULSO A TRAVEZ DEL CONCRETO ASTM C-597 V METER (PULSO ULTRASONICO)								
N° de Ensayo	Edad ( días)	Masa (lb)	Vol. ( pie <sup>3</sup> )	Peso Vol. (lb/pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transd. (pulg)	Tiempo (µseg)	Velocidad (ft/s)	Módulo de Elasticidad Dinámico (psi) ( E6 )
						29,0	10747,13	3138
1	28	1,89	0,015	126,0	3,74	29,2	10673,52	3095
						28,8	10821,76	3182
						<b>Promedio</b>		<b>3138</b>
						29,2	10673,52	3095
2	28	1,94	0,015	129,3	3,74	29,4	10600,91	3053
						29,1	10710,20	3117
						<b>Promedio</b>		<b>3088</b>
						28,3	11601,88	3718
3	28	2,05	0,016	128,1	3,94	28,5	11520,47	3666
						28,6	11480,19	3641
						<b>Promedio</b>		<b>3675</b>
						30,1	11351,05	3698
4	28	2,13	0,016	133,1	4,10	30,2	11313,47	3674
						30,0	11388,89	3723
						<b>Promedio</b>		<b>3698</b>
						28,8	11400,46	3660
5	28	2,09	0,016	130,6	3,94	29,1	11282,93	3585
						28,7	11440,19	3686
						<b>Promedio</b>		<b>3644</b>
						26,9	11586,12	3801
6	28	1,97	0,015	131,3	3,74	27,0	11543,21	3773
						26,7	11672,91	3858
						<b>Promedio</b>		<b>3811</b>

Tabla 3.27 Resultados de pulso en los núcleos extraídos de la pared con sensor

VELOCIDAD DE PULSO A TRAVEZ DEL CONCRETO ASTM C-597 V METER (PULSO ULTRASONICO)								
N° de Ensayo	Edad ( días)	Masa (lb)	Vol. ( pie <sup>3</sup> )	Peso Volum. (lb/pie <sup>3</sup> )	Distancia entre transd. (pulg)	Tiempo (µseg)	Velocidad (ft/s)	Módulo de Elasticidad Dinámico (psi) ( E6 )
						27,7	11251,51	3440
A	28	1,89	0,015	126,0	3,74	27,8	11211,03	3415
						27,6	11292,27	3465
						<b>Promedio</b>		<b>3440</b>
						28,1	11091,34	3324
B	28	1,88	0,015	125,3	3,74	28,2	11052,01	3000
						28,0	11130,95	3348
						<b>Promedio</b>		<b>3224</b>
						26,9	11462,21	3606
C	28	1,91	0,015	127,3	3,70	26,9	11462,21	3606
						26,7	11548,06	3661
						<b>Promedio</b>		<b>3624</b>
						28,7	11091,75	3555
D	28	2,01	0,015	134,0	3,82	28,3	11248,53	3656
						28,6	11130,54	3580
						<b>Promedio</b>		<b>3597</b>
						30,1	10575,86	3056
E	28	1,90	0,015	126,7	3,82	31,1	10235,80	2862
						30,0	10611,11	3076
						<b>Promedio</b>		<b>2998</b>
						28,6	11013,99	3382
F	28	1,94	0,015	129,3	3,78	28,9	10899,65	3312
						28,4	11091,55	3430
						<b>Promedio</b>		<b>3375</b>

Tabla 3.28 Resultados de pulso en los núcleos extraídos de la pared sin sensor

### 3.5.2.2 Ensayo de compresión en cilindros elaborados y curados en las paredes

Uno de los métodos de ensayo destructivos más frecuentes es el ensayo de compresión en cilindros de concreto tomados en campo, y por lo general estos son curados bajo condiciones estándar lo cual puede reflejar resultados de resistencia diferentes a lo que la estructura realmente a desarrollado.

En vista de lo anterior se curaron los especímenes en condiciones de campo para asemejar la evolución de resistencia de la estructura, figura 3.67 y poder

comparar con la resistencia obtenida por el método de madurez a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días



Figura 3.67: cilindros curados bajo las mismas condiciones de la pared

Al mismo tiempo con los resultados de resistencia a compresión de los cilindros se podrá validar el ensayo, que según la norma (ASTM C 1074) estos deben de estar dentro del  $\pm 10\%$  de la resistencia obtenida por el método de madurez a la misma edad.

A continuación se muestran los valores de resistencia de los especímenes curados en campo, tabla 3.29.

Cilindro N°	Fecha Ensayo	Edad [días]	Rev. [pul]	Diám. [cm]	Altura [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	Masa [g]	Peso Vol. [kg/cm <sup>3</sup> ]	Carga [Kg]	Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	6-12-08	1	6 1/2	15.1	30.5	179.1	11757	2153	4480	25
2	6-12-08	1	6 1/2	15.1	30.6	179.1	11778	2149	4260	24
<b>promedio</b>										<b>24</b>
5	8-12-08	3	6 1/2	15.1	30.5	179.1	11414	2090	10420	58
6	8-12-08	3	6 1/2	15.1	30.5	179.1	11319	2072	9340	52
<b>promedio</b>										<b>55</b>
7	12-12-08	7	6 1/2	15.1	30.5	179.1	11169	2045	13160	73
8	12-12-08	7	6 1/2	15.1	30.5	179.1	11117	2035	14690	82
<b>promedio</b>										<b>78</b>
9	19-12-08	14	6 1/2	15.1	30.4	179.1	10899	2002	15330	86
10	19-12-08	14	6 1/2	15.1	30.4	179.1	10939	2009	15540	87
<b>Promedio</b>										<b>86</b>
11	2-1-09	28	6 1/2	15.1	30.4	179.1	11751	2159	19380	108
12	2-1-09	28	6 1/2	15.1	30.4	179.1	11843	2175	19810	111
<b>Promedio</b>										<b>109</b>

Tabla 3.29 Resultados de ensayos de compresión en cilindros curados en condiciones de campo

### 3.5.2.3 Ensayo para la determinación del número de rebote del concreto endurecido

El ensayo para el número de rebote o esclerómetro es un ensayo que permite conocer la homogeneidad del concreto así como el desarrollo de resistencia que este tiene.

Por lo tanto los ensayos para la determinación del número de rebote realizado tanto en la pared como en los cilindros, servirán para comparar la evolución de la resistencia del concreto obtenida por el método de madurez con respecto al número de rebote obtenido de la pared, según su ubicación, de igual manera se

podrá comparar la resistencia a compresión de los cilindros con el numero de rebote obtenido del ensayo en los cilindros mismos.

El procedimiento para la realización del ensayo consiste en seleccionar un zona donde no exista refuerzo a menos de 2 cm de espesor del lugar donde golpeará el martillo, luego se prepara la superficie, si es que esta exageradamente rugosa y desnivelada, luego se realizan 10 golpes donde cada uno de ellos debe estar ubicado a una distancia mayor a 1 pulgada.

Para la pared el ensayo se realizo a la altura superior e inferior en las proximidades de los sensores, figura 3.68, y en los cilindros se realizó en uno de los cuales se ensayaría a compresión, figura 3.69. Todo a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días.



Figura 3.68: Ensayo de número de rebote en la pared a la altura superior e inferior



Figura 3.69: Ensayo de número de rebote en cilindros

Los resultados de ensayos en la pared se muestran a continuación, tabla 3.30

<b>Ensayo de número de Rebote en la zona superior de la pared</b>											
<b>Edad (días)</b>	<b>Número de rebote obtenido</b>										<b>Prom.</b>
1	16	17	16	17	18	17	17	18	17	16	17
3	21	22	22	24	24	22	25	24	24	23	23
7	26	26	26	26	27	27	28	27	29	29	27
14	26	26	26	26	26	27	27	27	28	26	27
28	28	32	26	26	29	24	28	29	27	28	28
<b>Ensayo de número de Rebote en la zona inferior de la pared</b>											
<b>Edad (días)</b>	<b>Número de rebote obtenido</b>										<b>Prom.</b>
1	18	19	18	19	20	19	19	20	19	18	19
3	23	26	25	27	25	26	28	26	23	26	26
7	28	28	29	29	26	31	29	26	30	28	28
14	28	29	31	33	30	31	32	32	29	32	31
28	30	34	31	28	32	31	31	31	32	30	31

Tabla 3.30 Resultados de ensayo del martillo de rebote en la pared

Los resultados de ensayo en los cilindros se muestran a continuación, en la tabla 3.31.

Ensayo de número de Rebote en cilindros											
Edad (días)	Número de rebote obtenido										Prom.
1	12	13	12	13	13	12	13	14	14	13	13
3	18	18	18	17	18	18	15	17	17	17	17
7	20	20	20	20	19	20	19	16	18	20	19
14	21	20	20	22	20	22	21	20	19	22	21
28	22	21	22	24	22	22	24	22	26	22	23

**Tabla 3.31 Resultados de ensayo del martillo de rebote en los cilindros**

### **3.5.2.4 Resistencia a la compresión de núcleos extraídos de la pared**

La extracción de núcleos en una estructura es una forma de conocer la resistencia real que ella posee, por lo tanto se realizó la extracción de núcleos a las tres diferentes alturas a las cuales se colocaron los sensores (dos núcleos por cada altura) a la edad de 28 días para comparar los resultados de dichos núcleos con la resistencia obtenida por el método de madurez y los cilindros ensayados a compresión.

La extracción de los núcleos se realizó en la parte superior media e inferior de la pared siempre en las periferias de los sensores, bajo la norma ASTM C 42 (Método de ensayo para la obtención y esmerilado de núcleos de concreto) con el cuidado de que los elementos extraídos no poseyeran parte de las mallas colocadas en la misma, por lo tanto nos auxiliamos de un dispositivo conocido comúnmente como “pachometro”, figura 3.70 el cual sirve para detectar el acero de refuerzo en cualquier estructura.



Figura 3.70. Equipo para detectar el acero de refuerzo

Después de que las zonas estaban limitadas se procedió a realizar la extracción, con la broca adecuada (ver figura 3.71), ya que se debe respetar la relación largo ancho de los núcleos extraídos para su posterior corrección de longitud- diámetro, según la norma ASTM C 42.



Figura 3.71 extracciones de núcleos de las paredes

Posteriormente los núcleos fueron aserrados y cabeceados por medio de un refrentado de azufre, figura 3.72



Figura 3.72 Refretando de azufre en núcleos extraídos

A continuación los núcleos fueron ensayados a compresión, figura 3.73, dentro de la tolerancia de 28 días, el cual es de  $\pm 20$  horas para dicha edad.



Figura 3.73. Compresión de núcleos

Los resultados del ensayo a compresión de los núcleos a los 28 días se muestran en las tablas 3.32.

No	Altura ext. (cm)	Diámetro (cm)	Altura corte (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Altura cabeceada (cm)	L/D	factor correc.	carga (kg)	esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	esfuerzo corregido (kg/cm <sup>2</sup> )
1	10,0	7,5	9,7	44,2	10,5	1,4	0,95	7320	166	158
2	10,0	7,5	9,7	44,2	10,4	1,39	0,95	7600	172	163
3	10,5	7,5	10,1	44,2	10,9	1,45	0,95	8170	185	176
4	10,0	7,5	10,4	44,2	10,9	1,45	0,95	7770	176	167
5	10,5	7,5	10,0	44,2	10,7	1,43	0,95	7610	172	163
6	10,0	7,5	9,6	44,2	10,2	1,36	0,94	7920	179	168

**Tabla 3.32 Resultados de compresión de núcleos extraídos de la pared sin sensor**

# CAPITULO IV

## **4 Análisis de resultados**

En este capítulo se presenta una comparación y análisis de resultados obtenidos en la calibración de la mezcla y aplicación del método de Madurez, consistiendo esta última en: la construcción de un sistema de paredes de concreto coladas en el sitio, las cuales fueron instrumentadas con sensores en tres zonas distintas para monitorear la evolución de resistencia antes, durante y posterior al desenmoldado, en el periodo de 28 días.

Para la calibración de la mezcla se realizará el análisis de validación del método, por medio de gráficos que muestren los valores de resistencia a compresión de cilindros curados en campo a través del tiempo, dichos valores nos permitirán hacer el análisis de acuerdo a la norma que rige el método de madurez.

Como resultado de la aplicación del método se presentarán gráficos comparativos que relacionan datos de temperatura, madurez y resistencia, a edades de 12 y 24 horas, 1, 3, 7, 14 y 28 días, para las distintas posiciones de sensores en la pared. Al mismo tiempo se realizará un análisis de resultados de los ensayos destructivos y no destructivos realizados a distintas edades y posiciones en la pared, dichos ensayos son:

Velocidad de pulso a través del concreto ASTM D 597

Determinación del número de rebote en el concreto ASTM C 805

Extracción de núcleos de concreto ASTM C 42 y C 39.

Compresión de cilindros curados en campo ASTM C 31 y C39.

A la vez, se presentan los gráficos de los tiempos de fraguado obtenidos de muestras curadas en las mismas condiciones de la estructura, determinando a partir de ellos la resistencia a la penetración que tendría la pared al momento de realizar el desenmoldado.

#### **4.1 Validación del método de madurez**

De acuerdo a la norma que rige el método se deben elaborar especímenes de concreto cuando se instrumente algún elemento, para la aplicación de la relación resistencia – madurez obtenida (ecuación de madurez), estos especímenes deberán curarse bajo las mismas condiciones de la estructura, de acuerdo a la norma ASTM C 31, los valores de resistencia obtenidos se comparan con los valores de resistencia del método de madurez de acuerdo al siguiente criterio: si los promedios de resistencia de los especímenes para cada edad de ensayo están fuera del  $\pm 10\%$  de la resistencia obtenida por el método de madurez, se deberán realizar revisiones en cuanto a la reproducción de la mezcla y procedimientos al momento de elaborar y ensayar los cilindros, si no se encuentran factores que hayan influido en los valores de resistencia, entonces la mezcla deberá ser calibrada nuevamente, ya que esta no sería válida, a continuación se comparan los valores de resistencia de cilindros

curados en campo con el  $\pm 10\%$  de resistencia obtenida por el método de madurez<sup>9</sup>.

En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se presentan los valores límites (-10%, +10%) de las resistencias para cada edad obtenidas por el método de madurez.

<b>Datos para la Validación de acuerdo a Sensor Superior</b>				
<b>Edad (días)</b>	<b>Resistencia a Compresión de Cilindros Curados en Campo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia obtenida por el Método de Madurez (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>		
		<b>+10%</b>	<b>Valor</b>	<b>-10%</b>
1	24	14.3	13	11.7
3	55	49.5	45	40.5
7	78	79.2	72	64.8
14	86	102.3	93	83.7
28	109	125.4	114	102.6

**Tabla 4.1 Límites de resistencia obtenidos por el método de madurez y resistencia de cilindros curados en campo para el sensor superior**

<b>Datos para la Validación de acuerdo a Sensor Medio</b>				
<b>Edad (días)</b>	<b>Resistencia a Compresión de Cilindros Curados en Campo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia obtenida por el Método de Madurez (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>		
		<b>+10%</b>	<b>Valor</b>	<b>-10%</b>
1	24	16.5	15	13.5
3	55	49.5	45	40.5
7	78	79.2	72	64.8
14	86	102.3	93	83.7
28	109	125.4	114	102.6

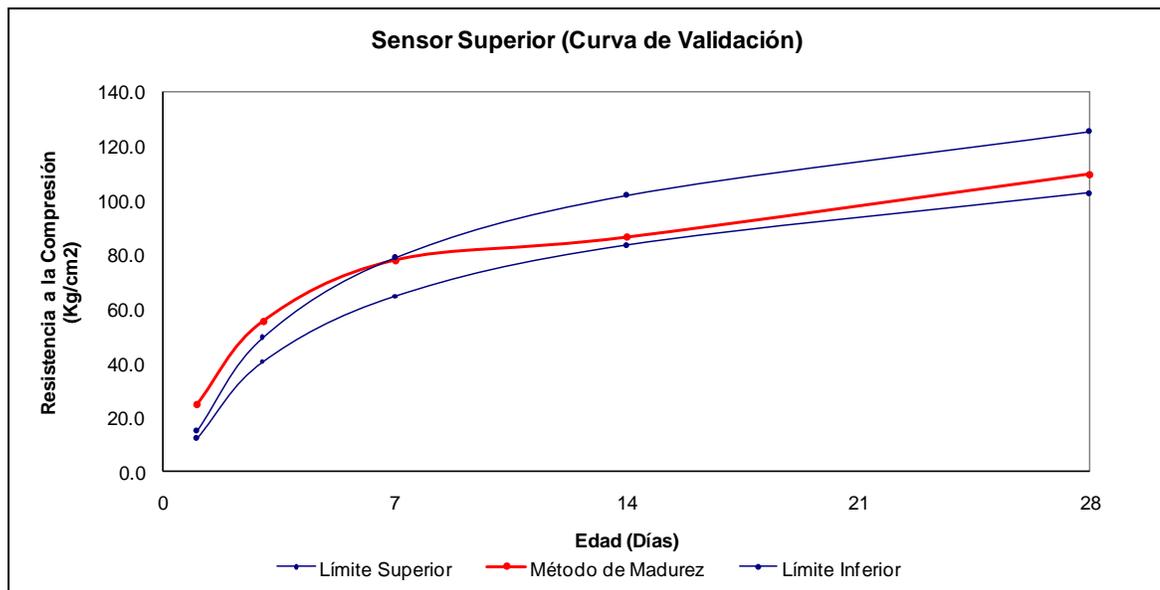
**Tabla 4.2 Límites de resistencia obtenidos por el método de madurez y resistencia de cilindros curados en campo para el sensor medio**

<sup>9</sup> Los valores de resistencia para las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días para los tres sensores se pueden observar en la tabla 3.23 del capítulo III

Datos para la Validación de acuerdo a Sensor Inferior				
Edad (días)	Resistencia a Compresión de Cilindros Curados en Campo (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia obtenida por el Método de Madurez (Kg/cm <sup>2</sup> )		
		+10%	Valor	-10%
1	24	20.9	19	17.1
3	55	51.7	47	42.3
7	78	79.2	72	64.8
14	86	101.2	92	82.8
28	109	124.3	113	101.7

**Tabla 4.3 Límites de resistencia obtenidos por el método de madurez y resistencia de cilindros curados en campo para el sensor inferior**

Los gráficos siguientes muestran la banda de calibración ( $\pm 10$ ) que representa los límites de resistencia dentro de los cuales deben oscilar las resistencias de los cilindros curados en campo, que se utiliza para validar la ecuación obtenida (fig. 4.1, 4.2 y 4.3).



**Fig. 4.1** Gráfica que representa la distribución de resultados de resistencia obtenidos por medio de cilindros curados en campo comparados con el  $\pm 10\%$  de resistencia obtenida por el Método de madurez del sensor colocado en la parte superior de la pared

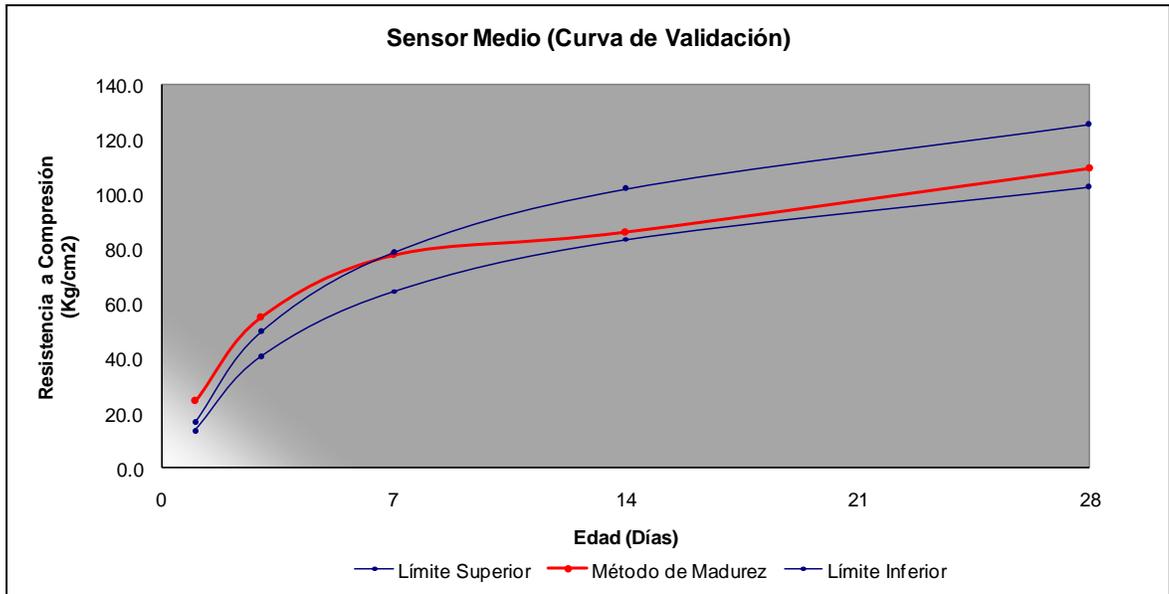


Fig. 4.2 Gráfica que representa la distribución de resultados de resistencia obtenidos por medio de cilindros curados en campo comparados con el  $\pm 10\%$  de resistencia obtenida por el Método de madurez del sensor colocado en la parte media de la pared

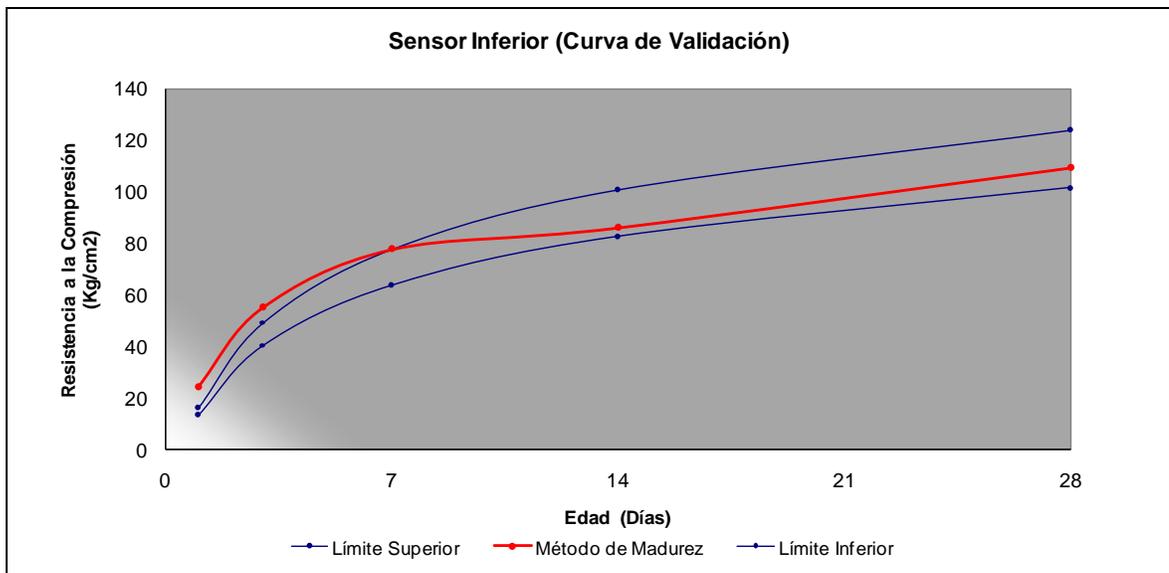


Fig. 4.3 Gráfica que representa la distribución de resultados de resistencia obtenidos por medio de cilindros curados en campo comparados con el  $\pm 10\%$  de resistencia obtenida por el Método de madurez del sensor colocado en la parte inferior de la pared

De acuerdo a los gráficos anteriores se observa que para los tres sensores colocados en la pared, solamente para las dos primeras edades los valores de

resistencia de los cilindros se encuentran ligeramente fuera del rango permisible y el resto si cumple con el mismo, por lo que se puede considerar como válida la calibración de la mezcla, ya que las diferencias no son *considerables* de acuerdo a la norma ASTM C1074.

El comportamiento de la resistencia de los cilindros se puede atribuir al efecto cross-over del cual se habla en el capítulo II de este documento, “el concreto expuesto a temperaturas ambientales altas a edades tempranas, aumenta de manera considerable su resistencia en dichas edades pero se ve disminuida a las edades posteriores e incluso no llega a alcanzar su resistencia especificada”.

## **4.2 Gráficos obtenidos por el método de madurez**

Por medio de la elaboración de gráficos que relacionan el comportamiento de los valores de temperatura, madurez y resistencia a través del tiempo se analizará el comportamiento de los resultados según la posición del sensor en la pared.

### **4.2.1 Gráficos de valores de temperatura**

Es útil conocer el comportamiento de la temperatura interna del concreto con respecto al tiempo de cada sensor, para identificar las variaciones que pueden existir debido a la posición ocupada en la estructura. En las figuras 4.4, 4.5 y

4.6 se muestra el comportamiento de la temperatura durante 28 días, periodo que duró el monitoreo de la pared.

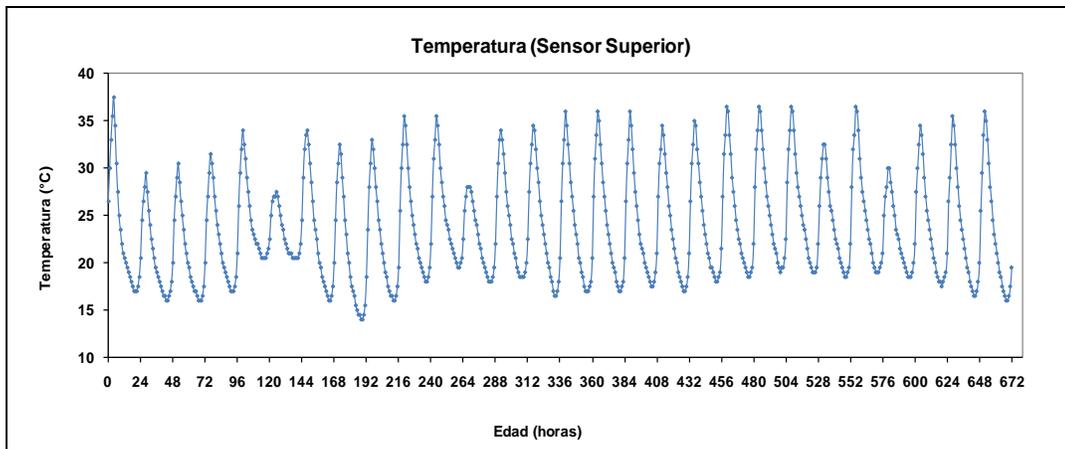


Figura 4.4 Gráfico de Temperatura-Tiempo durante 28 días, sensor superior.

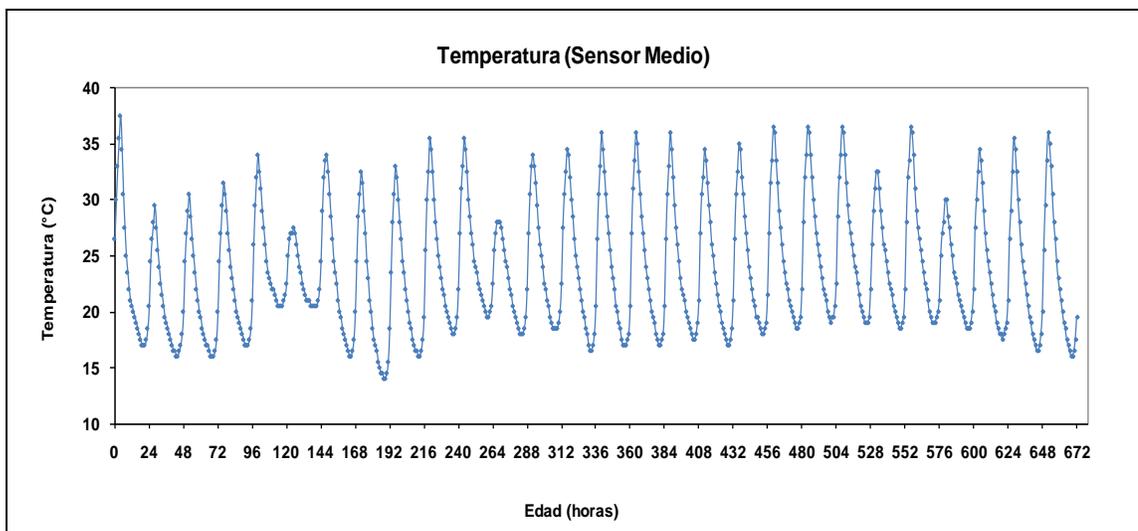


Figura 4.5 Gráfico de Temperatura-Tiempo durante 28 días, sensor medio.

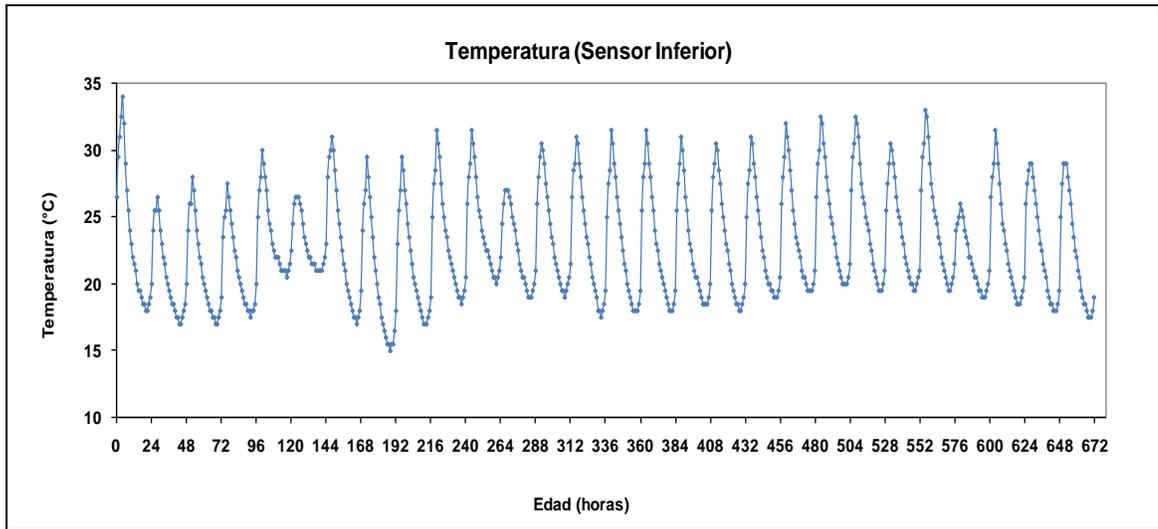


Figura 4.6 Gráfico de Temperatura-Tiempo durante 28 días, sensor inferior.

En el gráfico 4.7 se muestra una comparación de valores de temperatura para los tres sensores durante el periodo de 28 días.

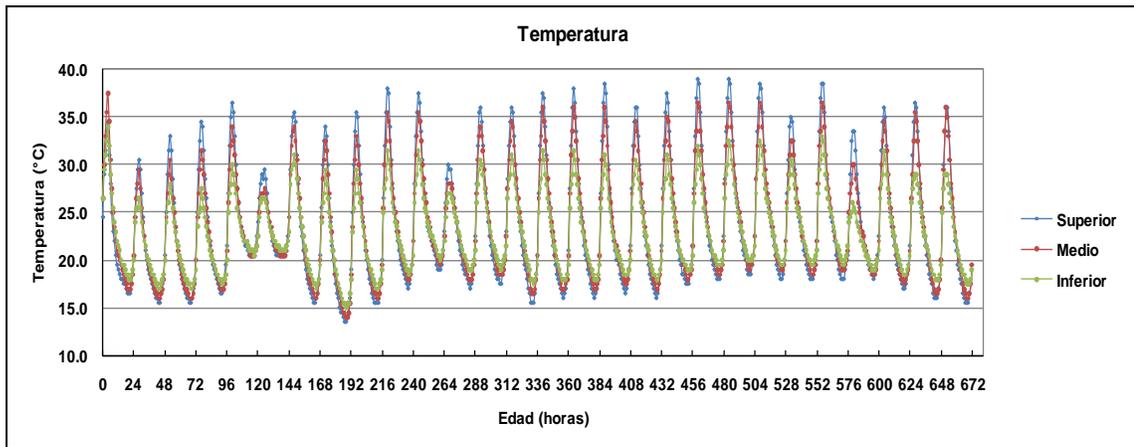


Figura 4.7 Gráfico de Temperatura-Tiempo durante 28 días para los tres sensores colocados

En las gráficas anteriores (Fig. 4.4, 4.5 y 4.6) se observa que existen diferencias de temperatura para cada uno de los sensores en el período de 28 días, atribuible a la posición de cada uno de ellos, lo que significa que en una

estructura la temperatura interna del concreto varía según la localización, exposición y forma del elemento.

Si aplicamos la teoría de madurez, la cual nos indica que a mayor temperatura interna del concreto, mayor será la ganancia de resistencia del mismo; a partir de esta premisa, las zonas de la estructura donde se registren mayores temperaturas desarrollaran mayores valores de resistencia.

De acuerdo al gráfico 4.7 el sensor inferior es el que oscila en un rango de temperaturas menores con respecto a los rangos de temperatura de los sensores superior y medio.

Debido a la reacción exotérmica producida por la hidratación del cemento se espera que las mayores temperaturas se den en las primeras horas de edad del concreto, en tal sentido para conocer dicha teoría, a continuación se presenta en la figura 4.8 las primeras 12 horas de registro de temperatura para cada uno de los sensores ubicados en la estructura, de la cual se puede observar que, el sensor medio presenta valores de temperatura de hasta  $37.5^{\circ}\text{C}$ , ligeramente mayores a las temperaturas de los sensores superior e inferior que presentan temperaturas de  $34.5$  y  $34.0^{\circ}\text{C}$  respectivamente, esto probablemente a que este sensor posee una mayor área de influencia, como producto del volumen de concreto que lo rodea.

El sensor inferior registra valores de temperatura menores, debido a que el área de influencia se ve disminuida por el volumen de concreto que lo rodea.

El sensor superior registra temperaturas menores que el sensor medio por el área de influencia, pero mayores que el inferior por la exposición a condiciones ambientales durante el colado. El análisis anterior está basado únicamente para el rango de tiempo del gráfico 4.8 (12 horas), ya que a edades posteriores se verá influenciada considerablemente por la incidencia de las condiciones ambientales como consecuencia de la remoción de moldes a las cuatro horas de edad, de acuerdo a la metodología de la construcción de sistema de viviendas de concreto coladas en el sitio adoptada localmente.

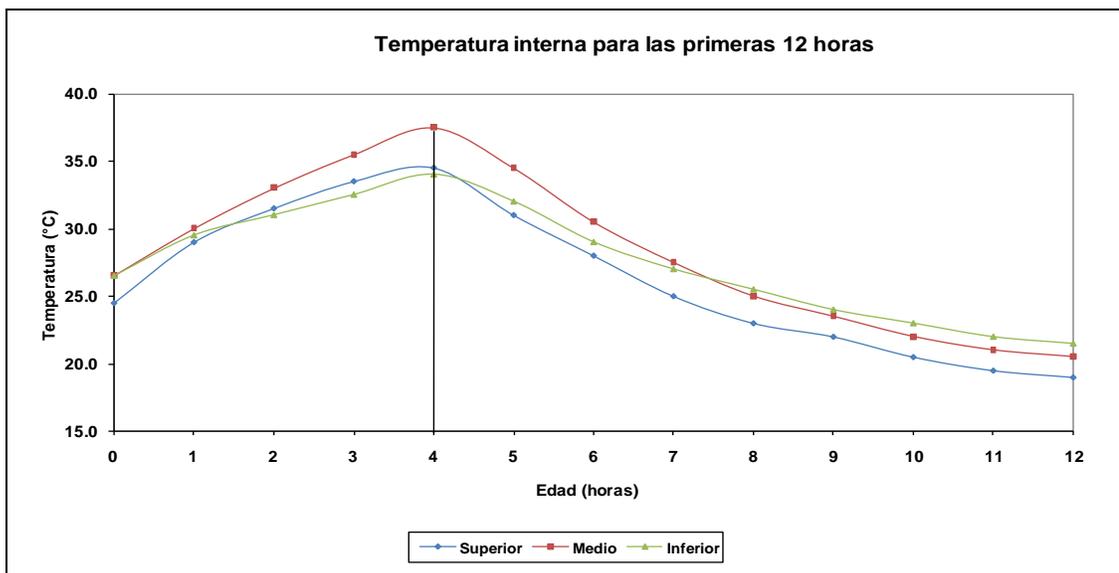


Figura 4.8 Gráfico de Temperatura para las primeras 12 horas

Al mismo tiempo se observa en el gráfico 4.8, que al momento del desmoldado ocurren los mayores valores de temperatura debido a la hidratación del cemento, este máximo coincide con la etapa III de la “Evolución normal del desprendimiento de calor de la pasta de cemento” (Capítulo II figura

2.6) en la cual los granos de cemento reaccionan desde la superficie hacia el interior, esta fase se identifica con el periodo de rigidización o de fraguado de pasta. En el grafico 4.8, luego del máximo de temperatura se observa un descenso, esto corresponde al equilibrio térmico con la temperatura ambiente luego de remover los moldes.

#### 4.2.2 Gráficos de valores de madurez

Debido al comportamiento de la temperatura interna del concreto, se espera que los valores de madurez sean directamente proporcionales a ellas, debido a la relación de variables de las que depende la ecuación de Nurse-Saúl , tal como se muestra en el gráfico 4.9 una relación directamente proporcional de la madurez respecto a la temperatura.

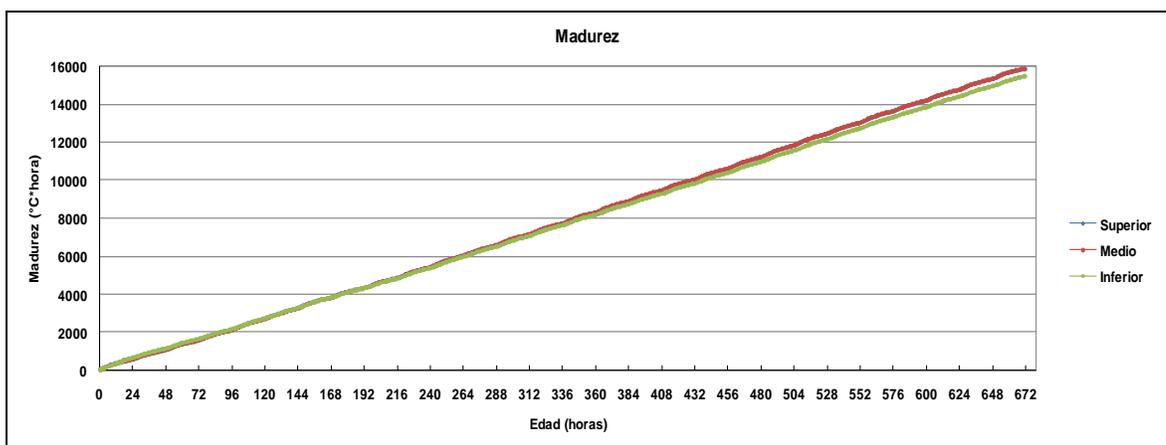


Figura 4.9 Gráfico de Madurez para 28 días

Cabe mencionar que la tendencia lineal ascendente de la figura 4.9 se debe a la naturaleza de la ecuación de madurez, ya que cada punto de la gráfica es una acumulación de Factores Temperatura Tiempo (FTT).

En el gráfico siguiente 4.10, se muestran los valores de Madurez para las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, para las cuales se determinará los valores de resistencia del concreto, los que se esperan se comporten con la misma tendencia, es decir, a mayores valores de madurez se tendrán mayores valores de resistencia.

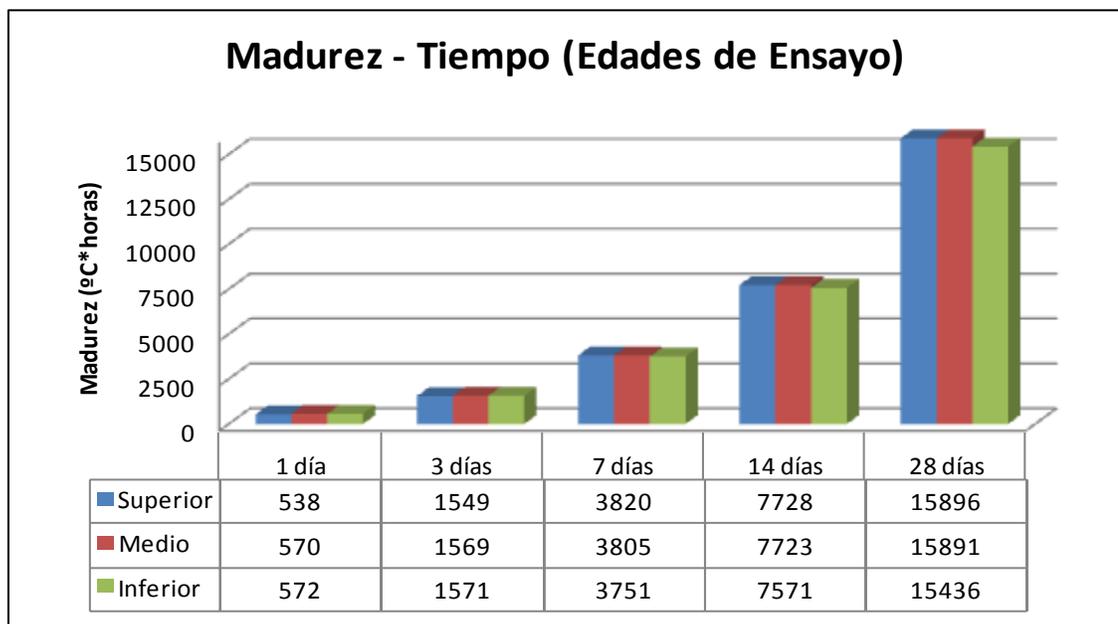


Figura 4.10 Gráfico de Valores de Madurez para Edades de Ensayo

En la figura 4.11 se muestra la evolución de madurez para las primeras 12 horas de edad, donde se observa que la madurez registrada en el sensor medio es el que mayor valor refleja, esto atribuido a la influencia de la masa de concreto que rodea a éste, diferente a los sensores superior e inferior donde los

valores registrados son muy cercanos. Al mismo tiempo se obtiene de manera gráfica el valor de madurez al momento del desmoldado, de acuerdo a la práctica utilizada en la construcción de viviendas coladas en el sitio en el proyecto visitado.

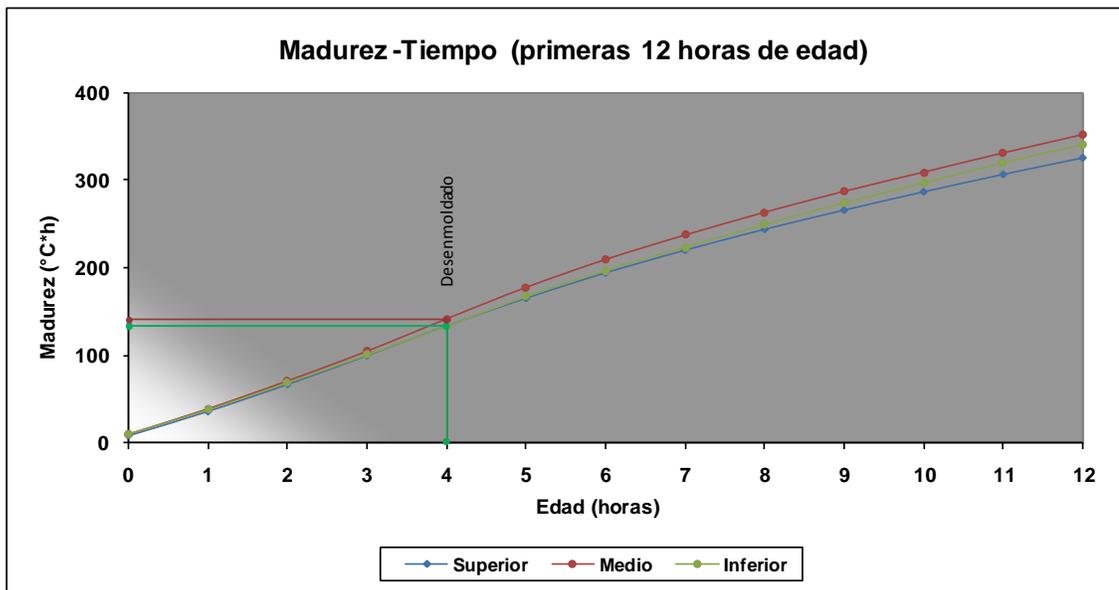


Figura 4.11 Gráfico de Madurez en el momento de desmoldado (4 horas)

En la tabla 4.4 se muestran los valores de madurez que presenta la pared al momento del desmoldado de acuerdo a la posición de los sensores, que de acuerdo al gráfico anterior no son iguales, por lo tanto se deberá evaluar que posición de sensor registrará el retiro de los moldes en la aplicación del método de madurez al sistema de casas coladas en el sitio, que según el proceso constructivo debería ser la última etapa del colado, conocedores de la utilización de este tipo de sistemas constructivos, afirman que por lo general, los mayores daños que se generan en los proyectos es precisamente en la zona

superior, atribuido posiblemente a que dicha zona no ha desarrollado suficiente rigidez.

<b>Sensor</b>	<b>Madurez (°C*horas)</b>
Superior	134
Medio	141
Inferior	133

**Tabla 4.4 Valores de Madurez en el momento de desenmoldado (4 horas)**

Cabe mencionar que la normativa para viviendas en El Salvador recomienda desmoldar las paredes de concreto a una edad mínima de 24 horas, mas sin embargo después del desmoldado de nuestra estructura las paredes no reflejaron ningún tipo de daño aparente ni asentamientos.

### **4.2.3 Gráficos de valores de resistencia**

Así como la tendencia de los valores de madurez, también se espera que la resistencia se comporte de manera similar, para una edad dada, a mayor madurez se obtendrá mayor resistencia.

Esto puede ser observado en la gráfica 4.12, la cual muestra que los tres sensores tienen la misma tendencia ascendente y pueden variar sensiblemente de acuerdo a su posición.



Figura 4.12 Gráfica de Resistencia – Edad para intervalos de 20 minutos durante 28 días

Al mismo tiempo se observa en la grafica 4.12 que existe un tramo de resistencia igual a cero y que la ganancia de resistencia se da un poco antes de las 24 horas.

En el gráfico 4.13 se muestra la tendencia de los valores de resistencia para cada día durante el periodo de monitoreo de la estructura, reflejando que el sensor inferior registra para los primeros cinco días resistencias ligeramente mayores a los otros sensores, y que el superior refleja las menores resistencias, lo cual viene a afirmar que el desmoldado deberá realizarse en base a los resultados que refleje el sensor colocado en la zona donde el concreto fue fundido de ultimo.

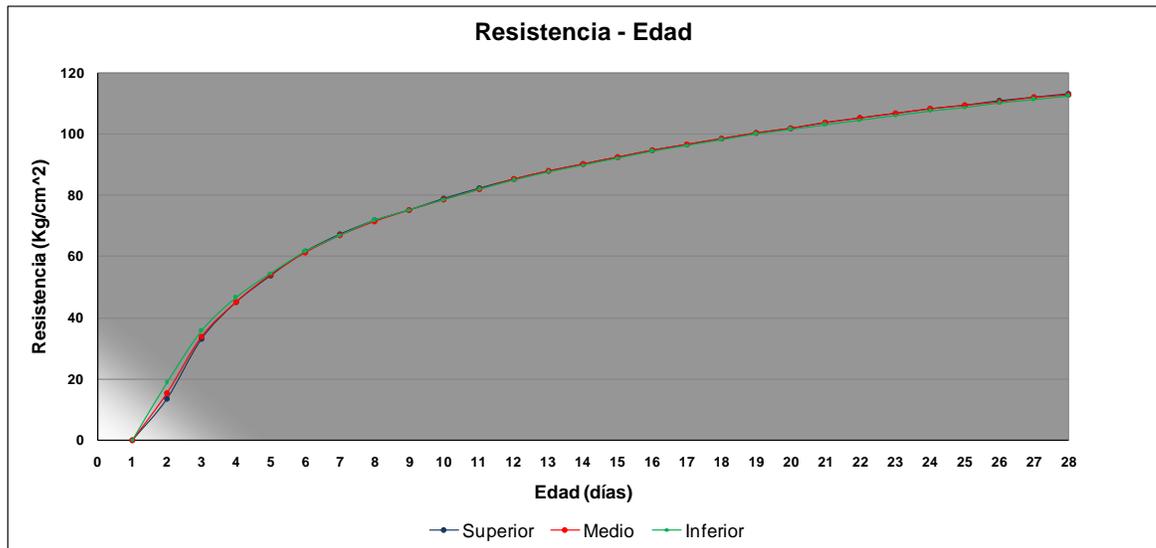


Figura 4.13 Gráfica de Resistencia – Edad para intervalos de 1 hora durante 28 días

En la grafica 4.15 se muestra la ganancia de la resistencia del concreto durante las primeras 24 horas, reflejando el tramo de las primeras 12 horas de resistencia igual a cero, dentro de el cual se encuentra la hora del desmoldado.

A la vez se observa que el sensor medio es el primero (12 horas) en registrar valores de resistencia y que el sensor inferior es el ultimo (13.5 horas), nuevamente corroborando que es el sensor ubicado donde se colocó por ultimo el concreto es el que refleja menores resistencia. Es importante analizar las posibles causas en el cambio abrupto de la tendencia de valores que refleja el sensor inferior con respecto a los otros dos, esto puede ser atribuido a que posterior al desmoldado el concreto entra en un proceso de equilibrio térmico con el ambiente, incidiendo en mayor grado en los sensores superior y medio, generando esto una disminución de temperatura en el concreto, lo que se ve

influenciado en un menor valor de madurez y consecuentemente una menor resistencia; en cambio, el sensor inferior siguió su desarrollo casi normal de temperatura debido a la poca incidencia del clima. Como se puede observar en la fotografía de la figura 4.14



Figura 4.14 Fotografía de Ubicación de Pared

En la fotografía se muestra la sombra predominante en la parte inferior de la pared colada, al mismo tiempo se observa que se encuentra protegida por la parte de enfrente con una pared de mampostería y en la parte posterior por un acopio de materiales, que sirven como barreras contra las corrientes de aire que pueden afectar en mayor grado las zonas superiores de la estructura colada, lo que hace mantener a la zona inferior en su desarrollo normal de temperatura.



Figura 4.15 Gráfica de Resistencia – Edad para intervalos de 1 hora durante las primeras 24 horas

En el gráfico 4.16, se muestran los valores de resistencia del concreto a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, registrados a través de los tres sensores. Los cuales muestran variaciones sensibles entre ellos, para las dos primeras edades atribuido a las marcadas diferencias de temperatura en las primeras horas de edad del concreto.

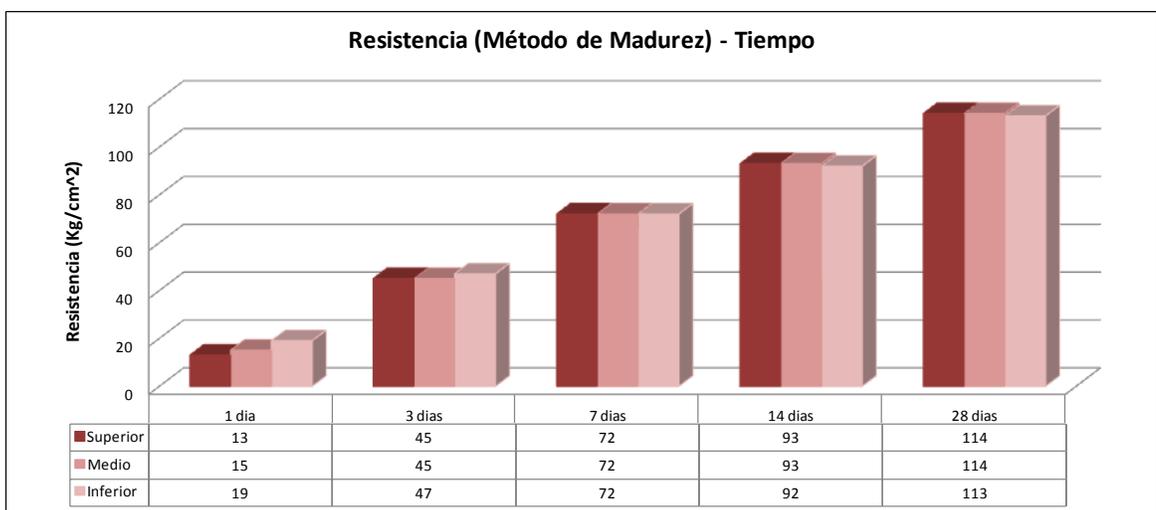


Figura 4.16 Valores de Resistencia a Edades de Ensayo para cada sensor

### 4.3 Gráficos obtenidos a partir de cilindros curados en campo

En la grafica 4.17, se muestra la tendencia de resultados obtenidos por medio de especímenes cilíndricos, curados bajo las mismas condiciones de la estructura.

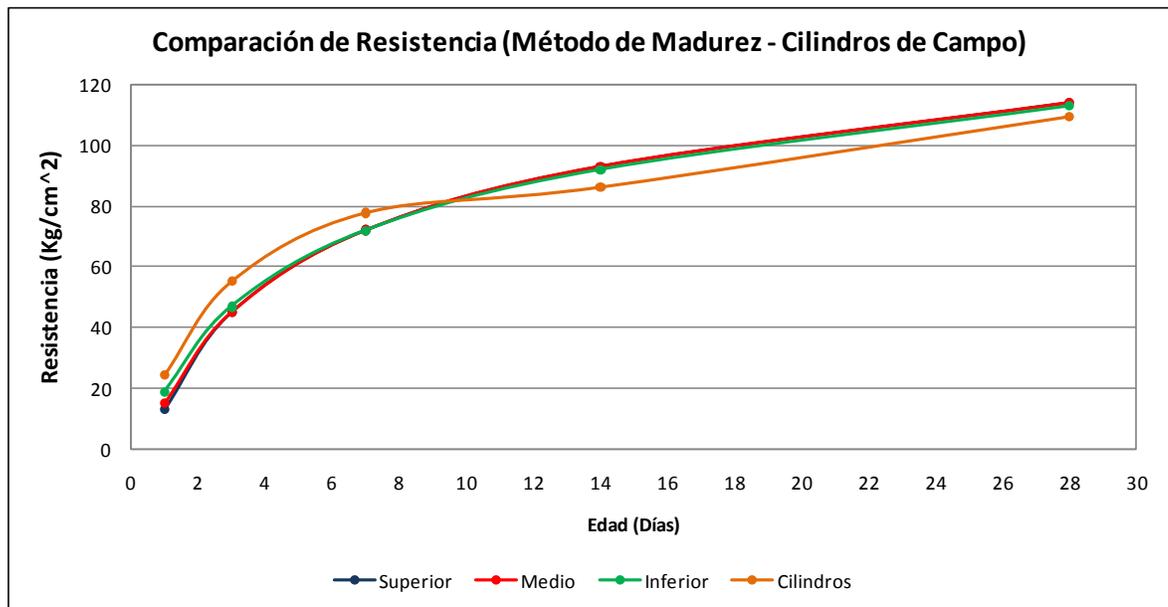


Figura 4.17 Valores de Resistencia obtenidos a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días

En los gráficos 4.17 y 4.18 se observa que para los cilindros curados en condiciones de campo se tienen mayores resistencias para las primeras tres edades, esto comparado con las resistencias obtenidas por el método de madurez. Lo anterior puede ser atribuido al efecto cross-over, el cual considera que el concreto expuesto a condiciones de temperatura alta a edades tempranas, se verá incrementada sustancialmente su resistencia a dichas edades, pero en un futuro su resistencia se verá disminuida y posiblemente no

alcance su resistencia especificada; en cambio la resistencia obtenida por el método de madurez no refleja este comportamiento.

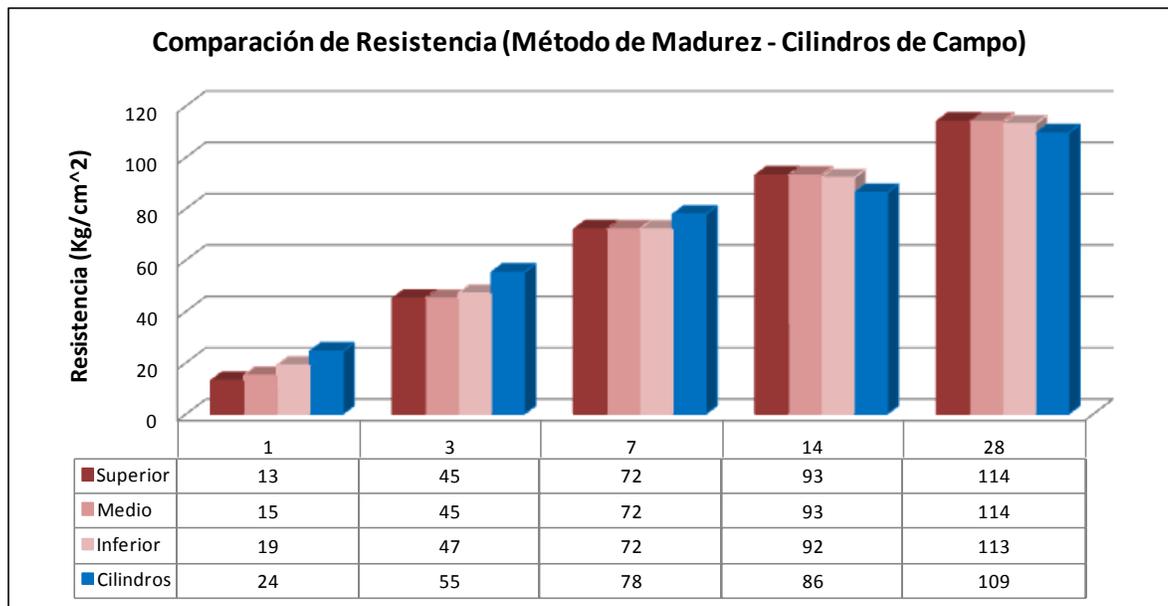


Figura 4.18 Valores de Resistencia obtenidos a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días comparados con los obtenidos por el Método de la Madurez

#### 4.4 Gráficos obtenidos a partir de ensayos complementarios.

Como una manera de conocer la evolución de la resistencia del concreto, obtenida por el método de madurez, comparada con ensayos de: Velocidad de pulso a través del concreto ASTM D 597, Determinación del número de rebote en el concreto ASTM C 805, Extracción de núcleos a la edad de 28 días ASTM C 42 en dos diferentes posiciones de la pared.

También se muestran los valores de fraguado inicial y final del concreto en muestras coladas bajo las mismas condiciones de la estructura, con la finalidad

de conocer en qué etapa del fraguado se encuentra la estructura al momento del desenmoldado.

#### **4.4.1 Tiempos de fraguado**

En el desarrollo de la hidratación del cemento, el fraguado es una etapa que se ve marcada por un aumento en la temperatura, de ahí la importancia de conocer y determinar el momento en que ocurre el fraguado inicial y final. Al mismo tiempo a esta etapa se le atribuye el inicio de la ganancia de resistencia mecánica del concreto al finalizar la “etapa durmiente”

Se realizaron penetraciones para conocer los tiempos de fraguado en dos muestras, las cuales estuvieron expuestas y curadas a las mismas condiciones de la estructura.

El gráfico 4.19 presenta los tiempos de fraguado inicial y final para el promedio de las dos muestras, reflejando los siguientes resultados:

Fraguado Inicial: 3 horas, 33 minutos

Fraguado Final: 5 horas, 23 minutos

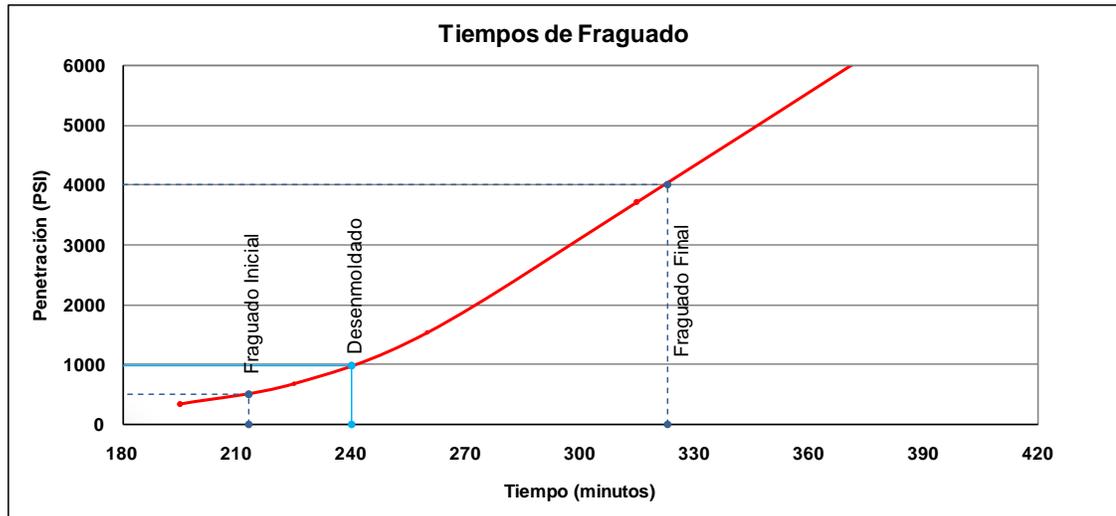


Figura 4.19 Gráfico de Tiempos de Fraguado para Muestra #1 y #2

Al mismo tiempo en el gráfico anterior se muestra la hora del desenmoldado de la estructura con su correspondiente resistencia a la penetración, el cual es de 975 PSI, como promedio de las dos muestras, en el gráfico se observa que el momento del desenmoldado se ubica dentro de la fase de fraguado del concreto, en este periodo la mezcla comienza a perder fluidez hasta convertirse en una masa rígida pero frágil.

A pesar de iniciar la rigidización de la mezcla de concreto en la etapa de fraguado esta no presenta resistencia mecánica, esto de acuerdo al gráfico 4.15, donde se registraron valores de resistencia hasta las 12 horas después del colado de la estructura.

De la figura 4.19 se obtienen de manera gráfica los valores de madurez para los tiempos de fraguado inicial y final mostrados en la tabla 4.5, observándose que al momento del fraguado inicial los sensores superior e inferior reflejan la misma

madurez (116.5 °C\*horas) la cual es menor que la obtenida por el sensor medio(122.5 °C\*horas).

Al momento del fraguado final el sensor que presenta una mayor madurez es el medio superando a los sensores superior e inferior en 12 y 11 unidades respectivamente y una mínima diferencia entre los sensores superior e inferior.

Por lo tanto en cuanto a la rigidez que la estructura pueda haber desarrollado al momento del desmoldado se puede decir que en la zona superior e inferior es donde las paredes se encuentran más susceptibles a daños debido a dicha actividad, es importante reconocer que dichos valores de madurez son producto del registro de temperatura por lo tanto como ya antes se había planteado que el sensor medio es el que mayor área de influencia posee con respecto a los sensores restantes por lo tanto es lógico que refleje mayores valores de madurez en el momento del desmoldado.

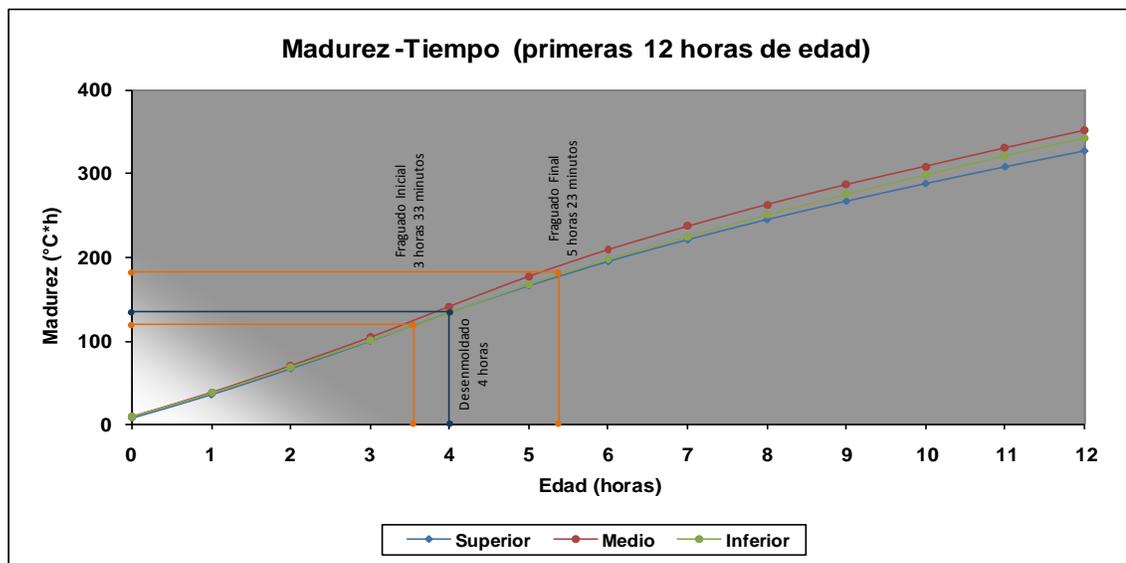


Figura 4.19 Gráfico de Madurez de las primeras 12 horas del cual se obtienen los valores de madurez para los tiempos de fraguados inicial y final, así como el momento del desmoldado

Sensor	Madurez al momento del fraguado (°C*horas)	
	Fraguado Inicial	Fraguado Final
Superior	116.5	176
Medio	122.5	188
Inferior	116.5	177

**Tabla 4.5** Valore de Madurez para los tiempos de fraguado inicial y final

#### 4.4.2 Ensayo en núcleos extraídos

En el gráfico 4.20 se muestran los valores de resistencia a compresión de núcleos extraídos en las diferentes posiciones para cada una de las paredes coladas (con sensores y sin sensores).

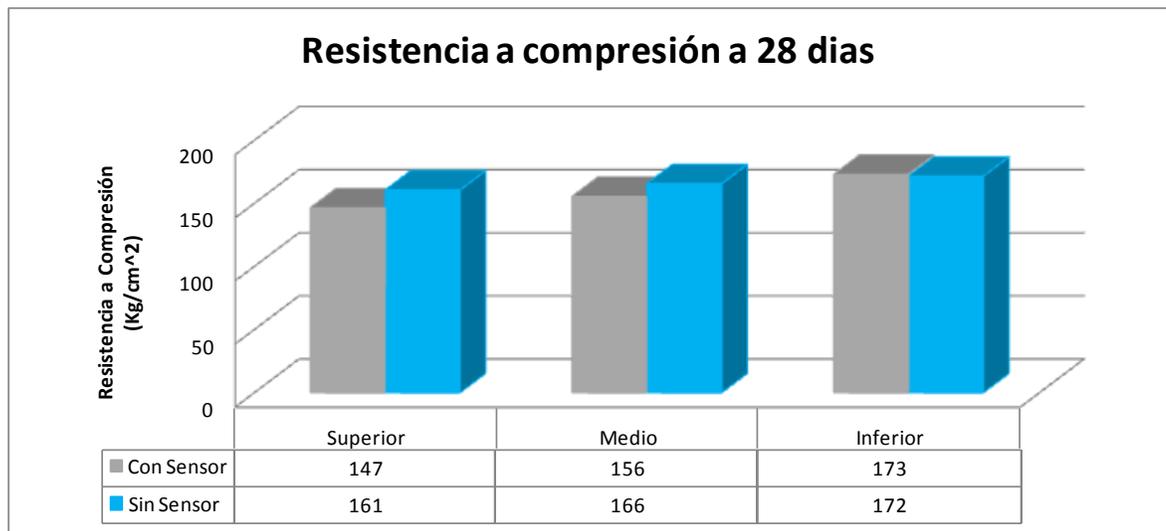


Figura 4.20 Gráfico que compara valores de resistencia a compresión registrados en la pared, cilindros y núcleos extraídos, en diferentes zonas para la edad de 28 días

De acuerdo al gráfico anterior, se puede decir que es la pared que no posee sensores la que mayores valores de resistencia presenta en cada una de las

posiciones y para cada posición es la zona inferior la que mayor resistencia presenta.

En el gráfico 4.21 se presentan los valores de resistencia a compresión a edad de 28 días obtenidos a partir de núcleos, método de madurez y cilindros curados en campo, siendo el primer caso el que refleja mayores valores de resistencia en las tres zonas en estudio.

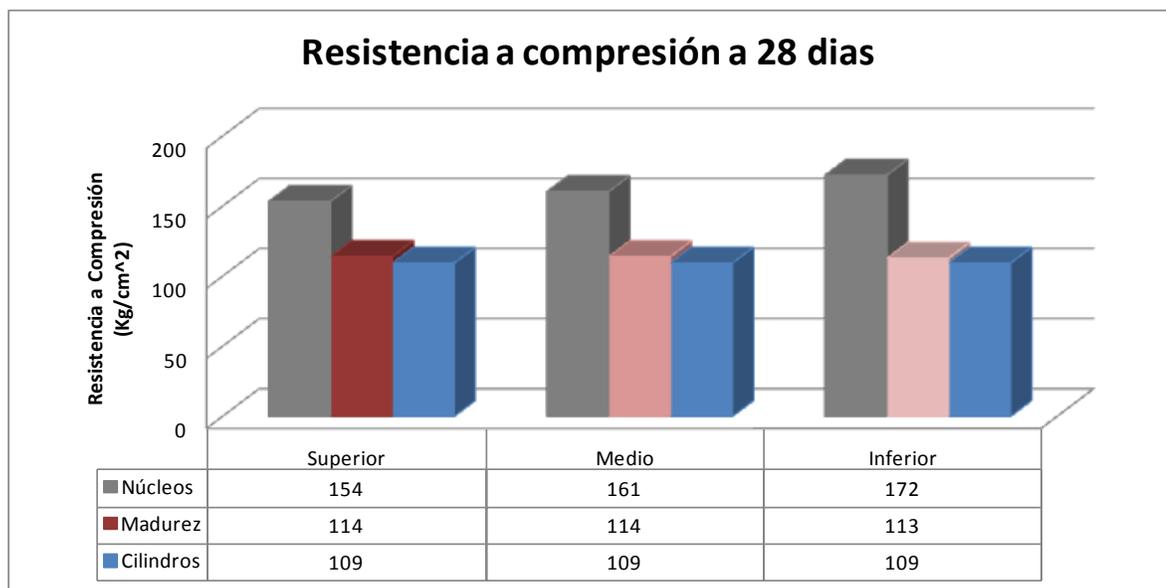


Figura 4.21 Gráfico que compara valores de resistencia a compresión registrados en la pared, cilindros y núcleos extraídos, en diferentes zonas para la edad de 28 días

De acuerdo al gráfico anterior podemos decir que los resultados de resistencia obtenidos de los núcleos presentan mayores resistencias para las tres zonas en estudio, con respecto a la resistencia obtenida por el método de madurez y cilindros curados en campo. También que los valores de resistencia por el método de madurez y cilindros curados en campo presentan valores bastante cercanos entre ellos.

Resultados obtenidos a partir de cilindros de concreto ensayados a compresión a la edad de 28 días reflejan la resistencia potencial que dicho concreto desarrollará, por lo tanto a partir de los resultados mostrados en el grafico anterior podemos decir que la resistencia obtenida por el método de madurez se encuentra aproximadamente bajo la misma premisa de desarrollo de resistencia de los cilindros, ahora, en cuanto a las resistencias obtenidas a partir de la extracción de núcleos podemos decir que estos si reflejan la verdadera resistencia de la estructura ya que es un ensayo que toma una muestra del cuerpo mismo de la estructura.

A partir de lo anterior podemos afirmar que los valores de resistencia estimados de acuerdo al método de madurez reflejan resultados del lado conservador de la resistencia real de la estructura.

#### **4.4.3 Esclerómetro**

Si bien es cierto que el ensayo de esclerómetro o número de rebotes no refleja un valor de resistencia a compresión, el conocer el comportamiento de los resultados que dicho ensayo refleja nos da una idea de la evolución de la rigidización en determinados sectores (zona superior e inferior) de la estructura, por lo tanto en la figura 4.22 se muestran las tendencias de resultados de número de rebotes obtenidos.

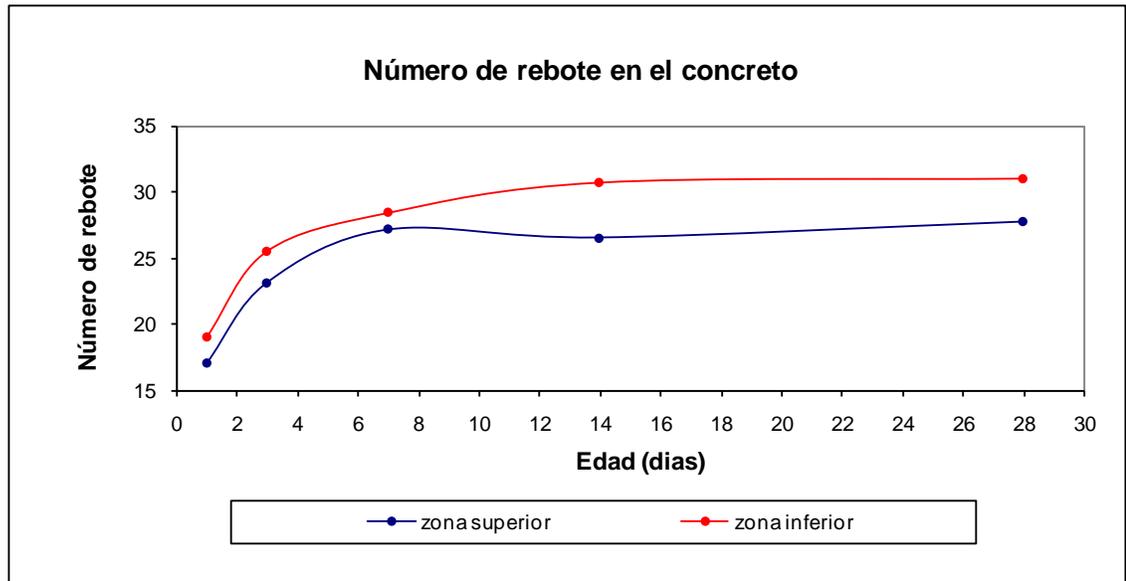


Figura 4.22 Gráfico de Tendencia de valores de número de rebote según la zona de ensayo en la pared.

En el gráfico 4.22 se observa que la tendencia de los ensayos en la zona inferior refleja mayor número de rebote para todas las edades comparadas con los ensayos en la zona superior; esto atribuido posiblemente a que en la zona inferior la columna de concreto que está sobre ella es mayor, que la columna que esta sobre la superior, generando esto una mayor consolidación del concreto situado en dicha zona.

#### **4.4.3.1 Determinación de la resistencia del concreto en base a la relación número de rebote – resistencia a compresión**

En base a los resultados de número de rebote y resistencia a compresión obtenidos en los cilindros curados en campo se determinará un modelo

matemático (grafico 4.23) para obtener la resistencia a compresión de la pared en base a los resultados de número de rebote obtenidos en la misma.

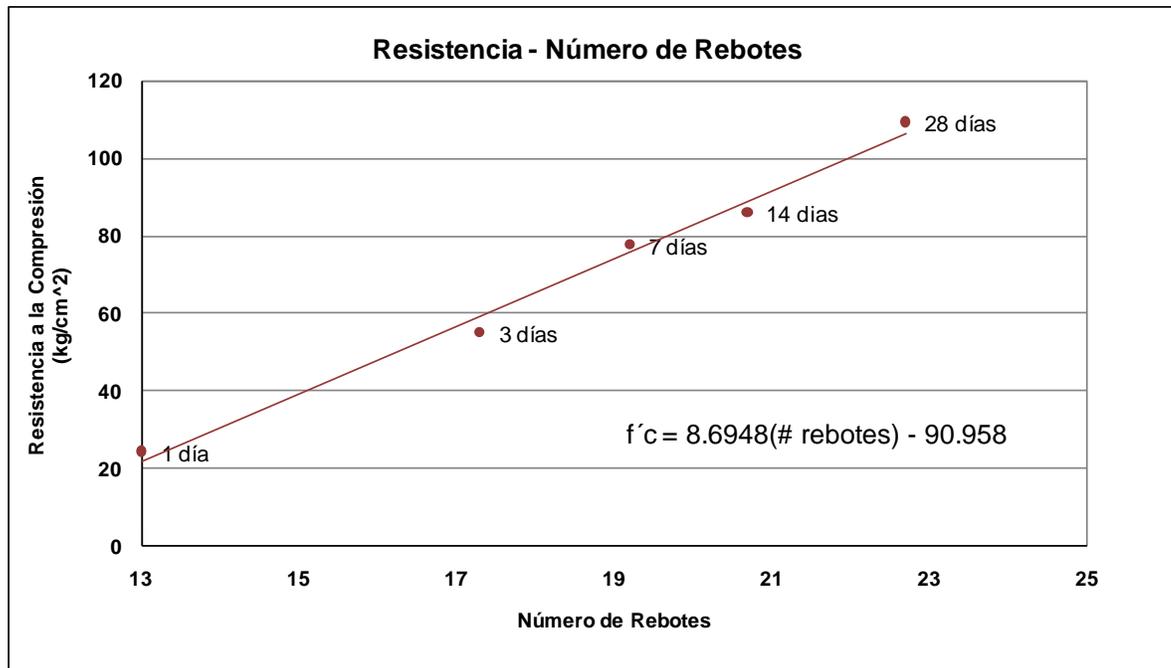


Figura 4.23 Gráfico para la determinación de la ecuación de relación de resistencia a compresión y numero de rebote

Una vez determinada el modelo matemático se calcula los valores de resistencia a compresión a través del número de rebote obtenido en la pared para las distintas zonas y edades (ver tabla 4.6).

Edad (días)	Rebotes		Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
1	17	19	57	74
3	23	26	110	131
7	27	28	145	156
14	27	31	139	176
28	28	31	150	179

Tabla 4.6 Valores de Resistencia a la compresión en la pared obtenidos a partir de rebotes realizados en la misma

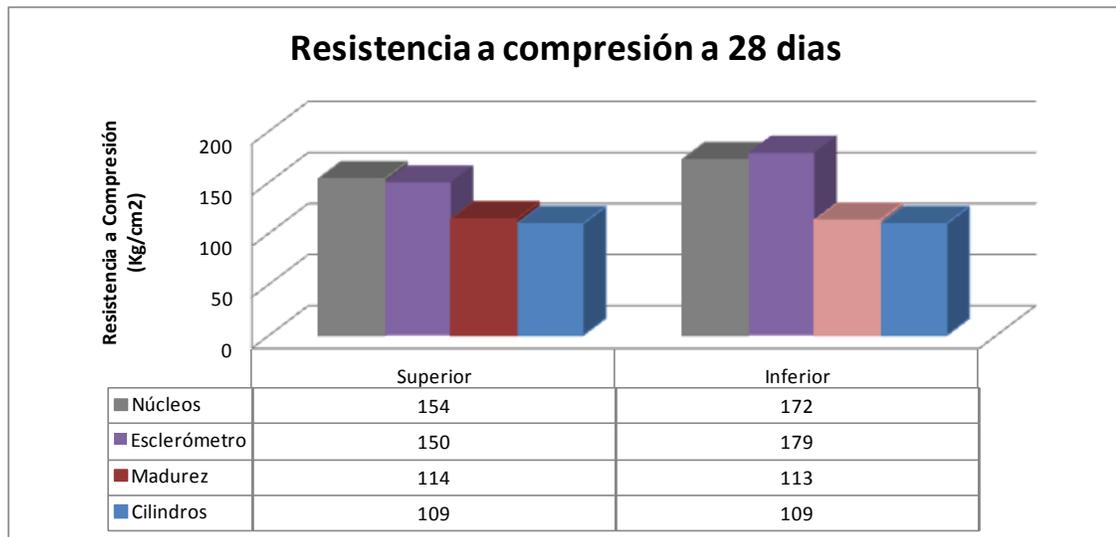


Figura 4.24 Comparación de valores de resistencia obtenidos en núcleos, esclerómetro, método de madurez y cilindros curados en campo a la edad de 28 días

En el gráfico 4.24 se observa que la resistencia obtenida a partir del modelo matemático de relación número de rebote – resistencia a compresión, refleja valores similares a las resistencias obtenidas de los núcleos ensayados, manteniendo siempre la misma tendencia según la posición para la edad de 28 días.

Podemos decir que la resistencia obtenida a partir del número de rebotes en la pared está en un rango mayor a las resistencias potenciales que reflejan los cilindros y por ende el método de madurez.

#### 4.4.4 Módulo de elasticidad dinámico

Los valores de módulos de elasticidad dinámico del concreto reflejan hasta cierto punto cómo evoluciona la resistencia a través del tiempo ya que dichos

resultados son directamente proporcionales a la velocidad a la que viaja el pulso, por lo tanto en un medio más denso estos tienden a ser mayores, a partir del gráfico siguiente (4.25) se puede observar que los valores de módulo son significativamente mayores en la parte inferior de la estructura, posiblemente debido a que esta zona está más confinada que la zona inferior debido a la columna de concreto que soporta.

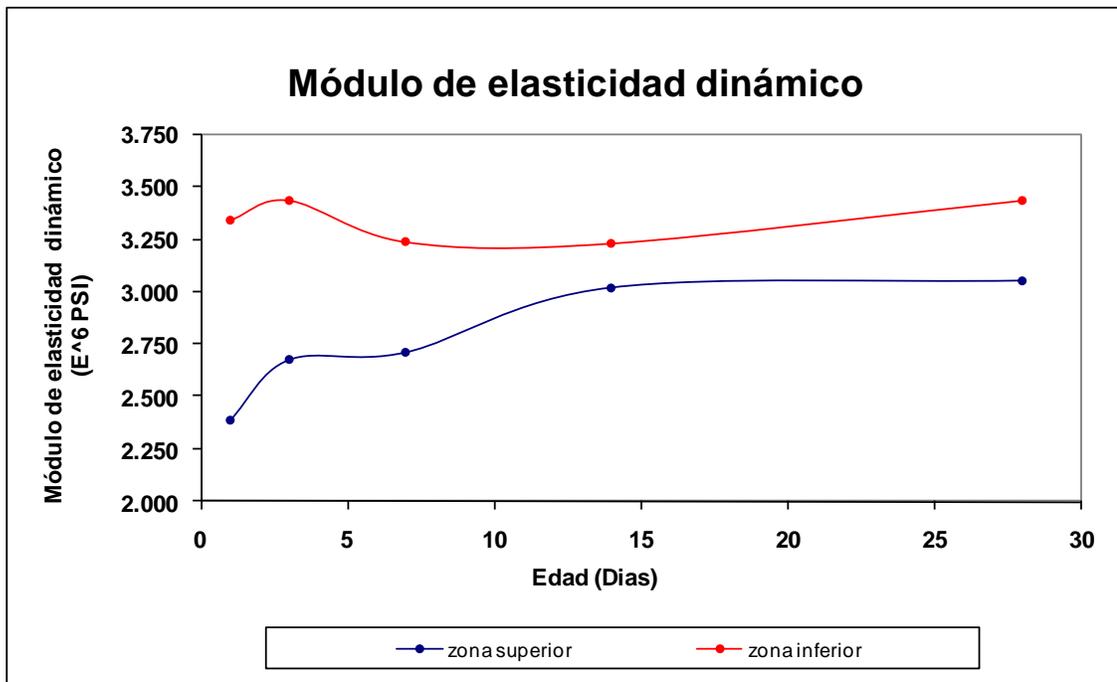


Figura 4.25 Gráfico de Tendencia de valores de módulos de elasticidad según la zona de ensayo en la pared.

En el gráfico 4.26 se hace una analogía del gráfico anterior, ya que se realiza el mismo análisis para los diferentes valores de módulos de elasticidad obtenidos en pared y núcleos extraídos.

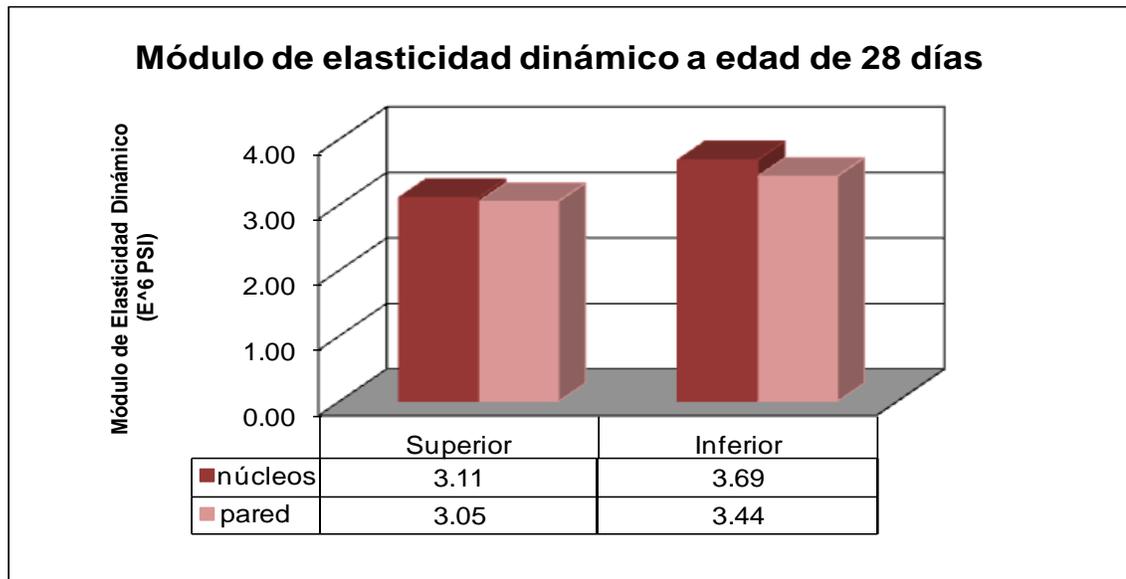


Figura 4.26 Gráfico que compara valores de módulos de elasticidad obtenidos en la pared y núcleos extraídos según la zonas de ensayo.

#### 4.4.5 Análisis de resistencia de la estructura al momento del desmoldado

Si bien es cierto que el método de madurez no reflejó resultados de resistencia a compresión al momento del desmoldado (4 horas de edad), no significa que la estructura a esa edad no haya ganado cierta rigidez, ya que a partir de los análisis anteriores el concreto al momento de realizar dicha actividad se encuentra en la fase del fraguado, por lo tanto la rigidización está en curso.

Analizando este fenómeno a partir del desarrollo de resistencia del concreto a edades tempranas se puede decir que el concreto a dicha edad ya pasó de su estado líquido a sólido, el cual se da después del fraguado inicial, produciendo tal estado cero presiones laterales, disminuyendo así las posibilidades de

deformación y que si bien es cierto no es capaz de presentar resistencia mecánica su pasta presenta resistencia a la penetración, la cual se hace evidente por medio del ensayo para la determinación de tiempos de fraguado (ver gráfico 4.19), que presenta un valor de 975 PSI (68.55 Kg/cm<sup>2</sup>) en promedio, en el momento del retiro de los moldes.

A partir de lo anterior y en base al estudio y aplicación del método de madurez se puede decir que la estructura si refleja un desarrollo de madurez al momento del desmoldado (ver Tabla 4.4) lo cual significa que una evolución de resistencia se está desarrollando en el interior de la estructura.

# CAPITULO V

## 5 Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

- De acuerdo a los fundamentos teóricos del concreto en estado fresco, podemos afirmar que de los materiales constituyentes el único que influye de manera directa y natural en la generación de calor es el cemento, debido al proceso de hidratación. Los valores máximos de temperatura obtenidos durante las primeras 12 horas fueron de 37.5°C en la zona del sensor medio, 34.5 y 34.0°C en las zonas superior e inferior respectivamente; estos valores sucedieron a la edad de 4 horas.
- La relación de resistencia madurez determinada en la etapa de calibración de la mezcla de concreto es: **Resistencia (Kpa) = 2916.9 ln (Madurez °C\*hora) – 17027**, la cual únicamente será válida para el diseño de mezcla utilizado, siempre y cuando se mantengan sin variar las condiciones y características de los componentes del concreto.
- A partir de los resultados del ensayo de tiempos de fraguado se obtuvo que: el fraguado inicial ocurrió a las 3 horas con 33 minutos y el fraguado final a las 5 horas con 23 minutos, de acuerdo a curvas teóricas de los estados del concreto y a los resultados de tiempos de fraguado, se identificaron dos fases de mayor importancia para la investigación debido al periodo en estudio (edades tempranas), las cuales son:

- a) fase del concreto blando: esta se dio desde las 0 horas con una madurez promedio de los tres sensores de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hora}$  hasta el momento del fraguado inicial con una madurez promedio de los tres sensores de  $118\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hora}$ .
- b) fase del concreto rígido: esta se dio desde el fraguado inicial con una madurez de  $118\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hora}$  hasta el momento del fraguado final con una madurez promedio de los tres sensores de  $180.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hora}$ .
- En nuestro país el retiro de moldes en el sistema de viviendas de concreto coladas en el sitio se realiza en un tiempo aproximado de 4 horas, que puede variar en más o menos 1 hora, según condiciones ambientales. Esta técnica se basa en la experiencia y juicio del constructor que pese a no tener fundamento teórico-científico ha resultado satisfactorio, ya que al realizar el desmoldado en el sistema en estudio no presentó daños aparentes como: fisuras, grietas, asentamientos ni desplomes.
  - Al momento del desmoldado el concreto se encuentra dentro de la etapa de rigidización, de acuerdo a resultados del ensayo de tiempos de fraguado, reflejando para los tres sensores una madurez promedio de:  $136\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hora}$  con valores de resistencia igual a cero.
  - De acuerdo a los resultados obtenidos por el método de madurez, el concreto al momento del desmoldado no refleja resistencia mecánica debido a la etapa en que se encuentra (rigidización); como

consecuencia, el retiro de moldes en el sistema de viviendas de concreto coladas en el sitio, no deberá regirse por la resistencia que la estructura haya desarrollado, sino por el grado de madurez que permita que el molde sea removido sin que sufra daños.

- La aplicación del método de madurez en el sistema de viviendas de concreto coladas en el sitio se vuelve idónea, ya que no existe otro tipo de ensayo que cuantifique el estado real del concreto en la estructura al momento del desmoldado.
- En base a la investigación realizada, podemos afirmar que el método de madurez puede ser aplicado con mucha confiabilidad en viviendas de dos niveles, edificaciones, puentes, pavimentos, etc. Estas obras pueden ser prefabricadas o coladas en el sitio.
- De acuerdo a los valores obtenidos por el método de madurez a la edad de 28 días se observa que las diferencias no son considerables debido a la altura misma de la pared en estudio y por la influencia de las condiciones ambientales. Los valores de resistencia a la compresión obtenidos son: para el sensor superior ubicado a un metro de altura respecto a la base de la pared fue de  $114 \text{ kg/cm}^2$ , el sensor que se colocó al centro de la pared registró un valor de  $114 \text{ kg/cm}^2$  y finalmente el sensor inferior situado a 0.2 m de altura respecto a la base de la pared reflejó  $113 \text{ kg/cm}^2$ .

- Los resultados resistencia obtenidos por medio de ensayos destructivos y no destructivos en la estructura evolucionan de manera distinta según la zona que se analice, específicamente se observó que:
  - a) Para el ensayo de número de rebote los valores de resistencia variaron de  $150 \text{ Kg/cm}^2$  en la zona superior hasta  $179 \text{ Kg/cm}^2$  en la zona inferior.
  - b) Para el ensayo de núcleos los valores de resistencia variaron de  $154 \text{ Kg/cm}^2$  en la zona superior hasta  $172 \text{ Kg/cm}^2$  en la zona inferior.

De lo anterior podemos observar que para el ensayo de esclerómetro los resultados de resistencia de la zona inferior son mayores en un 16% con respecto a la zona superior y para núcleos los valores de resistencia en la zona inferior son 10% mayor a los de la zona superior.

- En cuanto a los resultados de módulos de elasticidad dinámico los valores reflejan el mismo comportamiento que el de la resistencia, con una diferencia del 11% del inferior con respecto al superior.
- En una vivienda es importante considerar las distintas zonas de la estructura, pero de manera particular en la zona superior, debido a que es la más susceptible al lento desarrollo de la resistencia mecánica.
- Especímenes de concreto ensayados a compresión a la edad de 28 días corresponden a la resistencia potencial que el concreto puede desarrollar y no a la real de la estructura, a partir de ello podemos decir, que la

resistencia obtenida por el método es potencial, ya que los valores de resistencia registrados por el método de madurez varían en un 5% con respecto a los obtenidos de cilindros curados en campo y en un 30% con respecto a la obtenida por medio de núcleos y número de rebote. A partir de ello se concluye que el Método de Madurez refleja valores de resistencia conservadores que le dan confiabilidad al método.

- De manera particular para esta investigación se puede concluir que el momento óptimo para realizar el desmoldado en el sistema de paredes de concreto coladas en el sitio será aquel, en el cual el concreto presente un valor de madurez que este dentro del rango de 118 – 180.3 °C\*hora, correspondiente a la etapa del fraguado inicial y final del concreto

## **5.2 Recomendaciones**

- Debido a que el componente que genera más calor en el concreto es el cemento, por su reacción exotérmica en el proceso de hidratación, se sugiere controlar los cambios bruscos de temperatura productos del ambiente, ya que estos podrían generar contracciones plásticas generando agrietamientos excesivos, que si bien es cierto no ocasionan daños estructurales, si pueden producir daños estéticos.
- Para el buen desarrollo de la aplicación del método de madurez se debe contar con un diseño de mezcla numéricamente claro, con la finalidad de

reducir las variaciones de las propiedades de la mezcla en el proyecto y laboratorio.

- Por la importancia que representa el Datum de temperatura en la ecuación de madurez se recomienda en futuras investigaciones determinar su valor para el tipo de cemento utilizado, de esta manera se podrá aplicar el método y estimar la resistencia del concreto con mayor precisión.
- Es necesario conocer los tiempos de fraguado del concreto para la determinación del periodo de rigidización de la mezcla, por ello se recomienda instrumentar con sensores un espécimen destinado para tal ensayo, a fin de poder generar una relación de resistencia a la penetración versus madurez; con la aplicación de dicha relación se puede realizar el retiro de los moldes a partir de datos cuantitativos del estado del concreto.
- Se recomienda aplicar el método de madurez en el sistema de viviendas de concreto coladas en el sitio en combinación con el ensayo de tiempos de fraguado, para definir el estado en el que se encuentra el concreto y posterior retiro de moldes
- Se debe recordar que el concreto en el momento del desenmoldado se encuentra en la etapa de rigidización, por lo tanto la resistencia mecánica desarrollada es nula, debido a esto se recomienda no someter a ningún tipo de esfuerzo la estructura.

- Para conocer la madurez en distintos momentos de desenmoldado, se recomienda la instrumentalización con sensores en modelos del sistema acompañado de ensayos de tiempos de fraguado, a fin de conocer el valor de madurez para el cual, dicha actividad se pueda realizar en el menor tiempo posible sin que la estructura sufra daños, en la etapa de rigidización.
- Debido a que no existen metodologías que rigen la instrumentalización con sensores para la aplicación del método de Madurez, en el sistema de viviendas de concreto coladas en el sitio, se debe realizar a partir de criterios que proporcionen nociones para determinar las zonas de la estructura vulnerables al lento desarrollo de resistencia, atribuidas a exposición del ambiente, finalización de colado e influencia del volumen de concreto en los sensores.
- A manera de introducir a los estudiantes del área de ingeniería civil a las nuevas tecnología del concreto, se recomienda incluir en los programas de estudio, la determinación de la resistencia del concreto por el método de madurez como parte de los ensayos de control de calidad del mismo.
- Que esta investigación sea el inicio para la aplicación del método de madurez en el campo de la tecnología del concreto, ya que, en nuestra región no se cuenta con registros de la utilización del mismo a pesar que en otros países el método lleva más de 50 años de estudio, brindando hasta el día de hoy buenos resultados.

# **BIBLIOGRAFIA**

## **LIBROS TEXTOS**

- Comisión Federal de Electricidad (1994), "Manual de tecnología del concreto". México. UNAM, Sección 2.
- Allyn Luke C.T. Thomas Hsu Sun Punurai (December 2002). "IMPLEMENTATION OF CONCRETE MATURITY METERS". Institute of Technology Civil & Environmental Engineering. New Jersey
- Irtishad ahmad. "Utilization of maturity meters for concrete quality assurance department of transportation(FDOT)"
- N.J. Carino. H.S. Lew. THE MATURITY METHOD: FROM THEORY TO APPLICATION. Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD 20899-8611 USA

## **TESIS**

- Glenda Xiomara Campos Hernández; Jorge Antonio Castaneda Cerón; César Gonzalo Vega Rodríguez (2006). "Evaluación de la factibilidad del uso de la resistencia del concreto elaborado con cemento de mampostería ASTM C-91 Tipo M, en la construcción de viviendas coladas in-situ". Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Civil. San Salvador, El Salvador.

## REVISTAS Y PUBLICACIONES

- ACI (1973) "Manual of Concrete Practice, Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete", American Concrete Institute (ACI 211.1).
- ASTM Designation C 1074 "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method". Philadelphia, Pa. (2004). American Society for Testing and Materials.
- José Daniel Damazo Juarez (Mayo 2006), "Las estructuras no son eternas" IMCYC, 1998
- Povindar Kumar, Monteiro, Paulo J.M. "Estructura Propiedades y materiales" IMCYC, 1998.
- "Vivienda de concreto" (septiembre 2007) Revista del ISCYC, Año 12 numero 46
- Paul M. Goodrum, Jiukun Dai (Junio 2004), "The Use of the Concrete Maturity Method In the Construction of Industrial Facilities: A Case Study", University of Kentucky

## PÁGINAS ELECTRÓNICAS

- [www.maturitycentral.com/index.php?q=node/28](http://www.maturitycentral.com/index.php?q=node/28)
- [www.arqhys.com/hidratacion-concreto.html](http://www.arqhys.com/hidratacion-concreto.html)

- [www.asocem.org.pe/SCMRoot/Una%20nueva%20norma%20ASTM actualidad%20internacional.pdf](http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/Una%20nueva%20norma%20ASTM%20actualidad%20internacional.pdf)
- [www.thetranstecgroup.com/](http://www.thetranstecgroup.com/)

# GLOSARIO

**AGREGADO FINO:** son arenas naturales o manufacturadas, con tamaños de partículas pasantes de la malla N° 4 (4.75mm) y retenidas en la malla N° 100 (150  $\mu$ m).

**AGREGADO GRUESO:** Son materiales, cuyas partículas se retienen en la malla N° 16 (1.18 mm) y pueden variar hasta 152 mm.

**MEZCLADO:** Es la incorporación de los componentes del concreto hasta el grado en que las reacciones entre sí se completen; esta puede llevarse a cabo mediante medios manuales o mecánicos.

**HIDRATACION:** Calor desarrollado por reacciones químicas de una sustancia con el agua tal como el desarrollo durante el fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland.

**REACCION EXOTERMICA:** Se denomina reacción exotérmica a cualquier reacción química que desprende calor, tal como ocurre con el cemento cuando entra en contacto con el agua.

**RELACIÓN AGUA/CEMENTO (A/C):** La razón de la cantidad de agua en peso, excluyendo aquella que absorben los agregados, a la cantidad en peso de cemento.

**BACHADA:** Cantidad de materiales mezclados, que se producen en cada ciclo en una revolvedora o planta mezcladora.

**COLADO:** Es la actividad de colocar el concreto en las cimbras o encofrados.

**ASENTAMIENTOS EN ESTRUCTURAS RECIEN COLADAS:** Deformación del concreto, al retirar los moldes a temprana edad, producido por su propio peso o por el exceso de agua de la mezcla.

**CONTRACCIÓN:** Aumento o disminución del volumen de concreto, provocando cambios en la forma y tamaño del elemento, por efecto de variaciones térmicas, cambios de humedad o por el efecto del agregado o aditivos utilizados.

**CONSISTENCIA DEL CONCRETO:** Es una medida de la trabajabilidad referida a la movilidad y la compactación del concreto, en términos de la apariencia que exhibe al ser manipulada y expresada de acuerdo resultados de prueba de revenimiento.

**ESTABILIDAD:** Es la medida que el concreto opone a perder su homogeneidad original en el lapso comprendido desde que abandona la mezcladora hasta que adquiere el fraguado en su posición final.

**CONCRETO FRESCO:** Mezcla de concreto recién elaborada, la cual es una masa plástica que puede ser moldeada con relativa facilidad, y que a temperatura normal permanece en ese estado durante pocas horas. Inicia desde que el concreto está recién mezclado, hasta el fraguado inicial.

**EXUDACION:** Forma particular de segregación, donde el agua tiende a migrar a la superficie y crea una capa delgada, débil y porosa sin resistencia y deficiente durabilidad.

**RIGIDIZACION DEL CONCRETO:** Etapa del concreto en la cual ya no puede ser moldeado o re-compactado sin riesgo de causarle daño permanente, pero admite la ejecución de ciertas operaciones superficiales relacionadas con la obtención del acabado requerido, esta condición se da en el lapso de tiempo del fraguado inicial y final.

**SANGRADO:** Es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos.

**SEGREGACIÓN:** La separación involuntaria de los constituyentes del concreto o las partículas de agregado, provocando una falta de uniformidad en su distribución.

**VIBRADO:** Es el método comúnmente utilizado para consolidar el concreto, el cual crea con la vibración una destrucción temporal de la fricción interna entre las partículas de agregado, y el concreto se comporta como líquido, este proceso es utilizado para que los vacíos grandes de aire suban a la superficie.

**CONCRETO ENDURECIDO:** El concreto se encuentra en este estado cuando propiamente comienza la formación del tejido filamentoso producto de la hidratación, o gel de cemento, que endurece la pasta y que a su vez la capacita para aglutinar las partículas de los agregados, dándole resistencia mecánica a la masa del concreto, iniciando esta condición posterior al fraguado final.

**CURADO:** Procedimiento para mantener el concreto en condiciones de humedad y temperatura satisfactorias para la hidratación del cemento durante un período definido, que inicia inmediatamente después de la colocación y acabado del concreto.

**ESPESOR DE CONCRETO:** Es la dimensión mas pequeña de una estructura de concreto.

**CRIBADO DEL CONCRETO:** Actividad que consiste en separar el concreto en base al tamaño de las partículas que lo conforman o únicamente eliminar un cierto tamaño de agregado.

**DESENCOFRADO:** Acción y efecto de retirar en una obra los moldes que dan la forma del elemento una vez ha fraguado concreto.

**ENCOFRADO:** Son las cimbras que se utilizan para moldear el concreto y darle la forma especificada en el diseño de la estructura.

**NUMERO DE REBOTE:** Resultado final del ensayo en una estructura de concreto, medidos por medio del martillo Schmidt, el cual nos da un indicativo de la homogeneidad del mismo.

**ESCLEROMETRO:** Es el aparato que se utiliza para realizar el ensayo de numero de rebote el concreto, el cual es conocido también como martillo Schmidt.

**DATUM DE TEMPERATURA:** Es la temperatura bajo la cual el concreto deja de ganar resistencia.

**ENERGIA DE ACTIVACION:** Es la energía necesaria para que se de la reacción entre el cemento y el agua el cual es medida por medio de ensayos a compresión y tiempos de fraguado los cuales son curados bajo ciertas temperaturas.

**FACTOR TEMPERATURA TIEMPO:** Es la madurez calculada para un  $\Delta t$  de tiempo, el cual es acumulado con los obtenidos a las edades anteriores para conocer la madurez del concreto a esa edad.

**FRAGUADO DEL CONCRETO:** Es la condición del concreto alcanzada cuando ha perdido la plasticidad en un grado arbitrario, esta condición es medida en términos de resistencia a la penetración o deformación.

**INSTRUMENTALIZACION DEL CONCRETO:** Acción de colocar sensores en una estructura de concreto.

**MADUREZ:** Es el grado del desarrollo de una propiedad o característica de una mezcla cementante.

**NUCLEO:** Espécimen extraído de un elemento de concreto, con el fin de conocer la resistencia a compresión o flexión de la estructura.

**PULSO ULTRASONICO:** Es la determinación de la velocidad de propagación de pulsos de ondas en el concreto, útiles para conocer el modulo de elasticidad dinámico del mismo.

**RESISTENCIA POTENCIAL:** Es la resistencia obtenida por medio de cilindros curados en condiciones estándar a los 28 días.

**RELACION RESISTENCIA – MADUREZ:** Relación matemática obtenida entre la resistencia a la compresión y el índice de madurez del concreto.

# ANEXOS

## **Anexo A. ASTM Designación: C 1074 - 98**

### **Práctica Estándar para**

# **Estimación de la Resistencia del Concreto por el Método de Madurez.**

## **1. Alcance**

- 1.1. Esta práctica proporciona un procedimiento para estimar la resistencia del concreto por medio del método de madurez. El índice de madurez es expresado en términos del factor temperatura-tiempo o en términos de la edad equivalente a una temperatura especificada.
- 1.2. Esta práctica requiere determinar la relación resistencia-madurez de la mezcla de concreto en laboratorio y conocer el historial de temperatura interna del concreto para el cual la resistencia es estimada.
- 1.3. Las unidades consideradas para esta norma serán las del Sistema Internacional (SI).
- 1.4. Esta norma no pretende señalar problemas de seguridad, si los hubiera, asociado a su aplicación. Será responsabilidad del usuario de esta norma establecer la seguridad apropiada y practicas saludables, así como determinar la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras antes de su uso. **Advertencia** - Las mezclas frescas de cemento hidráulico son causticas y pueden causar quemaduras químicas a la piel y tejidos sobre exposición prolongada.

## **2. Documentos de Referencia (Estándares ASTM):**

- C 39 Método de Ensayo para Resistencia a Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto.
- C 78 Método de Ensayo para Resistencia a Flexión del Concreto (Usando Viga Simple con Carga al Tercio)
- C109 Método de Ensayo para Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Usando Especímenes Cúbicos de 2 pulgadas o 50 mm).
- C192 Práctica para la Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo, en el Laboratorio.
- C403 Método de Ensayo para Tiempo de Fraguado de Mezclas de Concreto Mediante Resistencia a la Penetración.
- C511 Especificación para Gabinetes de Humedad, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento de Agua Usados en el Ensayo de Cementos y Concreto.
- C684 Método de Ensayo para Elaboración, Curado Acelerado y Ensayo de Especímenes de Concreto a Compresión.

- C803 Método de Ensayo para Resistencia a la Penetración del Concreto Endurecido.
- C873 Método de Ensayo para Resistencia a Compresión de Cilindros de Concreto Colados en el Lugar, en Moldes Cilíndricos.
- C900 Método de Ensayo para Resistencia a la Extracción de Concreto Endurecido.
- C918 Método de Ensayo para Medición de Resistencia a Compresión a Edad Temprana y Proyección de la Resistencia a Edades Posteriores

### 3. Terminología

#### 3.1 Definición de Términos Específicos a este Estándar

3.1.1 *temperatura de referencia* — la temperatura que es restada de la temperatura medida en el concreto mediante el cálculo del factor temperatura - tiempo, de acuerdo a la Ecuación 1.

3.1.2 *edad equivalente* — el número de días u horas a una temperatura especificada requerida para producir una madurez igual a la madurez obtenida mediante un periodo de curado a temperaturas diferentes de la temperatura especificada.

3.1.3 *madurez* — la extensión del desarrollo de una propiedad en una mezcla de cemento.

3.1.3.1 *Discusión* — Aunque el término es usado usualmente para describir la extensión del desarrollo de resistencia relativa, esto también puede ser aplicado a la evolución de otras propiedades que son dependientes de las reacciones químicas que ocurren en una mezcla cementante. A cualquier edad, la madurez es dependiente de la historia de curado.

3.1.4 *función de madurez* — una expresión matemática que usa la historia de la temperatura medida de una mezcla cementante durante el periodo de curado para calcular un índice que es indicativo de la madurez al final de ese periodo. Refiérase al Apéndice X1 para discusión adicional de este término.

3.1.5 *índice de madurez* — un indicador de madurez que es calculado de la historia de temperatura de la mezcla cementante, mediante el uso de una función de madurez

3.1.5.1 *Discusión* — El índice calculado es indicativo de la madurez proporcionada y ha sido suministrada suficiente agua para hidratación o reacción puzolánica de los materiales cementantes durante el tiempo usado en los cálculos. Dos índices de madurez ampliamente usados son el factor temperatura- tiempo y la edad equivalente.

3.1.6. *método de madurez* — una técnica para estimar la resistencia del concreto que está basada en la asunción que la madurez de una mezcla de concreto dada alcanza igual resistencia si ellas alcanzan iguales valores de índice de madurez.

3.1.7 *relación resistencia — madurez* — una relación empírica entre la

resistencia a compresión y el índice de madurez que es obtenido por ensayos de especímenes cuya historia de temperatura por encima del tiempo de ensayo ha sido registrado.

3.1.8 *factor temperatura- tiempo* — el índice de madurez calculado de acuerdo a la Ecuación 1.

#### 4. Resumen de la práctica

4.1 Se desarrolla la relación resistencia-madurez mediante ensayos de laboratorio en la mezcla de concreto a ser usada.

4.2 El historial de temperatura del concreto en campo, para el cual la resistencia quiere ser estimada, es registrada desde el tiempo de colocación del concreto hasta el momento que se desee estimar la resistencia.

4.3 El historial de temperatura registrada es usada para calcular el índice de madurez del concreto de campo.

4.4 Usando el índice de madurez calculado y la relación resistencia-madurez, la resistencia del concreto de campo es estimada.

#### 5. Significado y Uso.

5.1 Esta práctica puede ser usada para estimar la resistencia del concreto en el lugar para permitir el inicio de actividades críticas en la construcción, tales como: 1) remoción del encofrado y reapuntalamiento; 2) postensionado de acero de refuerzo 3) terminación de la protección del concreto en clima frío; 4) apertura de carretera, al tráfico.

5.2 Esta práctica puede ser usada para estimar la resistencia de los especímenes de laboratorio curados bajo condiciones de temperatura no controlada.

5.3 Las mayores limitaciones del método de madurez son: 1) el concreto debe ser mantenido en una condición que permita la hidratación del cemento; 2) el método no toma en cuenta los efectos de temperatura del concreto a edades tempranas en la resistencia última a largo plazo; 3) el método necesita ser suplementado por otros indicadores de la resistencia potencial de la mezcla de concreto.

5.4 La precisión de la resistencia estimada depende de la determinación apropiada de la función de madurez para la mezcla de concreto particular.

#### 6. Funciones de Madurez

6.1 Hay dos funciones alternativas para calcular el índice de madurez mediante el historial de temperatura medida en el concreto.

6.2 Para calcular el factor temperatura-tiempo se utiliza la función de madurez que se muestra a continuación:

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

Donde:

$M(t)$  = factor temperatura-tiempo a la edad  $t$  (grados-día, grados-hora)

$\Delta t$  = un intervalo de tiempo, días, horas

$T_a$  = temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , ° C

$T_o$  = temperatura de referencia, ° C

6.3 La otra función de madurez es usada para calcular la edad equivalente a una temperatura especificada como sigue:

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

Donde:

$t_e$  = edad equivalente a una temperatura especificada  $T_s$

$Q$  = energía activada dividida por la constante del gas, K

$T_a$  = temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , K

$T_s$  = temperatura especificada, K

$\Delta t$  = intervalo de tiempo, días u horas.

Nota 1- La temperatura en grados kelvin (K) es aproximadamente igual a la temperatura en °C+273°C.

6.4 Valores aproximados de la temperatura de referencia,  $T_o$ , y la activación de la energía dividida por la constante del gas,  $Q$ , son dados en el Apéndice X1. Los valores apropiados de  $T_o$  y  $Q$ , para una mezcla de concreto específica, puede ser determinada de acuerdo a los procedimientos dados en el Anexo A1.

## 7. Aparatos

7.1 Se requiere un dispositivo para monitorear y registrar la temperatura interna del concreto como una función del tiempo. Los dispositivos aceptados incluyen termocuplas o termistores conectados a un colector (strip-chart) o dispositivos digitales embebidos que midan la temperatura y registren y almacenen la información. El intervalo de tiempo registrado será ½ h o menos para las primeras 48 h y 1h o menos para después. El dispositivo que registre la temperatura debe ser preciso dentro de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

7.2 Dispositivos alternativos incluyen instrumentos de madurez comerciales, que automáticamente calcula y muestra en la pantalla el factor temperatura-tiempo o la edad equivalente.

Nota 2. — Los instrumentos de madurez comerciales usan valores específicos de temperatura de referencia o energía de activación en la evaluación del índice de madurez entonces, el índice de madurez mostrado puede no ser indicativo del valor real para la mezcla de concreto utilizada. Refiérase al Apéndice X1 para información sobre correcciones de los valores mostrados.

## 8. Procedimiento para Desarrollar la Relación Resistencia – Madurez

8.1 Prepare al menos 15 especímenes cilíndricos de acuerdo a la Práctica C192/C192M. Las porciones de la mezcla y constituyentes del concreto deben ser similares a aquellos del concreto cuya resistencia se desea estimar usando esta norma. Si dos revolturas son necesarias para preparar el número necesario de cilindros, cuele un número igual de cilindros de cada revoltura, y ensaye un cilindro de cada revoltura a la edad de ensayo dada en 8.4.

8.2 El sensor de temperatura embebido dentro de  $\pm 15$  mm de los centros de al menos dos especímenes. Conecte inmediatamente los sensores al instrumento de madurez o a los dispositivos registradores de temperatura tales como data-loggers o strip-chart.

Nota 3. — Un método para auxiliar en la posición propia del sensor es insertar una barra rígida de diámetro pequeño en el centro del cilindro hecho recientemente. La barra será empujada a un lado de cualquier partícula de agregado que interfiera. La barra es removida y el sensor insertado dentro del cilindro. El lado del molde cilíndrico debe ser golpeado con un martillo de hule o la varilla de acero para asegurar que el concreto está en contacto con el sensor.

8.3 Los especímenes serán curados húmedos en un baño de agua o en un cuarto húmedo reuniendo los requisitos de la especificación C 511.

8.4 A menos que se especifique de otra manera, efectúe ensayos de compresión a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, de acuerdo con el método de ensayo C39/C39M. Ensaye dos especímenes en cada edad y calcule la resistencia promedio. Si el rango de la resistencia a compresión de los dos especímenes excede 10% de su resistencia promedio, ensaye otro cilindro y calcule el promedio de los tres ensayos. Si el resultado de un ensayo bajo es debido a un defecto obvio del espécimen, descarte el resultado del ensayo bajo.

Nota 4 — Para mezclas de concreto con desarrollo rápido de resistencia o cuando los esfuerzos estimados son hechos a valores bajos del índice de madurez, los ensayos deben iniciar tan pronto como sea practicable. Subsecuentes ensayos deben ser programados para resultados con incrementos aproximadamente iguales de resistencia ganada entre edades de ensayo. Al menos cinco edades de ensayo deben ser usadas.

8.5 En cada edad de ensayo, registre el índice de madurez para los especímenes instrumentados.

8.5.1 Si se utiliza más de un instrumentos para determinar madurez son utilizados, registre el promedio de los valores mostrados en la pantalla.

8.5.2 Si se utiliza un registrador de temperatura, evalúe la madurez de acuerdo con la Ecuación 1 ó 2. A menos que se especifique de otra manera, use un intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) de  $\frac{1}{2}$  h o menos para las primeras 48 h del registro de temperatura. Intervalos de tiempo más largos pueden ser usados para la porción relativamente constante del subsecuente registro de temperatura.

Nota 5. — Se deberá seleccionar el intervalo de tiempo inicial para registrar la temperatura en mezclas que tienen cambios rápidos en temperaturas a edad temprana debido a la hidratación rápida. El Apéndice X2 da un ejemplo de cómo evaluar el factor temperatura-tiempo o edad equivalente a partir de la historia de temperatura registrada del concreto.

8.6 En papel para graficar plotee la resistencia a la compresión promedio como una función del valor promedio del índice de madurez. Trace la mejor tendencia a través de los datos. La curva resultante es la relación resistencia-madurez a ser usada para estimar la resistencia de la mezcla de concreto curada bajo otras condiciones de temperatura. La Fig. 1 es un ejemplo de una relación entre la resistencia a la compresión y factor temperatura-tiempo, y la Fig. 2 es un ejemplo de una relación entre resistencia a la compresión y edad equivalente a 20°C.

Nota 6. — La relación resistencia-madurez también puede ser establecida usando un análisis de regresión para determinar una mejor ecuación de la información. Las ecuaciones posibles que han sido encontradas para ser adecuadas a este propósito pueden ser encontradas en la Ref. (3). Una ecuación popular es expresar el esfuerzo como una función lineal de del logaritmo del índice de madurez (ver Fig. 3).

8.7 Cuando sea especificado, se permitirá una relación entre esfuerzo a flexión vrs. índice de madurez. Prepare al menos 15 vigas de acuerdo con la Practica C 192/C 192M. Si dos revolturas son necesarias para preparar el número requerido de especímenes, cuele un número igual de vigas de cada revoltura las edades de ensayo dadas en 8.4. Introduzca los sensores de temperatura en dos especímenes, uno de cada revoltura si dos son hechas. Conecte los sensores al instrumento de madurez o dispositivos registradores de temperatura, y cure los especímenes en un baño de agua o en un cuarto húmedo reuniendo los requerimientos de la Especificación C 511. Mida el esfuerzo de flexión de acuerdo con el método de Ensayo C 78 a intervalos de tiempo de 1, 3, 7, 14 y 28 días o como sea especificado (Ver Nota 4). Ensaye dos especímenes de cada edad y calcule el esfuerzo promedio. Si el rango de esfuerzo a flexión de los dos especímenes excede 15% de su esfuerzo promedio, ensaye otra viga y calcule el promedio de las tres vigas. Si un resultado de ensayo es bajo es debido a un defecto obvio del espécimen, descarte el resultado bajo del ensayo. Use el mismo procedimiento como en 8.5 y 8.6 para desarrollar la relación esfuerzo de flexión- madurez.

## 9. Procedimiento para Estimar la Resistencia en el Lugar.

9.1 Introduzca los sensores de temperatura dentro del concreto fresco, tan pronto como sea posible después de la colocación del concreto.

Cuando use esta norma para decidir iniciar operaciones críticas de construcción, instale sensores en localizaciones de la estructura que sean críticas, en términos de condiciones de exposición y requerimiento estructurales.

Nota 7.- En la construcción de edificios, porciones expuestas de losas y conexiones losa- columna, son localizaciones típicamente críticas. El consejo del Ingeniero debe ser oportuno para las localizaciones críticas en la estructura particular bajo construcción.

9.2 Conecte los sensores al instrumento de madurez o dispositivos registradores de temperatura y active el dispositivo registrador tan pronto como sea practicable. Use el mismo valor de temperatura de referencia (datum) o activación de energía, cuando sea aplicable, como fue usado para calcular el índice de madurez durante el desarrollo de la relación esfuerzo-madurez. (Ver Sección 8).

9.3 Cuando la resistencia en la localización de un sensor es estimada, lea el valor del índice de madurez del instrumento de madurez o evalúe el índice de madurez desde el registro de temperatura.

9.4 Usando la relación resistencia- madurez desarrollada en la Sección 8, lea el valor de la resistencia a compresión (o flexión) correspondiente al índice de madurez medido.

9.5 Previo a ejecutar las operaciones críticas, tales como la remoción de formaletas o postensionado, determine complementariamente, la madurez del concreto con otros ensayos para asegurar que el concreto en la estructura tiene una resistencia potencial similar a aquella que tiene el concreto que se utilizo para desarrollar la relación resistencia-madurez. Técnicas apropiadas incluyen:

9.5.1 Ensayos en el lugar que dan indicaciones de resistencia, tales como el método de Ensayo C 803/C 803M, Método de Ensayo C 873, Método de ensayo C 900 o Método de Ensayo C 918.

9.5.2 Ensayos de resistencia a compresión a edad temprana de acuerdo con el Método de Ensayo C 918 de especímenes moldeados de curado estándar en muestras de concreto como fue entregado en la obra.

9.5.3 Ensayos de esfuerzo a compresión en especímenes moldeados con muestras de concreto como fue entregado y sujeto a curado acelerado de acuerdo con el Método de Ensayo C 684.

9.5.4 Ensayos a edad temprana de cilindros moldeados en el campo instrumentados con equipo de madurez. Los esfuerzos medidos son comparados con los esfuerzos estimados con la relación esfuerzo-madurez establecido. Si la diferencia consistentemente excede el 10%, una nueva relación esfuerzo madurez debe ser desarrollada.

## **10. Precision y Tendencia**

10.1 Esta práctica es usada para estimar la resistencia del concreto en el lugar, basado en la historia térmica medida en un punto de la estructura y una relación resistencia - madurez previamente establecida. La precisión de la resistencia estimada es dependiente de varios factores, tales como lo inapropiado de la función de madurez para la mezcla específica, el historial de temperatura a edad temprana y las proporciones actuales de la mezcla. Por esta razón no es posible escribir documentos acerca de la precisión y tendencia de la resistencia estimada.

## **11. Palabras Clave**

11.1 método de madurez, ensayo no destructivo, resistencia, temperatura.

### **ANEXO** (Información Mandatoria)

## **A1. Determinación de la temperatura de Referencia o activación de la Energía.**

### **A1.1 Procedimiento**

A.1.1.1 El ensayo requerido para determinar experimentalmente la temperatura de referencia o la activación de la energía, puede ser desarrollado usando especímenes de mortero y los resultados son aplicables al concreto bajo investigación (5,6,7). La aproximación básica es establecer la relación resistencia a la compresión contra la edad, para especímenes de mortero curados en baños de agua mantenidos a tres temperaturas diferentes. Dos baños deben ser a la temperatura máxima y mínima esperada para el concreto en el lugar durante el periodo cuando las resistencias van a ser estimadas. El tercer baño de temperatura debe ser la media entre los extremos. Dependiendo del procedimiento para el análisis de la información que sea usado, el tiempo de fraguado final del mortero a las tres temperaturas debe ser determinado.

A.1.1.2 Las proporciones de una mezcla de mortero teniendo una relación agregado fino/cemento (por masa), que es la misma que la relación agregado grueso/cemento de la mezcla de concreto bajo investigación (6). La pasta debe tener la misma relación agua/material cementante y la misma cantidad de aditivos que serán usadas en el concreto.

A.1.1.3 Si la información de resistencia será analizada usando el procedimiento de ploteo recíproco dado en A.1.1.7, el tiempo de fraguado final debe ser medido. Prepare tres especímenes de mortero usando los contenedores especificados en el Método de Ensayo C 403/C 403M. Cuidadosamente sumerja cada espécimen en su correspondiente baño de temperatura. Determine el tiempo de fraguado final para cada temperatura de acuerdo al Método de Ensayo C 403/C 403M. Los especímenes son extraídos del baño de agua y el exceso de agua es removido previo a efectuar la medida de penetración. Si la información será analizada usando procedimientos de regresión dado en A1.1.8, no es necesario medir los tiempos de fraguado.

A.1.1.4 Prepare tres juegos de cubos de mortero de 50 mm con 18 cubos por juego. Moldee los cubos de acuerdo con el Método de Ensayo C 109/C 109M y cuidadosamente sumerja cada juego en uno de los baños de temperatura. Para cada juego, remueva los moldes y regrese los especímenes

a sus respectivos baños, aproximadamente 1 h antes de la primera serie de ensayos a compresión.

A.1.1.5 Para cada juego de cubos, determine la resistencia a la compresión de tres cubos de acuerdo al Método de Ensayo C 109/C 109M, a una edad que es aproximadamente dos veces el tiempo de fraguado final. Si el tiempo de fraguado final no fue medido, efectúe el primer ensayo cuando la resistencia compresión es aproximadamente 4 MPa. Efectúe subsecuentes ensayos en tres cubos de cada juego a edades que son aproximadamente dos veces la edad del ensayo previo. Por ejemplo, si el tiempo del primer ensayo fue 12 h, ensayos de resistencia a la compresión sucesivos deben ser efectuados a 1, 2, 4, 8, 16 y 32 días.

A.1.1.6 La información de resistencia contra edad, obtenidas en las tres temperaturas de curado, son analizadas para determinar la relación entre la razón constante para desarrollo de resistencia (valor K) y la temperatura de curado. Diferentes procedimientos pueden ser usados dependiendo de la herramienta computacional disponible. Si el usuario tiene la capacidad de desarrollar solamente análisis de regresión lineal, use el procedimiento dado en A.1.1.7 o A.1.1.8.2. Si el usuario tiene un programa de computadora que pueda desarrollar análisis de regresión con una función general, use el procedimiento dado en A.1.1.8.1

A.1.1.7 Para usar este procedimiento, el tiempo de fraguado final a las tres temperaturas deben ser conocidos. Prepare una gráfica con el recíproco de la resistencia en el eje y, y el recíproco de la edad en el eje x. Para cada temperatura de curado, plotear el recíproco de la resistencia promedio de cubos a lo largo del eje y, y el recíproco de la edad más allá del tiempo de fraguado final a lo largo del eje x. Un ejemplo de esto es mostrado en la Fig. A.1.1. determine la pendiente y el intercepto de la mejor tendencia a través de la información para cada temperatura de curado. Para cada línea de tendencia divida el valor del intercepto por el valor de la pendiente. Este cociente es el valor k, que es usado para calcular la temperatura de referencia o la energía de activación.

A.1.1.8 Como una alternativa al procedimiento dado en a.1.1.7, el valor k puede ser estimado por cualquiera de los métodos siguientes. En estos casos, el tiempo de fraguado final no tiene que ser medido.

A.1.1.8.1 Si el usuario tiene acceso a un programa de computadora que permite el ajuste de una ecuación general a un conjunto de datos, determine los valores k mediante ajuste de la siguiente ecuación a los datos resistencia-edad para cada temperatura de curado:

$$S = S_u \underline{k(t - t_0)} \quad (A1.1)$$

$$1+k(t-t_0)$$

Donde:

S = resistencia a compresión promedio en cubos a la edad t

t = edad de ensayo

Su = resistencia limitada

t<sub>0</sub> = edad cuando la resistencia desarrollada es asumida a empezar

k = la razón constante.

El programa de computadora calculará la mejor tendencia de los valores Su, t<sub>0</sub>, y k

A.1.1.8.2 El valor k también puede ser estimado por los siguientes métodos (5,8).

- 1) Usando la información resistencia- edad para los últimos cuatro ensayos de edad, plotear el recíproco de la resistencia (eje y) contra el recíproco de la edad (eje x). Determine el intercepto con el eje y. El inverso del intercepto es la resistencia limitada, Su. Repita este procedimiento para cada temperatura de curado.
- 2) Para cada temperatura de curado, use la información resistencia edad en los cuatro ensayos de edad temprana y el valor de Su para calcular el valor de A para cada resistencia, donde A es dada por la siguiente ecuación.

$$A = \frac{S}{(S_u - S)} \quad (A1.2)$$

- 3) Para cada temperatura de curado, plotear el valor de A contra la edad. Determine la pendiente de la mejor tendencia para cada temperatura de curado. Estas pendientes son los valores de k.

### **A.1.2 Determinación de la Temperatura de Referencia.**

A.1.2.1 Plotee los valores de k como una función de la temperatura de los baños de agua (Fig. A1.2). Determine la mejor tendencia a través de los tres puntos y el intercepto de la línea con el eje de la temperatura. Este intercepto es la temperatura de referencia, T<sub>0</sub> (datum), que será usada en el cálculo del factor temperatura-tiempo de acuerdo con la Ecuación 1.

### **A1.3 Determinación de la Activación de la Energía**

A1.3.1 Calcule el logaritmo natural del valor k y determine la temperatura absoluta (en Kelvin) de los baños de agua. (Kelvin = Celsius + 273)

A1.3.2 Plotee el logaritmo natural del valor k como una función del recíproco de la temperatura absoluta (Fig. A1.3). Determine la mejor tendencia de los tres puntos. El valor negativo de la pendiente de la línea es el valor de la activación de la energía, dividido por la constante de gas, Q, que es usada en el cálculo de la edad equivalente de acuerdo a la Ecuación 2.

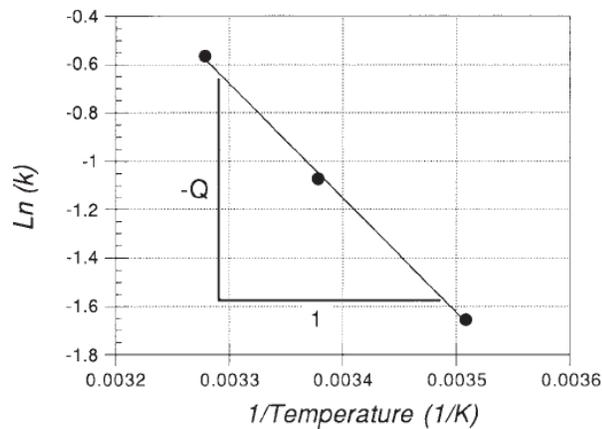


FIG. A1.3 Example of Plot of the Natural Logarithm of  $K$ -Values Versus the Inverse Absolute Temperature for Determining the Value of  $Q$  used in Calculating Equivalent Age

## APENDICE (información no Mandatoria)

### X.1. FUNCIONES DE MADUREZ

#### X1.1 General

X1.1.1 Una función de madurez es una expresión matemática para informar los efectos combinados de tiempo y temperatura en el desarrollo de resistencia de una mezcla cementante. La característica de una función de madurez es la representación de cómo los efectos de la temperatura son la razón del desarrollo de resistencia. Hay dos aproximaciones ampliamente usadas; una asume que la razón del desarrollo de resistencia es una función lineal de la temperatura, y la otra asume que la razón de desarrollo de resistencia obedece la ecuación exponencial de Arrhenius (3,4,5).

#### X1.2 Factor Temperatura-Tiempo

X1.2.1 La asunción de que la razón de desarrollo de resistencia es una función lineal de temperatura conduce a la función de madurez dada en la Ec. 1, que es usada para calcular el factor temperatura-tiempo. Para calcular el factor temperatura-tiempo, es necesario conocer el valor apropiado de la temperatura de referencia para el material y las condiciones específicas. La temperatura de referencia puede depender del tipo de cemento, del tipo y la dosificación de adiciones u otros aditivos que afecten la razón de hidratación y en el rango de temperatura que el concreto experimenta cuando endurece (5,7). Para cemento Tipo I sin adiciones y un rango de temperatura de curado de 0° a 40°C, la temperatura de referencia recomendada es 0°C (5). Para otras condiciones y

cuando se desea la máxima precisión de la estimación de la resistencia, la temperatura de referencia apropiada puede ser determinada experimentalmente de acuerdo a los procedimientos dados en el Anexo A1.

X1.2.2 Algunos tipos de instrumentos de madurez que calculan el factor temperatura- tiempo pueden no utilizar la temperatura de referencia apropiada, y entonces puede no indicar el valor verdadero del factor. El valor del factor temperatura- tiempo mostrado por el instrumento puede ser corregido para la temperatura de referencia como sigue:

$$M_c = M_d - (T_o - T_d) t \quad (X1.1)$$

Donde:

$M_c$  = el factor temperatura- tiempo corregido, grados- días o grados- horas

$M_d$  = el factor temperatura- tiempo mostrado por el instrumento, grados-días,

$T_o$  = la temperatura de referencia apropiada para el concreto, °C

$T_d$  = la temperatura de referencia incorporada al instrumento, °C

$t$  = el lapso de tiempo desde cuando el instrumento fue encendido hasta cuando una lectura fue tomada, días u horas.

### **X1.3 Edad Equivalente**

X1.3.1 La asunción de que la razón de resistencia desarrollada obedece la ecuación de Arrhenius conduce a la función de madurez dada en la Ec. 2, esto es usado para calcular la edad equivalente a una temperatura especificada. Note que usando la Ec. 2, la temperatura debe estar en grados kelvin (kelvin = Celsius +273). Para calcular la edad equivalente es necesario conocer la energía de activación para el material y condiciones específicas. Ha sido demostrado que la energía de activación depende del tipo de cemento, el tipo y dosificación de las adiciones que afectan la razón del desarrollo de resistencia y de la relación agua- material cementante (7). En general, para cemento Tipo I sin adiciones, el valor de la energía de activación en el rango de 40 000 a 45 000 J/mol debe ser reportado (6). De esta manera, un valor aproximado de  $Q$ , la energía activada dividida por la constante de gas para use en la Ec. 2, es 5000 k (El valor de la constante de gas es 8.31 J/(K-mol)). Para otras condiciones y cuando se desea la máxima precisión en la estimación de resistencia, el valor apropiado de  $Q$  puede ser determinado experimentalmente de acuerdo a los procedimientos dados en el anexo A1.

X1.3.2 El cálculo de la edad equivalente también requiere una temperatura especificada,  $T_s$ . Tradicionalmente, un valor de 20°C ha sido usado (4), pero cualquier otra temperatura conveniente, tal como 23°C, es permitido previniendo que es reportada a lo largo del proceso como el valor de la edad equivalente.

X1.3.3 Los instrumentos de madurez que calculan la edad equivalente de acuerdo a la Ec. 2, están basados en valores específicos de activación de energía. Las lecturas mostradas pueden no estar corregidas para el apropiado

valor de activación de energía que es ampliamente diferente del incorporado al instrumento. Refiérase a (3) para información sobre los efectos de la energía de activación en el valor calculado de edad equivalente.

## X2. EJEMPLO DE CALCULO DE MADUREZ

### X2.1 Registro de temperatura

X2.1.1 La Fig. X2.1 muestra una historia de temperatura hipotética para concreto, que será usado para ilustrar los cálculos del factor temperatura-tiempo y edad equivalente. Los valores de temperatura a intervalos de 0.5 h están tabulados en la columna 2 de la Tabla X2.1.

### X2.2 Cálculo del Factor temperatura-Tiempo

X2.2.1 El valor de la temperatura de referencia,  $T_0$ , es requerido para calcular el factor temperatura- tiempo de acuerdo a la Ec. 1. Para este ejemplo un valor de  $2.5^{\circ}\text{C}$  es asumido como se indica en la Fig. A1.2.

X2.2.2 La temperatura promedio durante cada intervalo de 0.5 h es calculado y los resultados son dados en la columna 4 de la tabla X2.1. La temperatura de referencia es restada de la temperatura promedio y la diferencia es multiplicada por el intervalo de edad, el cual en este ejemplo es 0.5 h. El producto da el valor incremental del factor temperatura- tiempo para ese intervalo de edad. Los valores incrementales son mostrados en la columna 5 de la Tabla X2.1.

X2.2.3 La suma de los factores temperatura- tiempo incrementales da el factor temperatura- tiempo acumulado en cada edad. Por ejemplo, a un rango de 12 h el factor temperatura- tiempo es  $175^{\circ}\text{C-horas}$ .

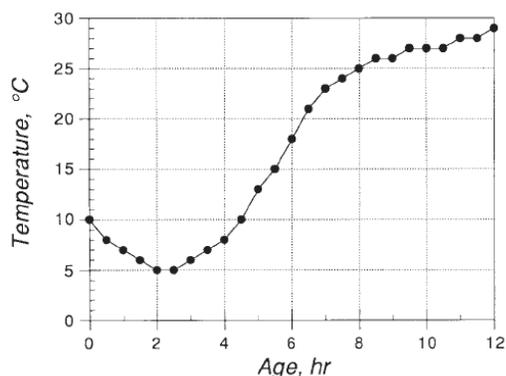


FIG. X2.1 Hypothetical Temperature History used to Illustrate Computations of Temperature-Time Factor and Equivalent Age

### X2.3 Cálculo de la Edad Equivalente

X2.3.1 El valor de Q y el valor de la temperatura especificada, Ts, son requeridos para calcular la edad equivalente de acuerdo a la Ec. 2. Para este ejemplo el valor de Q es asumido en 4700°K y la temperatura especificada es asumida a ser 20°C (293°K).

X2.3.2 Usando la temperatura promedio, en kelvin, durante cada intervalo de edad, los valores de la función exponencial en la Ec. 2 son calculados. Estos valores son dados en la columna 7 de la Tabla X2.1 bajo el encabezado Factor de Edad. El producto de cada uno de los factores edad y el intervalo de edad (0.5 h) da la edad equivalente incremental a 20°C; las edades equivalentes incrementales son mostradas en la columna 8 de la Tabla X2.1.

X2.3.3 La sumatoria de las edades equivalentes incrementales da la edad equivalente acumulada a 20°C (columna 9 de la Tabla X2.1). Por ejemplo en una edad de 12 h, la edad equivalente a 20°C es 11.3 h.

**Tabla X2.1 Ejemplo de Cálculo de Madurez**

(1) Age, h	(2) Temperature, °C	(3) Age Increment, h	(4) Average Temperature, °C	(5) Temp-Time Factor, Increment °C-h	(6) Temp-Time Factor, Cumulative °C-h	(7) Age Factor	(8) Eq. Age at 20 °C, Increment h	(9) Eq. Age at 20 °C, Cumulative h
0	10	...	...	...	0	...	...	0.0
0.5	8	0.5	9	3.3	3	0.53	0.27	0.3
1.0	7	0.5	7.5	2.5	6	0.49	0.24	0.5
1.5	6	0.5	6.5	2.0	8	0.46	0.23	0.7
2.0	5	0.5	5.5	1.5	9	0.43	0.22	1.0
2.5	5	0.5	5	1.3	11	0.42	0.21	1.2
3.0	6	0.5	5.5	1.5	12	0.43	0.22	1.4
3.5	7	0.5	6.5	2.0	14	0.46	0.23	1.6
4.0	8	0.5	7.5	2.5	17	0.49	0.24	1.9
4.5	10	0.5	9	3.3	20	0.53	0.27	2.1
5.0	13	0.5	11.5	4.5	24	0.62	0.31	2.4
5.5	15	0.5	14	5.8	30	0.72	0.36	2.8
6.0	18	0.5	16.5	7.0	37	0.82	0.41	3.2
6.5	21	0.5	19.5	8.5	46	0.97	0.49	3.7
7.0	23	0.5	22	9.8	55	1.11	0.56	4.3
7.5	24	0.5	23.5	10.5	66	1.21	0.60	4.9
8.0	25	0.5	24.5	11.0	77	1.27	0.64	5.5
8.5	26	0.5	25.5	11.5	88	1.34	0.67	6.2
9.0	26	0.5	26	11.8	100	1.38	0.69	6.9
9.5	27	0.5	26.5	12.0	112	1.42	0.71	7.6
10.0	27	0.5	27	12.3	124	1.45	0.73	8.3
10.5	27	0.5	27	12.3	137	1.45	0.73	9.0
11.0	28	0.5	27.5	12.5	149	1.49	0.75	9.8
11.5	28	0.5	28	12.8	162	1.53	0.77	10.5
12.0	29	0.5	28.5	13.0	175	1.57	0.79	11.3

Referencia: Annual Book of ASTM Standards, 2007

Volume 04.02 Concrete and Aggregates'

Tesis UES, Marzo 2008

Traducción Libre: Oscar Aguilar

Adiel Rodriguez

Martín Sermeño