

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



**TITULO:
“INSTRUMENTALIZACIÓN DE UN TRAMO DE CALLE DE
100M DE CONCRETO, UTILIZANDO EL EQUIPO DE
MADUREZ, EN EL TRAMO 7-B LISLIQUE-ANAMOROS, DE LA
CARRETERA LONGITUDINAL DEL NORTE”**

**PRESENTAN:
ARTEAGA MARTÍNEZ, GABRIEL
CASTILLO BONILLA, JOSUÉ ALFREDO
VELÁSQUEZ GARCÍA, JULIO BLADIMIR**

**PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL**

**DOCENTE DIRECTOR:
ING. GUILLERMO MOYA TURCIOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 2012

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

Ing. Mario Roberto Nieto Lovo.

VICERRECTOR ACADÉMICO:

Maestra Ana María Glower de Alvarado.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO

Lic. Salvador Castillo

SECRETARIA GENERAL:

Dra. Ana Leticia Zavaleta de Amaya.

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL

DECANO EN FUNCIONES:

Lic. Cristóbal Hernán Ríos Benítez

VICEDECANO EN FUNCIONES:

Lic. Carlos Alexander Díaz

SECRETARIO GENERAL:

Lic. Jorge Alberto Ortez Hernández

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA:**

Ing. Luis Clayton Martínez

COORDINADORA GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACION:

Ing. Milagro de María Romero de García

COORDINADOR DEL DEPARTAMENTO:

Ing. Guillermo Moya Turcios

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN AL GRADO
DE:
INGENIERO CIVIL**

**TEMA:
“INSTRUMENTALIZACIÓN DE UN TRAMO DE CALLE DE
100M DE CONCRETO, UTILIZANDO EL EQUIPO DE
MADUREZ, EN EL TRAMO 7-B LISLIQUE-ANAMOROS, DE LA
CARRETERA LONGITUDINAL DEL NORTE”**

**PRESENTAN:
ARTEAGA MARTÍNEZ, GABRIEL
CASTILLO BONILLA, JOSUÉ ALFREDO
VELÁSQUEZ GARCÍA, JULIO BLADIMIR**

**DOCENTE DIRECTOR:
ING. GUILLERMO MOYA TURCIOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, 30 DE AGOSTO DE 2012

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

ING. GUILLERMO MOYA TURCIOS
Docente Director

ING. MILAGRO DE MARÍA ROMERO GARCÍA
Coordinador de Proyectos de Graduación

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por habernos permitido alcanzar esta meta y por habernos dado la sabiduría necesaria para culminar esta etapa de nuestra vida.

A todo el personal docente que fue parte de nuestra formación como profesionales y más que eso, como personas.

A la Universidad de El Salvador, por habernos formados en nuestra carrera, por toda la sabiduría y experiencia que hemos adquirido en ella a través de estos años.

A nuestro asesor Ingeniero Guillermo Moya Turcios, director de este trabajo de graduación, por orientarnos siempre hacia adelante y depositar su confianza en nuestro trabajo. Sus ideas y sugerencias han hecho que este trabajo sea más claro y concreto.

A nuestro asesor externo Ingeniero Carlos Quintanilla, por su orientación y dedicación hacia nosotros e impregnarnos de voluntad para terminar nuestra carrera profesional.

Al Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto y su personal técnico, por la asesoría que nos brindaron y por permitirnos el acceso a sus instalaciones y hacer uso de su equipo para la realización de las pruebas de laboratorio que son esenciales para la culminación de este trabajo.

Al Asocio Terrasal-Salazar Romero, por permitirnos realizar el estudio y apoyarnos vehementemente en todas los estadios de nuestra investigación.

DEDICATORIA

Doy infinitas gracias a Dios por permitirme cumplir uno de los objetivos de mi existencia.

A mi mamá y papá por darme apoyo incondicional, fortaleza y comprensión que me ayudó a culminar mi carrera profesional.

A mis 4 hermanos por ayudarme y apoyarme en todas las etapas de mi estudio.

A mis tíos, tías y abuelos por estar siempre pendiente de mi estudio y apoyarme en todo lo que en su momento necesite.

Al nuestro docente director, asesor externo y al ISCYC por la disposición y amabilidad de brindarnos sus conocimientos para concluir con la etapa universitaria. A la empresa constructora del tramo 7 de la longitudinal del norte por permitirnos realizar nuestra investigación y por su apoyo valioso para culminar la tesis.

Y así a todos los que de alguna manera u otra han contribuido a mi desarrollo como persona y como profesional.

Gracias.

Gabriel Arteaga Martínez

DEDICATORIA

Doy gracias al dador de la vida, por encontrar gracia en mí,

A mis padres por su entrega incondicional; a mi padre JOSE CASILLO que en la distancia me acompaña, a mi madre MIGDA BONILLA por dedicar cada instante de su vida a mi formación, por su esfuerzo y perseverancia me coronó como un profesional.

A mis hermanos DERIS CASTILLO Y DANIEL CASTILLO porque sé que siempre puedo contar con ellos.

A mis familiares; abuelos, por sus sabios consejos, mis tíos CARLOS BONILLA (Q.E.P.D), MARTA BONILLA Y ALEXANDER BONILLA, que en la distancia me han apoyado.

A mi novia MARIA JOSE REYES por siempre estar ahí en cada momento brindándome su apoyo y amor incondicional, y por brindarme una nueva familia.

A mis compañeros de tesis, porque compartieron mis visiones en este proyecto.

A cada una de las instituciones y empresas que facilitaron el desarrollo de este proyecto.

A cada una de las personas que formaron y forman parte de mi diario vivir.

JOSUE CASTILLO

DEDICATORIA

A DIOS:

Por ser mi fortaleza y no desampararme en ningún momento de estos largos años, por estar presente llenando de bendiciones mi vida. Todo te lo debo a ti señor.

A MIS PADRES:

Mirna Velásquez Y Francisco Ramos, Por apoyarme en cada decisión de mi vida, por creer y confiar en mi incondicionalmente, por sus consejos que han sido una guía en mi vida, por su amor, por su empeño en educarme y llevarme por el buen camino, por anteponer mis necesidades a las suyas y por el sacrificio diario que hicieron durante toda mi carrera. Gracias por entenderme siempre y preocuparse por mí en todo momento.

A MIS ABUELOS:

Andrea García Y José Velásquez Que aunque ya no estén presentes siempre fueron un gran ejemplo de lucha y fortaleza, inspirándome a no decaer y a seguir adelante sin importar las dificultades.

A CRISTINA:

Por todo el apoyo y la comprensión que me dio cuando lo necesite, por ser motivo de felicidad cada día y principalmente en aquellos mas difíciles. Te amo $r = 1 - \sin(\theta)$

MIS COMPAÑEROS DE TESIS:

Arteaga y Castillo, Ante todo por su amistad y por la armonía que generaron en este grupo, por el apoyo y comprensión siempre que fue necesario, por poner tanto empeño para que este trabajo funcionara y lograr alcanzar los objetivos. Gracias amigos, por su esfuerzo ahora podemos decir lo logramos.

A TODOS MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE LA UNIVERSIDAD:

A cada uno de ustedes que desde que empecé mi carrera estuvieron ahí, trabajando a mi lado, recibiendo buenas y malas notas, a los que me acompañaron en tanto desvelo, a mis compañeros y a los que se quedaron atrás, gracias a todos, sin ustedes amigos no lo hubiese logrado.

JULIO BLADIMIR VELASQUEZ GARCIA

ÍNDICE GENERAL

1. CAPITULO 1

ANTEPROYECTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
<i>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</i>	<i>2</i>
1.1.1.Situación problemática.....	2
1.1.2.Enunciado del problema.....	3
<i>1.2. OBJETIVOS</i>	<i>6</i>
1.2.1.General	6
1.2.2.Específicos.....	6
<i>1.3. JUSTIFICACIÓN.....</i>	<i>8</i>
<i>1.4. DELIMITACIONES</i>	<i>10</i>
1.4.1.Alcances	10
1.4.2.Limitaciones.....	11
<i>1.5. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....</i>	<i>13</i>
<i>1.6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</i>	<i>14</i>
1.6.1.UNIDAD DE ANÁLISIS	14
1.6.2.DESCRIPCIÓN DE VARIABLES	14
1.6.2.1. Temperatura.....	14
1.6.2.2. Resistencia.....	15
1.6.2.3. Dosificación	15
1.6.2.4. Técnicas de recopilación de datos.....	15

2. CAPITULO 2

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	18
<i>2.1. CONCEPTOS SOBRE MADUREZ</i>	<i>19</i>
<i>2.2. PRUEBAS ALTERNATIVAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO.....</i>	<i>20</i>
2.2.1.FABRICACIÓN Y CURADO DE CILINDROS EN OBRA ASTM C31	20
2.2.2.DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A COMPRESIÓN EN CILINDROS ASTM C39	23
2.2.3.CILINDROS VACIADOS EN SITIO ASTM C873.....	25
2.2.4.PRUEBA DE EXTRACCIÓN ASTM C900	27
<i>2.3. OPERACIÓN Y MANEJO DEL CONCRETO.....</i>	<i>29</i>
2.3.1.ESTADO FRESCO DEL CONCRETO.....	29
2.3.1.1. ASTM C1064 (temperatura del concreto)	30
2.3.1.2. ASTM C134 (asentamiento y contenido de aire).....	32

2.3.2. TRANSPORTE DEL CONCRETO.....	33
2.3.3. CURADO DEL CONCRETO	34
2.3.3.1. Sistemas para mantener húmedo el concreto	35
2.3.3.2. Control de la temperatura.....	35
2.4. PROPIEDADES DEL CONCRETO RELACIONADAS CON EL MÉTODO DE MADUREZ	37
2.4.1. TEMPERATURA DEL CONCRETO	37
2.4.2. FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO	38
2.4.3. DISEÑO DE LA MEZCLA	44
2.4.4. CALOR DE HIDRATACIÓN	46
2.5. EVOLUCIÓN DE LOS CAMBIOS DE ESTADO DEL CONCRETO FRESCO A TRAVÉS DEL TIEMPO	47
2.5.1. LÍMITES DE LOS ESTADOS DEL CONCRETO FRESCO.....	47
2.5.2. RIGIDIZACIÓN DEL CONCRETO A EDADES TEMPRANAS	52
2.6. MADUREZ DEL CONCRETO.....	54
2.6.1. CONCEPTO DE MADUREZ	54
2.6.2. ANTECEDENTES DEL MÉTODO DE MADUREZ.....	58
2.6.3. REGLAMENTACIÓN Y NORMATIVA ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE LA MADUREZ.....	65
2.6.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE MADUREZ	68
2.6.4.1. Teoría de Nurse-Saul (factor tiempo temperatura)	69
2.6.4.1.1. Datum de temperatura T_0	72
2.6.4.2. Teoría de Arrhenius (edad equivalente)	73
2.6.4.3. Comparación de Nurse-Saul y Arrhenius.....	80
2.6.5. EQUIPOS PARA MEDICIÓN DE MADUREZ.....	82
2.6.5.1. Sensor de temperatura.....	85
2.6.5.2. Localización típica de sensores.....	86
2.6.6. PROCESO DE PRUEBA DE MADUREZ.....	87
2.6.6.1. Desarrollo de la curva de calibración	89
2.6.6.2. Estimación de la resistencia in-situ	93
2.6.6.3. Verificación de la curva de madurez	95
2.6.6.4. Precisión y fuentes de error	100
2.7. APLICACIONES DEL MÉTODO DE MADUREZ.....	101
2.7.1. USO DE LA MADUREZ COMO UNA HERRAMIENTA DE CONTROL DE CALIDAD	104
2.7.2. USO DE LA MADUREZ EN DECISIONES DE APERTURA AL TRAFICO	105
2.7.3. USO DE MADUREZ PARA DETERMINAR LOS TIEMPOS DE CORTE DE JUNTAS	108

3. CAPITULO 3	
DESARROLLO DE LA RELACIÓN RESISTENCIA – MADUREZ PARA LA MEZCLA DE CONCRETO	111
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO “CONSTRUCCIÓN DE CARRETERA LONGITUDINAL DEL NORTE TRAMO 7B LISLIQUE-ANAMOROS”.	111
3.2. DISEÑO DE MEZCLA Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	116
3.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ	124
3.4. CALIBRACIÓN DE LA MEZCLA SEGÚN ASTM C-1074.....	125
3.4.1. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA.....	126
3.4.1.1. Muestreo del concreto fresco (ASTM C-172)	127
3.4.1.2. Temperatura del concreto fresco (ASTM C-1064)	128
3.4.1.3. Revenimiento (ASTM C-143)	128
3.4.1.4. Elaboración y curado de especímenes de prueba en laboratorio (ASTM C-192	129
3.4.2.DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA MECÁNICA DE ESPECÍMENES.....	132
3.4.3.PROCESAMIENTO DE DATOS DE MADUREZ CON EQUIPO DIGITAL (POCKET PC)	137
3.4.3.1. Configuración del equipo.....	140
3.4.3.2. Lectura del Sensor o termocupla.....	144
3.4.4.Curva de correlación resistencia-índice de madurez (TTF)	147
4. CAPITULO 4	
MEDICIÓN DE MADUREZ Y RESISTENCIA IN SITU	150
4.1. RESUMEN METODOLÓGICO PARA LA COLOCACIÓN DEL PAVIMENTO HIDRÁULICO.	151
4.2. PROCEDIMIENTO PARA LA INSTRUMENTALIZACIÓN DE TRAMO DE 150m	157
4.3. MEDICIÓN DE LA MADUREZ EN CAMPO	163
4.4. VALIDACIÓN DE CURVA DE CALIBRACIÓN.....	178
5. CAPITULO 5	
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS	181
5.1. ESTIMACIÓN DE TIEMPO/RESISTENCIA EN CORTE DE JUNTAS	181
5.1.1.Ventana o fase de aserrado	183
5.1.1.1. Resistencia mínima para corte de juntas.....	185
5.1.1.2. Resistencia máxima para corte de juntas.....	187

5.1.2.Lectura de madurez/resistencia para corte de juntas.	190
5.2. ESTIMACIÓN DE TIEMPO/RESISTENCIA PARA APERTURA AL TRAFICO	199
5.3. GRADIENTES DE TEMPERATURA	204
5.3.1 Alabeo En Losas.....	204
5.3.2 Gradientes térmicos.....	206
5.3.3 Efecto de un Diferencial de Temperatura.....	208
5.3.4 Ecuaciones de alabeo según Westergaard	209
5.3.5 Ecuaciones De Alabeo Según Bradbury.....	212
5.3.6 Gradientes del concreto en campo.....	213
6. CAPITULO 6	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	218
BIBLIOGRAFÍA	228
A- ANEXOS	231
A.1- Análisis Técnico-Económico del método de madurez.....	232
A.2- Guía de Aplicación del Método de Madurez en Pavimentos de	
Concreto	238
A.3-ASTM C-1074-98 Traducida al español.....	256
A.4- Esquema de localización de sensores	269

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Preparación y curado de cilindros de concreto en campo	23
Figura 2.2: Inicio de la falla de cilindros.....	25
FIGURA 2.3: Descripción del uso del molde.....	26
FIGURA 2.4: Representación Esquemática de la prueba a la Extracción	27
Figura 2.5 Relación entre la resistencia a la compresión y la resistencia	28
Figura 2.6. Forma usual del avance de la rigidización.....	39
Figura 2.7. Delimitación de cambio de estado del concreto	41
Figura 2.8. Ejemplo De Re Compactación Del Concreto	42
Figura 2.9. Evolución De La Resistencia A La Compresión	43
Figura 2.10: Lapsos y Actividades Características de un concreto.....	51
Figura. 2.11: Evaluación de la Madurez del concreto	54
Figura 2.12 Evolución de resistencia de un concreto I	56
Figura 2.13 Evolución de resistencia de un concreto II	57
Figura. 2.14 Colapso de un segmento del edificio	59
Figura. 2.15: Colapso de una torre.....	60
Figura 2.16: Puente Interstate-40. Webber Fall	63
Figura. 2.17: Efecto crossover en dos mezclas de concreto.....	65
Figura 2.18 Relación entre la madurez y su resistencia a la compresión	67
Figura. 2.19 Área bajo la curva.....	71
Figura. 2.20 Factor de conversión de la edad	77
Figura 2.21 Proceso de Ensayo de Madurez	88
Figura 2.22. Resumen De Proceso De Calibración	91
Figura 2.23. Ejemplo de línea de tendencia logarítmica.....	93
FIGURA 2.24 Estimación De La Resistencia Mediante la Madurez	94
FIGURA 2.25 Ejemplo De Validación De Dos Puntos I.....	99
FIGURA 2.26 Ejemplo De Validación De Dos Puntos II.....	99
Figura 2.27 Aserrado Temprano o Tardío	27
Figura 3.1 Esquema de tramo 7A, Corinto-Lislique	112
Figura 3.4. Perfil del terreno, tramo 7b	113

Figura 3.5 Relación Agua/Cemento	122
Figura 3.6 Resumen Fotográfico	127
Figura 3.7 Medición de la temperatura del concreto	127
Figura 3.8 Revenimiento del concreto	128
Figura 3.9 Aplicación de desmoldante.....	130
Figura 3.10 Introducción de sensores.....	131
Figura 3.11 Curado por inmersión	132
Figura 3.12 Actividades de registro de peso y dimensiones.....	134
Figura 3.13: Resumen fotográfico de edades de compresión	135
Figura 3.14 -Equipo de madurez	138
Figura 3.15: Instrumentalización de 2 cilindros de prueba	139
Figura 3.16: Configuración del submenú “Maturity”	141
Figura 3.17: Menú ingreso de datos en el menú “Placement input”	142
Figura 3.18: Opción preferences del menú input	143
Figura 3.19: Cable serie 9-pin que	145
Figura 3.20: conectando el sensor al Pocket Pc.....	145
Figura 3.21 Grafica temperatura-tiempo Cilindro 1	146
Figura 3.21 Grafica temperatura-tiempo Cilindro 2	146
Figura 3.23 Grafica Madurez en cilindros 1 y 2.	147
Figura 3.23 Grafica de Resistencia Vs Madurez.	149
Figura 4.1 Molde metálico anclado en la base.	152
Figura 4.2 Descarga y distribución del concreto.....	153
Figura 4.3 Enrazado y acabado de superficie.....	154
Figura 4. 4 Texturizado del concreto con cepillo celdas metálicas.....	154
Figura 4.5 Curado del concreto con aditivo formador de membrana	155
Figura 4.6 Corte de junta transversal.....	156
Figura 4.7 Instalación de grapas para colocación de sensores	158
Figura 4.8 Profundidad de los sensores antes del colado.	159
Figura 4.10 Resumen fotográfico de pavimentación	162
Figura 4.11 Captura de pantalla del Software Command Center	164
Figura 4.12: Tomando lecturas de resistencia en campo	166

Figura 4.13 Grafica de temperatura vrs edad 0+743	171
Figura 4.14 Grafica de temperatura vrs edad 0+793	172
Figura 4.15 Grafica de temperatura vrs edad 0+843	173
Figura 4.16 Grafica de temperatura vrs edad 0+893	173
Figura 4.17 Grafica de temperatura vrs Resistencia 28 dias 0+743.....	176
Figura 4.18 Grafica de temperatura vrs Resistencia 28 dias 0+793.....	176
Figura 4.19 Grafica de temperatura vrs Resistencia 28 dias 0+843.....	177
Figura 4.20 Grafica de temperatura vrs Resistencia 28 dias 0+893.....	177
Figura 5.1: Fase o Ventana de Aserrado.	184
Figura 5.2: Daño del concreto a la orilla de la junta	186
Figura 5.3: Historial de temperatura del concreto a 24 h. E 0+743.....	193
Figura 5.4: Historial de temperatura del concreto a 24 h. E 0+843.....	194
Figura 5.7: Estimación de tiempo/resistencia para apertura al tráfico 00+743	203
Figura 5.8: Estimación de tiempo/resistencia para apertura al tráfico 00+893	204
Figura 5.7: Estimación de tiempo/resistencia para apertura al tráfico 00+743	203
Figura 5.9: Condición de día en Losa	209
Figura 5.10: condición de noche para losa	209
Figura 5.11: Carta para la determinación del coeficiente de alabeo.....	215
Figura 5.12: temperaturas superior e inferior estación 0+893.....	217
Figura 5.13: Gradiente térmico (ΔT) a 24 horas en la estación 0+893	218
Figura 5.14 Gradientes de temperatura a 28 días 0+793	219
Figura 5.15 Gradientes de temperatura a 28 días 0+843	219
Figura 5.16 Gradientes de temperatura a 28 días 0+893	220

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tolerancias de acuerdo al nivel de asentamiento.....	33
Tabla 2.2: Ejemplo de periodo mínimo de curado	36
Tabla 2.3 Componentes de un equipo de madurez.....	27
Tabla 3.1. Consistencia y asentamientos	115
Tabla 3.2 contenido de aire	117
Tabla 3.3 Relación agua/cemento y resistencia	118
Tabla 3.4 Resumen de materiales.....	119
Tabla 3.5 Dosificación Final.....	120
Tabla 3.6 A: Temperaturas del concreto.....	120
Tabla 3.6 B: Revenimiento del concreto	120
Tabla 3.7 Resumen de resistencia mecánica	136
Tabla 3.8: Resumen de edad, resistencia y madurez.....	148
Tabla 4.1 Resumen de ubicación lateral de sensores	161
Tabla 4.2: Datos de temperatura, madurez y resistencia 0 + 743	167
Tabla 4.3: Datos de temperatura, madurez y resistencia 0 + 793	168
Tabla 4.4: Datos de temperatura, madurez y resistencia 0 + 843	169
Tabla 4.5: Datos de temperatura, madurez y resistencia 0 + 893	170
Tabla 4.6: temperatura, madurez y resistencia 28 días 0 + 743	174
Tabla 4.7: temperatura, madurez y resistencia 28 días 0 + 793	175
Tabla 4.8: temperatura, madurez y resistencia 28 días 0 + 843	175
Tabla 4.9: temperatura, madurez y resistencia 28 días 0 + 893	174
Tabla 4.22: Ensayos de cilindros para validación.....	179
Tabla 5.1: Resistencia a la compresión requerida	187
Tabla 5.2: Resumen de hora de colado.....	191
Tabla 5.3: Calificación del corte y resistencia a la compresión.....	192
Tabla 5.4: Requisitos de resistencia a la flexión para la apertura al tráfico	202
Tabla 5.5: Variables de las ecuaciones de Bradbury.....	214
Tabla 5.6: Variables de las ecuaciones de Bradbury.....	214

GLOSARIO

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.

HIDRATACIÓN: Calor desarrollado por reacciones químicas de una sustancia con el agua tal como el desarrollo durante el fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland.

REACCIÓN EXOTÉRMICA: 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.

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.

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.

EXUDACIÓN: 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.

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.

DATUM DE TEMPERATURA: Es la temperatura bajo la cual el concreto deja de ganar resistencia.

ENERGÍA DE ACTIVACIÓN: Es la energía necesaria para que se dé 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 Δt 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.

INSTRUMENTALIZACIÓN 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.

RESISTENCIA POTENCIAL: Es la resistencia obtenida por medio de cilindros curados en condiciones estándar a los 28 días.

RELACIÓN RESISTENCIA – MADUREZ: Relación matemática obtenida entre la resistencia a la compresión y el índice de madurez del concreto.

PROLOGO

Desde comienzos de 1950 investigadores ingleses identificaron la gran influencia de la temperatura sobre la evolución de la resistencia del concreto. Durante esa época se dedujo que la temperatura del material estaba directamente relacionada con la cantidad de hidratos generados y estos, a su vez, con la resistencia del mismo. De esta forma aparece el concepto madurez que se funda en la historia térmica del material. El concepto de madurez utiliza el principio en que la resistencia del concreto está directamente relacionado con la edad y el desarrollo de su temperatura.

El periodo de edad temprana del concreto, también conocida como etapa de concreto fresco, es relativamente pequeña en comparación con su vida total. Durante este periodo el concreto es muy susceptible debido a las diferentes condiciones de exposición u operación, que podrían aumentar o disminuir su calidad durante su vida útil, esto hace de gran importancia el conocimiento del comportamiento del concreto a edades muy tempranas utilizando los conceptos de madurez.

La ASTM (American Standard of Testing and Materials) establece los lineamientos para la aplicación de este método en su normativa: ASTM C-1074 la cual describe y explica la forma de aplicarlo.

Este método es aplicado ampliamente en otros países, mas sin embargo en El Salvador no es así, el tema de la madurez ha sido poco estudiado en nuestro medio, se posee una base de información muy escasa, esto da la pauta para indagar en este tipo de investigaciones, que permitan conocer en condiciones locales la aplicabilidad en el método.

Los ensayos y pruebas realizadas en un laboratorio nos proporcionan parámetros que pueden ser muy útiles en el campo, pero la exactitud de esta información es cuestionable en relación a lo que en realidad experimenta el concreto en el campo, el método de la madurez es un ensayo no destructivo que permite conocer la resistencia del concreto en función de la temperatura y tiempo, además es un método in situ.

El método de la madurez permite el ahorro del tiempo y recursos económico en el sentido que podría realizarse el desencofrado de elementos estructurales así como reducir el periodo de habilitación de carreteras (con el margen de error más mínimo). El presente documento pretende dar a conocer un poco más acerca del método en cuestión.

CAPITULO 1

ANTEPROYECTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En el Salvador los métodos para realizar los estudios sobre el comportamiento y evolución del concreto para determinar su resistencia, se quedan a nivel de laboratorio, pero el concreto no se queda en un laboratorio, sino que, es colocado a la intemperie donde se ve afectado por factores climáticos que inciden en su curado y su resistencia final.

Las resistencias alcanzadas por el concreto en un laboratorio están asociadas al ambiente de curado, el cual solamente es representativo para el campo, no exacto; al reventar un cilindro obtenemos su resistencia para un día en específico, pero el concreto no tendrá la misma resistencia en el transcurso de todo el día.

El problema del alabeo en las losas de concreto es muy común, las losas sufren de distorsiones que toman una forma curva, puede ser hacia arriba o hacia abajo; los cambios en las dimensiones de la losa que conducen al alabeo son mas frecuentemente relacionados con los gradientes de humedad y temperatura. El corte de juntas de contracción longitudinal y

transversal en el pavimento se efectúan a través de criterios empíricos, no basados en una resistencia o temperatura específica, sino en el criterio de cada constructor, algunos autores proponen que deben hacerse estos cortes aproximadamente a 6 horas después del colado, el constructor debe considerar el endurecimiento del concreto y la temperatura ambiente para definir el momento cuando se debe efectuar el corte en juntas.

Las aperturas de las calles en muchas ocasiones son demoradas por largas horas, pues en el laboratorio se determinó que debía habilitarse al día 5 (a manera de ejemplo), provocando así una gran congestión vehicular siendo este el más optimista de los casos, pues en ocasiones se apertura la calle y el concreto aún no ha alcanzado la resistencia adecuada para ser sometido a las cargas vehiculares, obteniendo así como resultados las pérdidas totales del proyecto.

1.1.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA

¿Es posible con la aplicación del método de madurez superar las deficiencias y vacíos que los métodos convencionales dejan en el estudio de la evolución del concreto?

Si bien es cierto los ensayos en el concreto convencionales tales como la determinación de resistencias utilizando probetas cilíndricas se apegan mucho a la evolución del concreto, tampoco son una herramienta exacta

para la determinación de dicha característica del concreto en campo, además de poseer varias desventajas en cuanto al tiempo y el limitado número de ensayos que se pueden realizar, situaciones como estas pueden ser aventajadas con el ensayo de madurez ya que el número de pruebas realizadas es ilimitado, además que el tiempo deja de ser un factor en contra ya que se puede realizar el ensayo en el momento más necesario según se requiera es decir se obtendría resistencias del concreto in situ en tiempo real.

En los proyectos que se realizan actualmente en nuestro país el comportamiento del concreto en condiciones de campo no es analizado. El método de la madurez es adecuado para controlar la calidad de las obras que son habilitadas en periodos cortos de tiempo, por medio de este método basado en la norma ASTM C-1074 “Practica estándar para la determinación de la resistencia del concreto por el método de madurez” se puede tener mayor exactitud de la resistencia que el concreto alcanza a edades tempranas, es decir en horas. Actualmente no se utiliza este método, así que, es necesario presentarlo como una alternativa que nos permita obtener información el lugar del proyecto y con una enorme precisión.

Una de las diferencias de la teoría de madurez en comparación con muchos otros métodos de ensayos, es que la mayoría de ensayos o procedimientos convencionales son buenos para la determinación de una sola característica del concreto, caso contrario se da con el método de madurez ya que con el

mismo procedimiento se le pueden dar distintas aplicaciones muy útiles especialmente en pavimentos de concreto hidráulico, incluso con este método se podría llegar a determinar parámetros adecuados que ningún otro procedimiento normado pueda arrojar tal es el caso de tiempo adecuado de corte en juntas, la pronto apertura al tráfico, la detección y prevención del alabeo en losas de concreto. Todo esto solo con la variación mínima en la instrumentalización del concreto y en la interpretación de datos obtenidos de dicho ensayo.

La implementación del método de madurez puede agilizar los procesos y la recopilación de información de una mezcla de concreto cualquiera, el método es muy práctico pero requiere que sea estudiado cuidadosamente para poder ser implementado de la manera correcta. La introducción de los sensores se realiza a 3 diferentes alturas de la losa de concreto, a 1" desde la superficie, al centro de la losa y al fondo de su altura total, cada altura tiene la finalidad de proporcionar información específica del comportamiento del concreto, que puede servir no solamente para el punto de análisis sino para toda la losa en general. La lectura a 1" de la altura nos proporciona información útil para determinar el momento preciso de corte de las juntas, reduciendo las posibilidades de fisura; la lectura al centro de la losa nos proporciona información de la resistencia temprana la cual nos dará criterios para dar apertura al tráfico sin sufrir daños en la estructura, y el sensor del fondo proporciona información sobre los esfuerzos y temperaturas a esa

profundidad para evaluar las diferencias que hay entre las ubicaciones y profundizar en un análisis de factores de alabeo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERAL

- Demostrar que el método de madurez es una opción viable para la determinación de resistencias y control de calidad del concreto en *campo*.

1.2.2 ESPECÍFICOS

- Evaluar en condiciones de laboratorio y campo durante 1 meses, la evolución de la madurez del concreto y su correspondiente resistencia a compresión.
- Medir la madurez de una mezcla de concreto y determinar su respectiva resistencia, en un pavimento de concreto hidráulico a edades tempranas “in situ”.

- Obtener la curva factor temperatura-tiempo vrs. Resistencia a la compresión del concreto, considerando edades de ruptura de 1, 3, 7, 14 y 28 días.
- Determinación del rango de resistencia/tiempo adecuado de corte de juntas de contracción durante la construcción de pavimentos de concreto.
- Evaluación de esfuerzos en la parte superior e inferior de la losa de concreto para profundizar en el estudio de alabeo.
- Determinación de la edad del concreto para la apertura al tráfico.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El método de madurez es un ensayo clasificado como no destructivo, este permite conocer la resistencia a compresión del concreto a edades tempranas, es decir en horas y hasta minutos luego de su colado, sin dañar la estructura sobre la cual se aplica el método.

Para edades tempranas del concreto, está establecido que deben utilizarse métodos no destructivos como el método de madurez, lo cual hasta el momento no ha sido implementado en nuestros controles de calidad, como lo establecen los estándares internacionales.

En otros países el método de la madurez es estudiado y aplicado, pero en El Salvador se han realizado pocas investigaciones sobre el tema y las pocas investigaciones que se han realizado se quedan a nivel de laboratorio; hasta la fecha la apertura de tráfico y el corte de juntas en carreteras se realiza basándose en los datos obtenidos en laboratorio a través de reventar cilindros (para obtener la resistencia a la compresión), lo cual no nos proporciona información del real comportamiento del concreto en el campo pues las condiciones de curado en laboratorio difieren de las condiciones de curado en campo.

Aplicando el método de madurez se logra controlar la calidad del concreto para pavimentos “fast track” (vías de pronta apertura al tráfico) y el corte en verde en juntas transversales, por tal razón resulta necesario abordar una investigación que nos permita conocer el método y su aplicación en el campo.

1.4 DELIMITACIONES

1.4.1 ALCANCES

Los alcances para esta investigación se pueden contemplar en los objetivos, se pretende cumplirlos para poder contribuir al control de calidad de los procesos constructivos de concreto en carreteras.

1 Mostrar la importancia que tiene el estudio de la madurez para ser aplicado como una medida de control de calidad en obras como carreteras.

2 Generar antecedentes en nuestro país que permitan aumentar el interés del profesional de la ingeniería para abordar este tema, para poder resolver problemas que estén enmarcados dentro de la madurez y la edad temprana del concreto, que sirva el presente estudio como un parámetro de comparación.

3 Llevar a cabo una investigación de campo, que nos permitirá evaluar el concreto en sus condiciones reales finales antes de su endurecimiento.

4 Conocer el índice de madurez para un diseño de mezcla determinado, de tal índice de madurez poder proyectar su resistencia final.

5 Elaborar un documento que presente los lineamientos a seguir para posteriores investigaciones, así también, como para llevar a cabo el control de calidad del concreto para calles, que dicho control puede visualizarse

como la apertura de calle en lapsos de tiempo relativamente pequeños, en el aserrado o corte en verde de juntas.

6 Establecer un lapso de tiempo en el cual el concreto está apto para ser sometido a corte de juntas.

7 Elaborar una guía metodológica de aplicación del método de madurez para futuras referencias.

8 Establecer una comparación técnico-económica del método de madurez con métodos convencionales.

1.4.2 LIMITACIONES

Se pretenden alcanzar cada uno de los objetivos teniendo presente que existen limitantes propias del método y también limitante propias del tipo de investigación.

1 El periodo de tiempo en el cual se realizara la instrumentalización está sujeto al tiempo en que se ejecute el proyecto, retrasos en la iniciación del proyecto representan retrasos para la investigación.

2 El equipo de madurez será proporcionado por el ISCYC, por tal razón está sujeto a ser manejado en horarios pre establecidos por el instituto.

3 Los antecedentes sobre este tipo de investigación en nuestro medio son muy escasos, por lo tanto hay que recurrir a fuentes de información vía internet los cual puede proporcionarnos información que no se adapte en su totalidad a nuestra investigación.

4 El método de la madurez no puede ser aplicado de manera generalizada, los datos obtenidos de esta investigación no pueden ser aplicados para otro proyecto, pues el índice de madurez y la resistencia final de la mezcla de concreto a analizar, dependen de condiciones propias del proyecto.

5 No se calculara el Datum de temperatura requerido por las norma ASTM-C1074 Pero se asumirá el valor correspondiente recomendado por la norma para el tipo de cemento a usar.

6 No existe un dispositivo estandarizado para la colocación de los sensores a una determinada altura dentro de la losa de concreto, Por lo tanto se diseñara un instrumento cuya función será facilitar la ubicación de los sensores y evitar también desplazamientos de los mismos durante el colado.

7 En el proyecto no se contara con una estación meteorológica para recabar los datos de temperatura ambiental y velocidad de viento, por lo tanto se tomaran estos datos de la estación meteorológica más cercana.

8 Previo a la instrumentalización en campo se necesita un lapso de tiempo mínimo de un mes para generar la curva de calibración de la mezcla de concreto que se usara en el proyecto.

9 El estudio se enfocara solamente en la función de madurez expuesta por Nurse Saúl.

1.5 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este tema consiste en una investigación tipo exploratoria, descriptiva y de desarrollo. En El Salvador esta investigación ha sido abordada sin ser llevada a un proyecto real, aunque existen investigaciones similares hechas en otros países las cuales han arrojado resultados, estos no se han adoptados en El Salvador, debido a la diferencia que existe en los factores ambientales y condiciones de obra para cada proyecto.

Se pretende relacionar las variables temperatura, tiempo y resistencia para un diseño de mezcla específico para un proyecto de concretado real.

1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 UNIDAD DE ANÁLISIS

El concreto:

Se medirá la resistencia que va obteniendo el concreto con el tiempo, a temperaturas variables proporcionadas por el entorno y los procesos constructivos.

1.6.2 DESCRIPCIÓN DE VARIABLES

1.6.2.1 TEMPERATURA.

La temperatura cambia a medida transcurre el tiempo, durante un día, alcanzan puntos máximos y mínimos, así mismo en diferentes épocas de un año, puntos en los cuales el concreto fragua de manera rápida o lenta según sea el caso, teniendo presente que el concreto fragua más rápido a altas temperaturas, es fácil percibir que el concreto desde su colado experimenta severos cambios de temperatura que incidirán en su resistencia final.

1.6.2.2 RESISTENCIA

La resistencia del concreto, se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a carga axial a los 28 días, esto solo definiría la resistencia final, pues luego de que el concreto es colado, va ganando resistencia en función del tiempo-temperatura, así que para una determinada mezcla se podría tener una misma resistencia si el índice de madurez es el mismo, por ejemplo un concreto curado a una temperatura de 10°C por 7 días puede tener el mismo índice de madurez que un concreto curado a 27°C por 3 días, en consecuencia tendrían la misma resistencia.

1.6.2.3 DOSIFICACIÓN

La dosificación de los materiales que conforman el concreto genera la resistencia del mismo, cada diseño de mezcla que se realiza persigue resistencias determinadas, que coladas y curadas bajo iguales condiciones diferirán unas de otras, esto puede suceder por la relación agua-cemento, la cual incide directamente en el tiempo de curado, a mayor contenido de agua, mayor cantidad de calor se necesitara para que el concreto endurezca.

1.6.2.4 TÉCNICAS DE RECOPIACIÓN DE DATOS

La información para desarrollar esta investigación se obtendrá del equipo de madurez; se instalaran sensores ubicados en zonas representativas (a cada

50m), que permitan conocer con mayor claridad el comportamiento del concreto desde horas después de su colado.

Para esta investigación se establecen 2 fases

Fase I: Laboratorio (Elaboración de la curva de madurez)

Elaboración de 17 cilindros de 6" de diámetro y 12" de altura según la ASTM C-192, para lo cual se requerirá un aproximado de 0.20m³ de concreto.

Se seleccionaran 2 especímenes para medir la madurez del concreto según la ASTM C-1074, dentro de los cuales se introducirán sensores para poder tomar las lecturas de temperatura-tiempo, los cilindros restante se deberán curar para ser ensayados a las edades siguientes: 1, 3, 7, 14, 28 días. De acuerdo a la norma ASTM C-39.

Cada día de los antes mencionados se evaluaran 2 especímenes cilíndricos cuya diferencia en resistencia no debe exceder el 10% caso contrario se ensayara un tercer cilindro para validar los datos de resistencia obtenidos.

El concreto a utilizar en esta fase debe ser del mismo diseño de mezcla que el concreto con el que se llevara a cabo el colado de las losas de concreto en el proyecto. Se elaborara una gráfica que contenga en el eje de las abscisas los datos de Madurez tomados de los cilindros instrumentalizados con el

equipo pertinente, en las ordenadas se colocaran los datos de resistencia obtenidos de los ensayos de cilindros según la ASTM C-39.

En esta etapa se pretende realizar la calibración de la mezcla, por lo que se obtendrá una ecuación logarítmica de la gráfica que relacione las variables de madurez versus resistencia.

La ecuación obtenida en esta fase se tomara como base para la medición de resistencias en campo, por lo que la ecuación será introducida al software cuya función será arrojar al mismo tiempo datos de madurez y resistencia de concreto.

Fase II: Campo

La fase I demora 28 días, lo cual se realizara 28 días o un poco más antes, que se llegue a iniciar el colado de la carretera.

Se embeberán los sensores en el pavimento de concreto de tal manera que se puedan evaluar según la ASTM C-1074, de la misma manera como se avaluaron los especímenes.

Se colaran 3 cilindros y 3 vigas en el día que se realice el colado, con la finalidad de ser comparados los $f'c$ obtenidos de ellos con los que se obtendrán del concretado de la calle.

CAPITULO 2

CAPITULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Conceptos sobre madurez

Madurez

- La función de madurez en términos del factor temperatura-tiempo corresponde al área bajo la curva temperatura vs. tiempo de una mezcla de concreto.
- La extensión del desarrollo de una propiedad en una mezcla de cemento.
- Es el Producto acumulado del tiempo por la temperatura.

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.

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.

Temperatura de referencia o Datum:

Es la temperatura que es restada de la temperatura medida en el concreto mediante el cálculo del factor temperatura – tiempo.

Gradientes de Temperatura:

Se llama gradiente de temperatura a las distribuciones disperejas de temperatura en diferentes zonas de la masa de concreto. Cuando se coloca concreto masivo (como en grandes cimentaciones, presas o pavimentos) los efectos termodinámicos del proceso de curado así como la geometría de la estructura puede causar Un diferencial de temperatura suficientemente grande puede causar agrietamiento del concreto, reduciendo la durabilidad de la estructura.}

2.2 Pruebas alternativas para la determinación de la resistencia mecánica del concreto.

2.2.1 Fabricación y curados de Cilindros en obra ASTM C-31

Para la realización del ensayo a compresión del concreto, se moldean especímenes cilíndricos de ensayo de 4" X 8" (100 X 200 mm) o de 6" X 12" (150 x 300 mrrn), luego se almacenan en campo hasta que el concreto

endurezca, de acuerdo con los requerimientos del ASTM C-31, Prácticas normalizadas para elaborar y curar especímenes de concreto en campo.

Los resultados de resistencia de los cilindros curados en campo se emplean para:

- Determinar el tiempo en el cual la estructura se puede poner en servicio.
- Evaluar la suficiencia del curado y la protección del concreto en la estructura.
- Programar la remoción de formaletas (cimbras) y apuntalamientos.
- Equipo de seguridad apropiado para el manejo de la mezcla concreto en estado plástico.

Es muy importante obtener una muestra de concreto que sea representativa respecto a toda la mezcla. El muestreo debe llevarse a cabo según la ASTM C 172, Prácticas normalizadas para el muestreo de concreto recién mezclado. El tamaño mínimo requerido de muestra es 1 ft³.

Antes de moldear los cilindros:

Cubra la muestra con plástico para proteger el concreto de la evaporación, la luz solar y la contaminación. Lleve la muestra al sitio donde se vayan a realizar los ensayos al concreto en estado plástico. Luego de transportar la muestra al sitio de preparación de los cilindros, re mezcle la muestra dentro de la carretilla. Comience el ensayo de asentamiento, peso unitario, y contenido de aire en los primeros 5 minutos y comience a llenar los moldes

de los cilindros dentro de los 15 minutos siguientes a la obtención de la muestra

Una vez se tengan los moldes llenos según el procedimiento se deben mover los moldes de los cilindros en estado fresco de forma cuidadosa sosteniéndolos por el fondo, se colocan los cilindros en una superficie plana y en condiciones controladas, con una temperatura que oscile entre 16 y 27°C. Cuando la resistencia especificada del concreto es mayor de 6000 psi (40 MPa), la temperatura inicial de curado debe mantenerse entre 20 y 26°C.

Luego se debe sumergir totalmente los cilindros en agua es un procedimiento preferible, (Ver figura 2.1) ya que garantiza resultados de resistencia más confiables. La temperatura de almacenamiento, como en los cuartos de curado, debe ser controlada empleando dispositivos de calentamiento o enfriamiento si es necesario. Las temperaturas máximas y mínimas durante el periodo de curado inicial deben ser registradas y reportadas. En todo caso se deben proteger los cilindros de la luz directa del sol o de otras fuentes de calor.



Figura 2.1: preparación y curado de cilindros de concreto en campo

Fuente: Guía Concrete In Practice CIP#34 de la National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)

2.2.2 Determinación Del Esfuerzo a compresión en cilindros ASTM C-39.

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión al cilindro moldeado o núcleo a una razón que está dentro del rango prescrito antes de que la falla ocurra. El esfuerzo de compresión del espécimen es

calculado dividiendo la carga máxima obtenida durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen.

2.2.2.1 Procedimiento De Determinación de Resistencia a La Compresión.

- Después de tener los especímenes en un curado húmedo por los días requeridos para que alcance su resistencia máxima.
- Se procede a determinar la resistencia a compresión de los especímenes a diferentes días durante su curado
- Se coloca el espécimen dentro de la maquina en las bases correspondientes y se comienza a cargarla hasta que esta llega a su límite de resistencia a compresión y se rompe. Ver figura 2.2
- Se toman datos de la carga que soporta cada espécimen para luego calcular su resistencia a la compresión.



FIGURA 2.2: Inicio de la falla del cilindro expuesto a esfuerzos de compresión axial.

FUENTE: Guía para la aplicación de método de compresión de cilindros, Universidad de El Salvador.

2.2.3 Cilindros vaciados en sitio ASTM C-873

Esta es una técnica para obtener especímenes cilíndricos de concretos de losas recientemente vaciadas sin la necesidad de perforar para obtener muestras. El método se describe en ASTM C-873 e implica el usar un molde, según lo ilustrado en la figura 2.3 La funda externa se clava al encofrado y se realiza esto para utilizar un molde cilíndrico.

La funda se puede ajustar según los diversos espesores de la losa. Se llena cuando se vacía el concreto en la losa, y el concreto en el molde se permite curar junto con la losa.

El objetivo de la técnica es obtener una muestra de prueba que se ha sujetado a la misma historia termal que el concreto en la estructura. Cuando se desea saber la fuerza sobre el terreno, el molde se quita de la funda y se elimina del cilindro de concreto. El cilindro se cápsula y se prueba en la compresión.

Para los casos en los cuales la relación de transformación del longitud-diámetro de los cilindros es menos de dos, las fuerzas compresivas medidas necesitan ser corregidas por los factores en ASTM C 42.

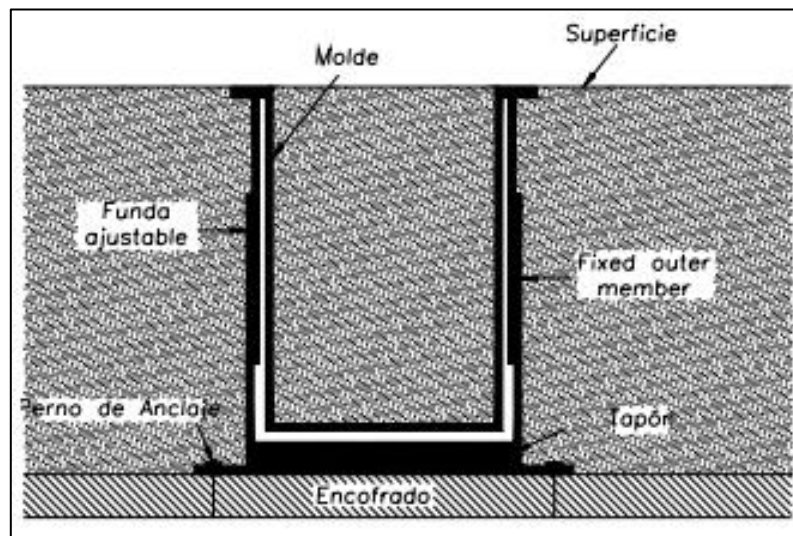


Figura 2.3: Descripción del uso del molde en el proceso de vaciar cilindros in situ.

FUENTE: Tesis de ensayos no destructivos del concreto de la Universidad de Piura, Perú.

2.2.4 Prueba De Extracción ASTM C 900

Es una prueba que mide, mediante un ariete de tensión, la fuerza requerida para desprender una varilla de acero, con un extremo de mayor sección transversal previamente empotrada generalmente de 25 mm de diámetro (ver figura 2.4). Durante la operación se extrae un cono de concreto y la fuerza requerida para ello está relacionada con la resistencia a la compresión del concreto original. La norma ASTM C 900 prescribe el método de prueba, pero aún no se dispone de información adecuada sobre la confiabilidad de la prueba.

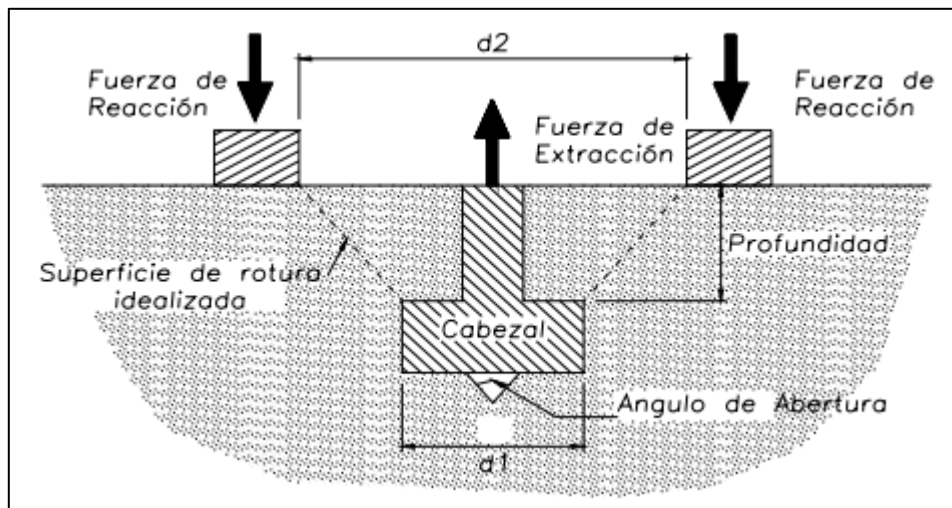


Figura 2.4: Representación Esquemática de la prueba a la Extracción

FUENTE: Tesis de ensayos no destructivos del concreto de la Universidad de Piura, Perú.

Debido a su forma, la varilla de acero se arranca adherida a un trozo de concreto, éste último de forma troncocónica. La resistencia a la extracción se

calcula como la relación de la fuerza de extracción con el área idealizada del cono truncado. En realidad, el concreto está sometido a tensión y a cortante, pero la resistencia a la extracción calculada se aproxima mucho a la resistencia al cortante del concreto.

La relación de la resistencia a la extracción con la resistencia a la compresión disminuye ligeramente al incrementarse el nivel de resistencia, pero para una resistencia dada, es independiente de la edad (Ver Figura 2.5).

No es necesario llevar la prueba de la extracción hasta su término; es posible que baste con aplicar una fuerza determinada a la varilla empotrada y, si no se desprende, suponer que existe la resistencia dada.

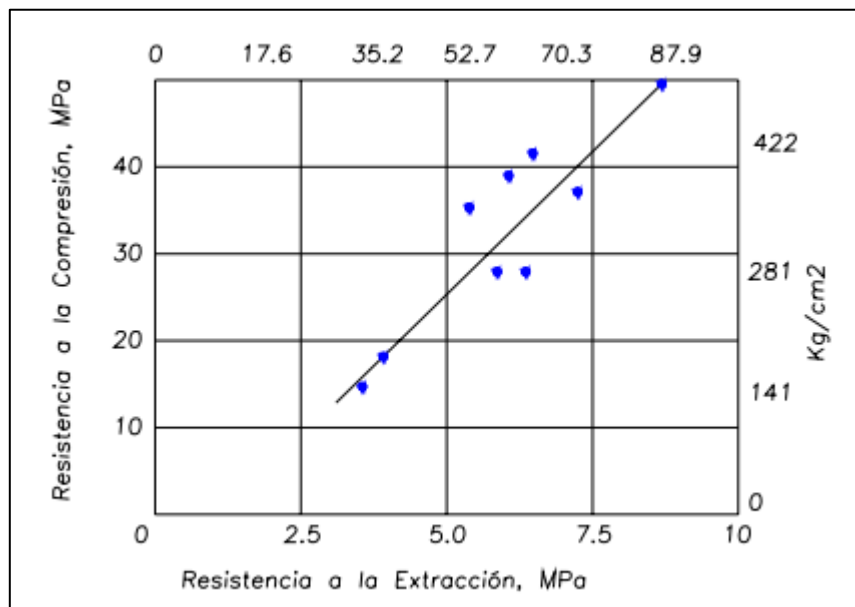


Figura 2.5 Relación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a extracción.

FUENTE: Tesis Ensayos y aplicación de métodos al Concreto endurecido, Universidad Autónoma de México.

La prueba de extracción es superior a la prueba del martillo de Schmidt y a la de resistencia a la penetración, pues la de extracción implica mayor volumen y mayor profundidad de concreto. El aspecto negativo es que hay la necesidad de reparar el concreto. Además, las varillas para la prueba deben situarse antes del vaciado, por lo que la prueba debe ser planeada de antemano. Recientemente se ha intentado desarrollar una prueba de extracción empleando un elemento de acero fijado en un agujero taladrado en el concreto endurecido.

2.3 OPERACIÓN Y MANEJO DEL CONCRETO

2.3.1 Estado fresco del concreto

Las pruebas de concreto fresco, permiten verificar la calidad del mismo, con lo cual se garantiza la obra: además, resultan como una voz de alerta temprana, que permite al contratista revisar sus procedimientos constructivos y plantear mejoras.

Existen pruebas rápidas para analizar la composición del concreto conforme sale de la mezcladora, con ellas se pretende mejorar su uniformidad en la elaboración, verificando y ajustando las proporciones de sus componentes y anticipar las propiedades del concreto endurecido. Dentro de estas las más comunes son los ensayos de:

- Trabajabilidad

- Peso unitario
- Contenido de aire
- Temperatura
- Tiempos de fraguado

Las pruebas normadas más realizadas al concreto en estado fresco se resumen a continuación:

2.3.1.1 ASTM C 1064M (Método de ensayo estándar para la medición de temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado)

Este método de ensayo proporciona un medio para medir la temperatura del concreto fresco. Este puede ser usado para verificar la concordancia con los requisitos especificados para temperatura del concreto.

El Dispositivo Medidor de Temperatura, deberá ser capaz de medir la temperatura del concreto fresco con aproximación de ± 1 °F (± 0.5 °C) dentro de un rango de 30 a 120°F (0 y 50°C). El dispositivo medidor de temperatura requerirá la inmersión de 3 pulg. (75 mm) o menos durante la operación.

La temperatura de la mezcla de concreto puede ser obtenida después de vaciar el concreto, usando las formaletas como recipiente.

Si el equipo de transporte o la colocación en formaletas no son usados como recipientes, una muestra debe ser preparada como se indica a continuación:

- Inmediatamente, antes de obtener la muestra de concreto fresco, humedezca con agua el recipiente.
- Tome la muestra de concreto fresco de acuerdo con la práctica C 172, excepto que no se requieren muestras combinadas si el único propósito para obtener la muestra es determinar la temperatura.
- Coloque el concreto fresco dentro del recipiente.
- Cuando el concreto contenga agregados con tamaño nominal máximo de 3 pulg. (75 mm), puede requerir más de 20 minutos para que la temperatura se estabilice después del mezclar el concreto.
- Coloque el dispositivo medidor de temperatura en la mezcla de concreto fresco de modo que la porción del sensor de temperatura este sumergido un mínimo de 3 pulg. (75 mm). Presione suavemente el concreto superficial alrededor del dispositivo medidor de temperatura de modo que la temperatura del aire ambiental no afecte la lectura.
- Deje el dispositivo medidor de temperatura en la mezcla de concreto fresco por un periodo mínimo de 2 min hasta que la temperatura se estabilice, entonces lea y registre la temperatura.
- Complete la medición de la temperatura en el concreto fresco dentro de los 5 minutos después de obtener la muestra.

2.3.1.2 ASTM 134 Asentamiento y Contenido de Aire:

Cuando el asentamiento y el contenido de aire medidos durante el muestreo preliminar, son menores a la especificación, se deben hacer los ajustes en el sitio de trabajo con agua o aditivos desarrollados, para que se permita un mezclado adecuado. Si por el contrario, las mediciones del asentamiento y del contenido de aire son mayores, se debe realizar inmediatamente un segundo muestreo. Y si esta segunda prueba sigue arrojando valores mayores, se considera que el concreto tiene fallas con respecto a los requisitos especificados.

El asentamiento del concreto se mide de acuerdo con la norma ASTM C 143. La tolerancia para esta norma varía de acuerdo al nivel de asentamiento ordenado o especificado. Las tolerancias para el asentamiento que la norma establece se muestran en la TABLA 2.1. No se establecen tolerancias para el flujo del concreto autocompactable cuya medición se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C-1611.

Asentamiento Especificado	Tolerance
Especificación Asentamiento Máximo	
<3 in. (75 mm)	+0 to -1½ in. (40 mm)
>3 in. (75 mm)	+0 to -2½ in. (65 mm)
Especificación Asentamiento Mínimo	
<2 in. (50 mm)	±½ in. (15 mm)
2- 4 in. (50 - 100 mm)	±1 in. (25 mm)
>4 in. (50 mm)	±1½ in. (40 mm)

Tabla 2.1 : Tolerancias de acuerdo al nivel de asentamiento.

Fuente : Norma ASTM C-94

El contenido de aire se mide de acuerdo al Método de Ensayo Estándar, para determinar por el método de presión, el contenido de aire del concreto recién mezclado ASTM C 143 o por el Método de Ensayo Estándar, para determinar por el método volumétrico el contenido de aire del concreto recién mezclado, para agregados livianos o para agregados con altas absorciones. Para el contenido de aire del concreto, la tolerancia especificada está en el orden de $\pm 1.5\%$.

2.3.2 Transporte del concreto

El transporte entre la planta y la obra se efectuará de la manera más rápida posible, El concreto se podrá transportar a cualquier distancia, siempre y cuando no pierda sus características de trabajabilidad y se encuentre todavía en estado plástico en el momento de la descarga.

En el caso de construcción en tiempo caluroso, se cuidará de que no se produzca desecación de la mezcla durante el transporte. Si a juicio del Supervisor existe tal riesgo, se deberán utilizar retardadores de fraguado y/o efectuará los ajustes necesarios sin alterar la resistencia requerida en el Diseño.

2.3.3 Curado del concreto

Sin un adecuado suministro de humedad, los materiales cementantes en el concreto, no pueden reaccionar para formar un producto de calidad. El secado puede eliminar el agua necesaria para esta reacción química denominada hidratación y por lo cual el concreto no alcanzará sus propiedades potenciales.

Un curado apropiado es importante donde quiera que el concreto es colocado reduciendo el riesgo de obtener resultados pobres. Sin embargo, el curado es especialmente importante cuando colocamos concreto en ambientes secos y cálidos, directamente bajo el sol o bajo condiciones de viento.

2.3.3.1 Sistemas para mantener húmedo el concreto:

- a) Mantas o esteras de algodón o yute humedecidas con una manguera o un aspersor.
- b) Paja que sea rociada con agua regularmente.
- c) La tierra, la arena o el aserrín húmedos se pueden utilizar para curar elementos planos (especialmente pisos).
- d) La aspersión con agua de forma continua es adecuada si la temperatura del aire está bien por encima de la congelación.

No se debe permitir que el concreto se seque entre humedecimientos. Pues ciclos alternativos de humedecimiento y secado no son una práctica aceptable de curado.

- e) Crear un estanque de agua sobre una losa es un excelente método de curado. El agua no debe estar 20° F (11° C) más fría que el concreto y el murete de contención alrededor del estanque debe ser asegurado contra escapes o salideros.

2.3.3.2 Control de la temperatura:

En clima frío no permita que el concreto se enfríe a un ritmo más rápido que 5°F (3°C) por hora para las primeras 24 horas. El concreto debe ser protegido de la congelación, utilizando materiales aislantes, hasta que alcance una resistencia a compresión de 500 libras por pulgada cuadrada como mínimo (3.5 MPa). Cuando las temperaturas de congelación se prevén,

deben ser utilizados los métodos de curado que retienen la humedad, mejor que el curado húmedo. Hay que proteger el concreto contra los cambios rápidos de temperatura después de quitar las medidas de protección.

En clima caliente, una temperatura de curado inicial más alta dará como resultado una ganancia rápida de resistencia y resistencias últimas más bajas. Agua de curado y aspersión pueden ser utilizadas para lograr bajar la temperatura de curado en verano. Debe protegerse contra temperaturas extremas nocturnas, que permitan un enfriamiento más rápido que 5°F (3°C) por hora, durante las primeras 24 horas.

Cemento Tipo I	Cemento Tipo II	Cemento Tipo III
Temperatura – 50° F (10° C)		
6 días	9 días	3 días
Temperatura – 70° F (21° C)		
4 días	6 días	3 días

TABLA 2.2: Ejemplo de periodo mínimo de curado para alcanzar el 50% de la resistencia especificada. (Valores aproximados)

FUENTE: Guia Concrete In Praticce CIP#11 de la *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA)

2.4 PROPIEDADES DEL CONCRETO RELACIONADAS CON EL MÉTODO DE MADUREZ

2.4.1 Temperatura del concreto

La temperatura ejerce una influencia importante en los diferentes estados del concreto, ésta se manifiesta en el proceso de hidratación el cemento, su efecto es cualitativamente el mismo, si la temperatura asciende, las mezclas pierden revenimiento con más rapidez, fraguan más pronto y adquieren resistencia a mayor velocidad; de igual modo, si la temperatura desciende, se producen las manifestaciones opuestas.

El ascenso y descenso de la temperatura en el concreto, muchas veces no acontece de manera regulada o deseada, sino más bien como consecuencia de las características y condiciones de sus componentes, de las estructuras y del medio ambiente. Muchas veces, puede hacerse uso de la temperatura para modificar controladamente el proceso de fraguado y/o de adquisición de resistencia mecánica del concreto, de forma de darle protección en condiciones adversas.

Entre los factores que actúan internamente destacan la temperatura propia de cada uno de los componentes y el calor que se genera como consecuencia de la hidratación del cemento. La temperatura de los componentes se refleja inmediatamente en la temperatura del concreto, y

puede manifestarse como exceso o defecto, con respecto a un intervalo de temperatura deseable; no ocurre así con la temperatura que se debe a la hidratación del cemento que solo actúa en sentido ascendente, y cuya transmisión al concreto no es inmediata. Debido a ello, para fines de modificar rápida y controladamente la temperatura en ambos sentidos (enfriamiento y calentamiento), el medio más común consiste en actuar sobre la temperatura de los componentes, ya sea modificando ésta o incorporando a la mezcla componentes apropiados al efecto requerido.

En clima frío, el concreto colocado resulta más expuesto a enfriarse o sufrir daño a medida que las estructuras son más delgadas; en tanto que en clima caluroso ocurre lo contrario, el concreto en las estructuras más gruesas corre el riesgo de sobrecalentarse por el efecto sumado del calor ambiental y del producido de la hidratación del cemento, el cual tarda más en disiparse. Por tales motivos el comité ACI 306 hace referencia a requisitos y medidas de protección al concreto en clima frío, no solamente en función de la temperatura ambiental sino también del espesor de la estructura mientras que ACI 305 para colados en climas calurosos solo hace referencia a los tipos de construcción más generales.

2.4.2 Fraguado y endurecimiento

El proceso de fraguado describe una sucesión de cambios que normalmente experimenta el concreto desde que se mezcla hasta que se encuentra finalmente colocado y compactado en la estructura. Conforme a lo señalado

en la Figura 2.6, en este proceso evolutivo se distinguen tres principales etapas que corresponden a otros tantos estados característicos del concreto:

1) El lapso anterior al fraguado, durante el cual el concreto se manifiesta como una mezcla relativamente blanda y moldeable, en función con la consistencia con que se elabora.

2) El lapso del fraguado, en cuyo curso la mezcla aumenta progresivamente de consistencia, para convertirse en una masa rígida que ya no es moldeable, pero que aun no adquiere resistencia mecánica apreciable.

3) Lapso posterior al fraguado que corresponde a la etapa del endurecimiento propiamente dicho, en la que el concreto evoluciona para adquirir la resistencia mecánica y además propiedades inherentes.

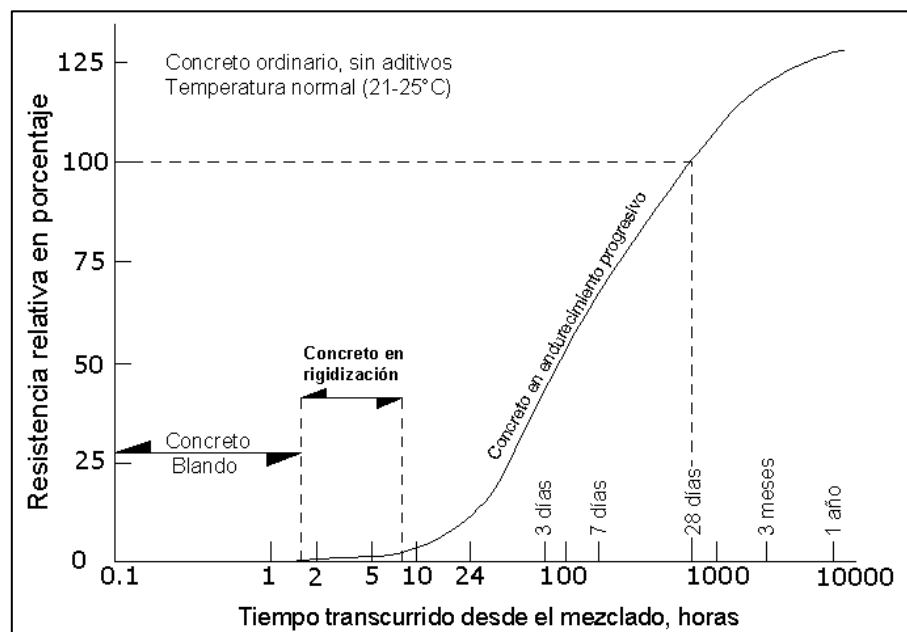


Figura 2.6. Forma usual del avance de la rigidización y endurecimiento del concreto con el tiempo, a temperatura normal. Tomada del Manual de Tecnología del Concreto. Tomo II

Al seguir el proceso de rigidización del concreto en sus dos primeras etapas por el método de las agujas de penetración según norma (ASTM C-166/ASTM C-403) Se obtiene una evolución como se presentan gráficamente en Figura 2.7. El concreto puede ser moldeado o pre moldeado sin perjuicio mientras su grado de consistencia y rigidez se conserva inferior al de un cierto estado definido por una resistencia a la penetración igual a 35 Kg/cm², el cual se designa como estado de fraguado inicial o del límite de compactación por vibración; de esta manera, la adquisición de dicha resistencia a la penetración representa el final de la primera etapa y el principio de la segunda.

Conforme al mismo método de prueba, se considera que cuando el concreto alcanza una resistencia a la penetración igual a 280 kg/cm², es síntoma de haber llegado a un completo estado de rigidización que se designa como fraguado final y en el cual su resistencia a la compresión es muy reducida pues suele hallarse en el orden de los 7 kg/cm² aproximadamente. Para fines prácticos se considera que esta resistencia a compresión es nula y que a la adquisición de una resistencia a la penetración de 280 kg/cm² representa el estado en que el concreto comienza a adquirir endurecimiento propiamente dicho, es decir esta resistencia a la penetración define simbólicamente el final de la segunda etapa y el principio de la tercera.

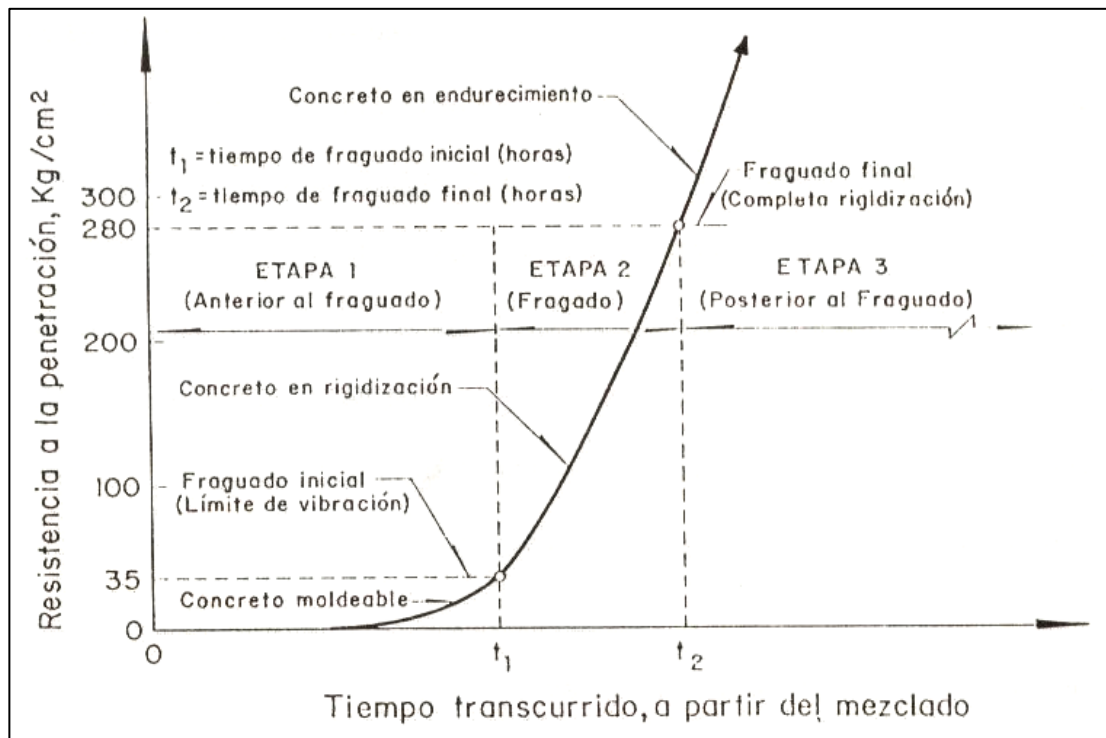


Figura 2.7. Delimitación de etapas en el proceso de cambio de estado del concreto, seguido por medio de su resistencia a la penetración. (ASTM C-403).

Fuente: Manual de Tecnología del Concreto. Editorial Limusa Noriega México 1994. CFE-UNAM)

Al entrar el concreto a la tercera etapa es cuando propiamente comienza la formación del tejido filamentosos producto de la hidratación, o gel de cemento, que endurece la pasta (ver Figura 2.8) y que a su vez la capacita para aglutinar las partículas de los agregados dándole resistencia mecánica a la masa de concreto.

Esta tercera y última etapa debe prolongarse hasta que todo el cemento se hidrate, a menos que se interrumpan las condiciones de humedad y temperatura que son propicias para el desarrollo de su hidratación. Debido a

que la adquisición de resistencia mecánica es un buen índice del avance del proceso de hidratación, el seguimiento del endurecimiento en la tercera etapa suele hacerse mediante la determinación de su resistencia a compresión en especímenes representativos.

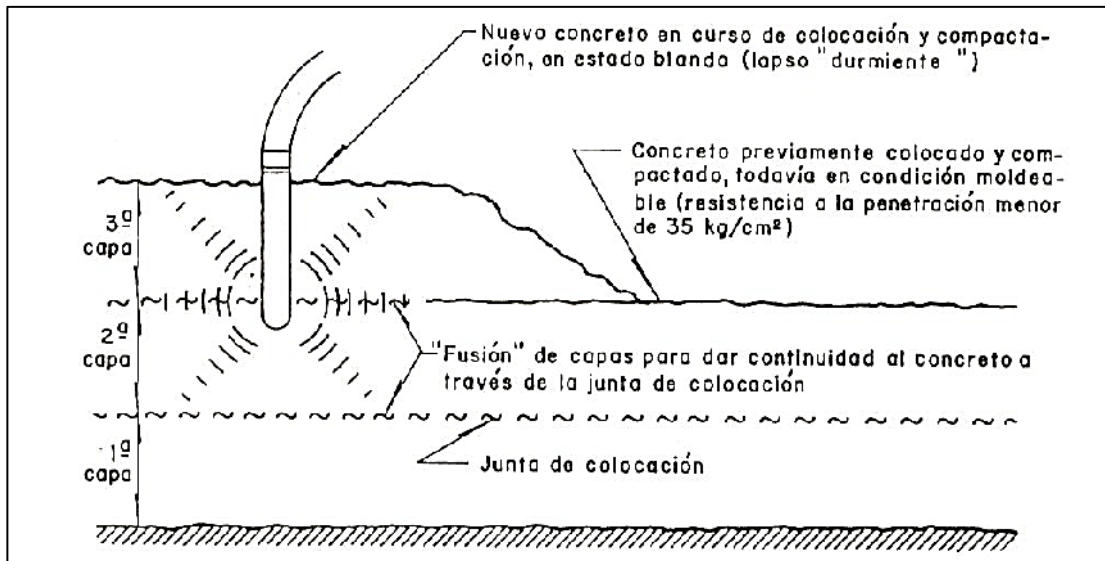


Figura 2.8. Ejemplo De Re Compactación Del Concreto Antes Del Fraguado Inicial.
Fuente: Manual de Tecnología del Concreto. Editorial Limusa Noriega México 1994.
CFE-UNAM

Definida de tal modo, la evolución de la resistencia a compresión del concreto durante los primeros doce meses de la tercera etapa debe mostrar una tendencia como la que se indica en la Figura 2.9 que es aplicable al concreto convencional hecho con cemento Portland sin aditivos y curado en condiciones normales de humedad y temperatura. Si se les asigna un valor de 100% a la resistencia que se obtiene al año, (como representativa de la

resistencia potencial) en dicha figura se observa que en el transcurso del primer mes el concreto adquiere el 80% de esa resistencia. Por esa razón y tomando en cuenta lo prolongado e impreciso en la conclusión de esta última etapa, es usual en estructuras ordinarias considerar que al mes (28 días exactamente) el concreto ha endurecido lo suficiente para presentar el servicio requerido. Este grado de endurecimiento es adoptado para fines de cálculo estructural y de identificación de propiedades del concreto endurecido; lo que implícitamente significa delimitar y utilizar una fracción inicial de la tercera etapa, sin tomar en consideración la evolución posterior.

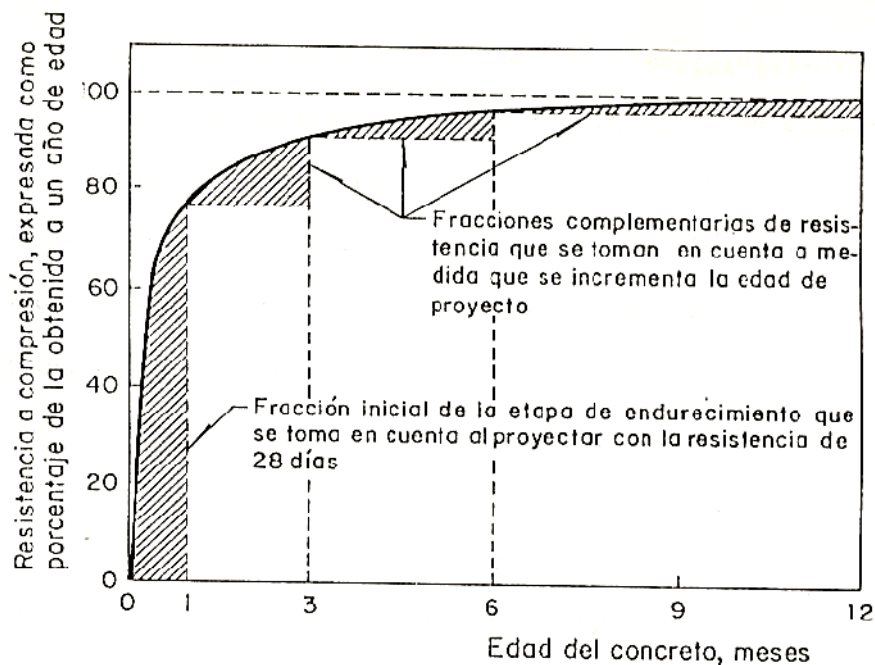


Figura 2.9. Evolución De La Resistencia A La Compresión Del Concreto Durante La Etapa De Endurecimiento En Condiciones Normales De Humedad Y Temperatura. Fuente: Manual de Tecnología del Concreto. Editorial Limusa Noriega México, 1994. (CFE-UNAM)

2.4.4 Diseño de la 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.

2.4.5 Calor de hidratación

El concreto genera calor durante su endurecimiento como resultado del proceso químico, por el cual el cemento reacciona con el agua para formar una pasta dura y estable. El calor generado se denomina calor de hidratación; varía en cantidad y en velocidad según distintos cementos Portland. La generación de calor y su acumulación son afectados por el volumen de concreto, temperatura del aire, temperatura inicial del concreto, relación agua-cemento, composición y finura del cemento, cantidad de cemento y los aditivos. Las unidades en que se mide el calor de hidratación son kJ/kg (Kcal/kg).

En algunas estructuras, como ocurre con aquellas de masa considerable, la cantidad de calor generado es de mucha importancia. Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable en la temperatura del concreto. Esto puede ser indeseable, puesto que después del endurecimiento a una elevada temperatura, el enfriado no uniforme en el concreto hasta alcanzar la temperatura ambiente puede crear esfuerzos indeseables debido a contracción térmica. Por otra parte el aumento en la temperatura del concreto provocado por el calor de hidratación es a menudo beneficioso en climas fríos puesto que ayuda a mantener temperaturas de curado favorables. El calor de hidratación se obtiene de acuerdo al ensayo que describe la norma ASTM C186.

2.5 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.

2.5.1 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 cuándo 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.

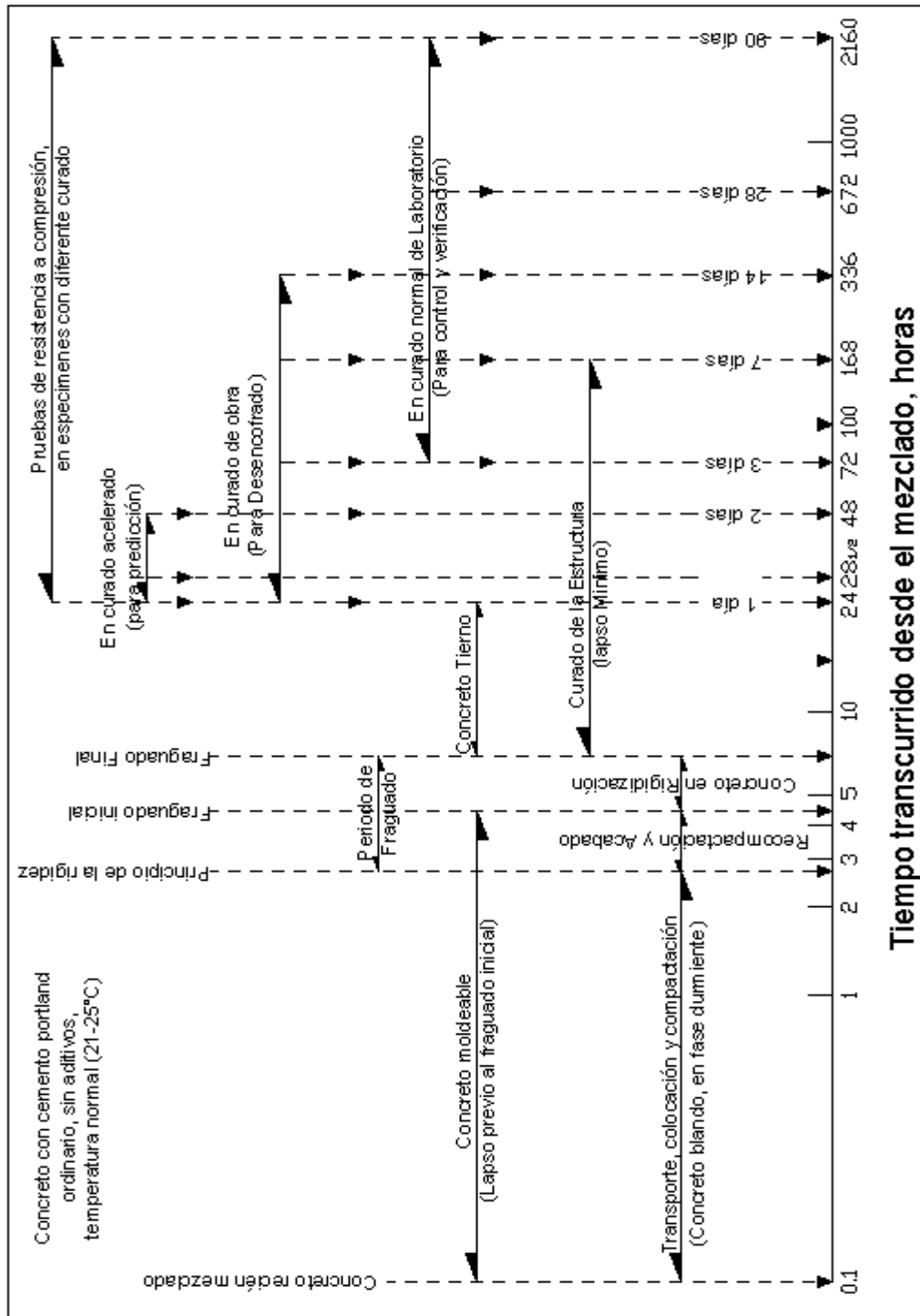
El desarrollo del periodo de endurecimiento puede prolongarse durante meses o años, mientras subsista en el concreto alguna porción de cemento anhidro, en condiciones de ser hidratado. Sin embargo, en ningún momento puede descartarse la posibilidad de que la completa hidratación del cemento, y el correspondiente 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.



Tiempo transcurrido desde el mezclado, horas

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

2.5.2 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 —durmientell, 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.

2.6 Madurez del concreto

2.6.1 Concepto de madurez.

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. El método de madurez asume que “dos muestras de concreto con la misma madurez tendrán la misma resistencia, aunque cada una pudo haber sido expuesta a diversas condiciones de curado” (Figura 2.11).

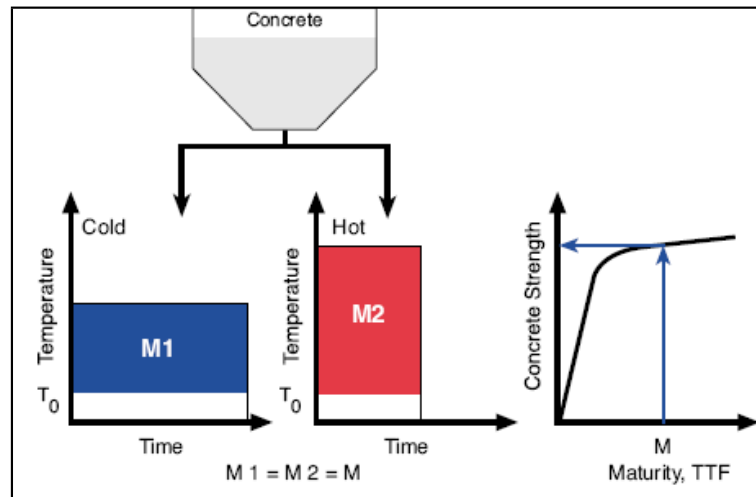


Figura. 2.11: Evaluación de la Madurez del concreto bajo dos distintas temperaturas de curado. Tomado de IPRF-01-G-002-03-6

Las condiciones de temperatura bajo las cuales fragua y endurece un cilindro de concreto son muy distintas de las condiciones bajo las que el concreto

endurece y gana resistencia en la estructura. A pesar de que el material provenga de la misma colada, el concreto en la estructura puede alcanzar temperaturas muy superiores a las del cilindro debido a las diferentes condiciones de generación y disipación de calor, estas diferencias se traducen en evoluciones de resistencias también diferentes. Las figuras 2.12 y 2.13 exponen las discrepancias en la evolución de resistencias tanto a temprana como larga edad, de un concreto proveniente de la misma colada pero que ha evolucionado bajo condiciones de temperatura distintas.

El impacto de las condiciones térmicas sobre la velocidad de hidratación y la evolución de resistencia de un concreto puede ser de dos a tres veces o más como lo demuestran los valores de la figura 2.12 obtenida por Carino y Tank a muy temprana edad. La temperatura de un cilindro bajo condiciones normalizadas puede ser de esta forma cercana a los 20 °C durante las primeras horas (o menos) mientras que la estructura puede alcanzar perfectamente 40 °C (curva superior). De este modo, a las 16 horas la resistencia medida en los cilindros es de 80 kg/cm², mientras que la resistencia del mismo material en la estructura es de 180 kg/cm². Esta enorme diferencia a temprana edad entre concretos iguales que evolucionaron bajo condiciones térmicas distintas se reduce a larga edad como lo demuestra la figura 2.13. Para efectos de poner rápidamente al servicio una estructura, desencofrado rápido, reparaciones, etc., los cilindros pueden subestimar en muchos casos la resistencia real del material en la estructura.

Por este motivo se utilizan los principios de madurez para determinar la resistencia del material in situ (ACI- 228). La norma ASTM C 1074 expone los principios del método antiguo de madurez, sin embargo este método ha sido superado por la tecnología y hoy en día en vez de usar aproximaciones teóricas y extrapolaciones hechas en laboratorio, existen dispositivos (DSTA) que monitorean directamente la evolución térmica de la estructura y la reproducen en moldes de cilindros especiales. Los cilindros termoseguidores copian las condiciones térmicas del material de la estructura y se fallan a una edad determinada, mostrando una resistencia más aproximada a la de la estructura que la de los cilindros curados bajo condiciones estandarizadas.

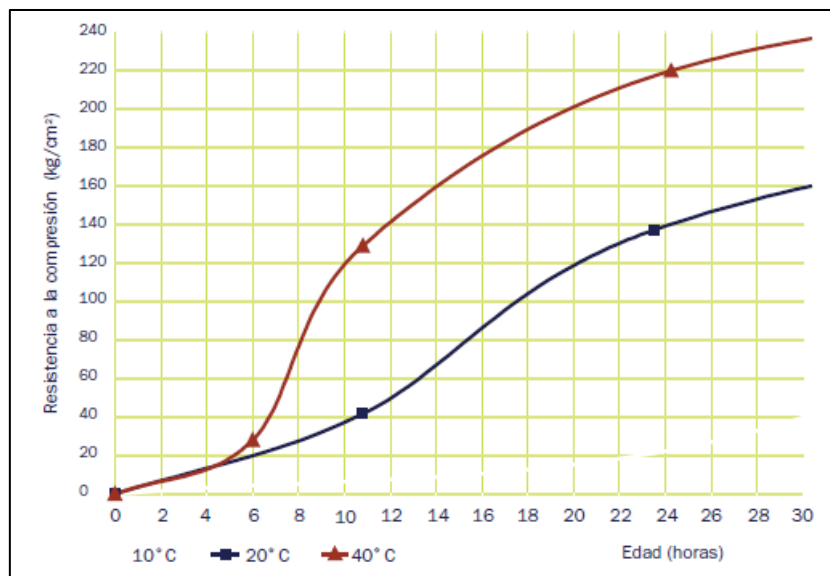


Figura 2.12 Evolución de resistencia de un concreto bajo diferentes condiciones de temperatura a Edad Temprana

Tomado: Rate constant Functions for Strenght development of Concrete, Tak.R., Carino .N., ACI Material Journal JanuaryFebrary 1991)

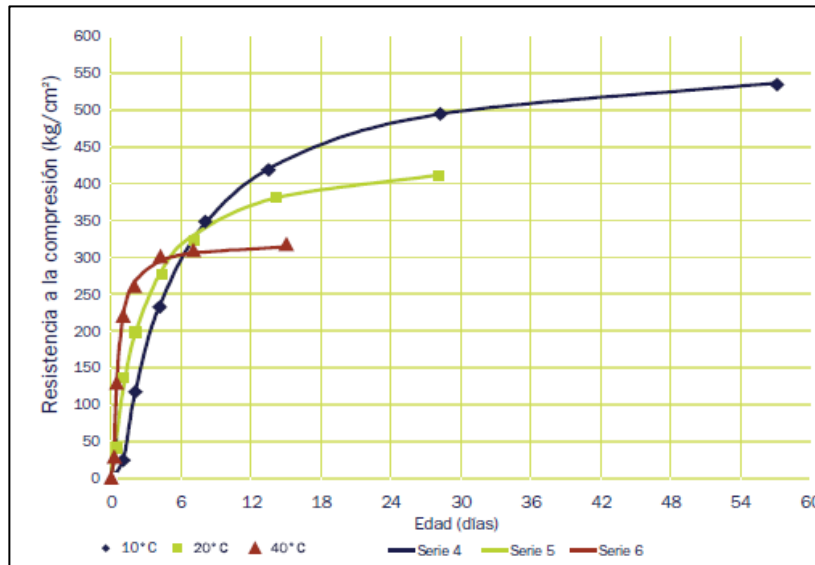


Figura 2.13 Evolución de resistencia de un concreto bajo diferentes condiciones de temperatura a Edad Prolongada.

Tomado: Rate constant Functions for Strenght development of Concrete, Tak.R., Carino .N., ACI Material Journal JanuaryFebrary 1991)

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.

2.6.2 Antecedentes del método de madurez

Desde comienzos de 1950 investigadores ingleses identificaron la gran influencia de la temperatura sobre la evolución de la resistencia del concreto.

Durante esa época se dedujo que la temperatura del material estaba directamente relacionada con la cantidad de hidratos generados y estos, a su vez, con la resistencia del mismo. De esta forma aparece el concepto madurez que se funda en la historia térmica del material.

El corazón del método se basa en la relación fundamental entre las tasas de reacciones químicas y la energía, es decir (temperatura) de las moléculas implicadas en la reacción (ya que las reacciones químicas proceden más rápidamente a temperaturas elevadas). La aplicación de esta ley a las complejas reacciones químicas en el concreto se ha demostrado una y otra vez tanto en el laboratorio y de campo durante muchas décadas. Como resultado de los esfuerzos para la transferencia de tecnologías por la administración federal de la carretera (FHA por sus siglas en inglés), 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 2.14, por el percance murieron catorce obreros y 34 resultaron heridos. La oficina nacional de los estándares (NBS por sus siglas en inglés) fue pedida por la administración ocupacional de la seguridad y sanidad

(OSHA por sus siglas en inglés) determinar la causa técnica del derrumbamiento.



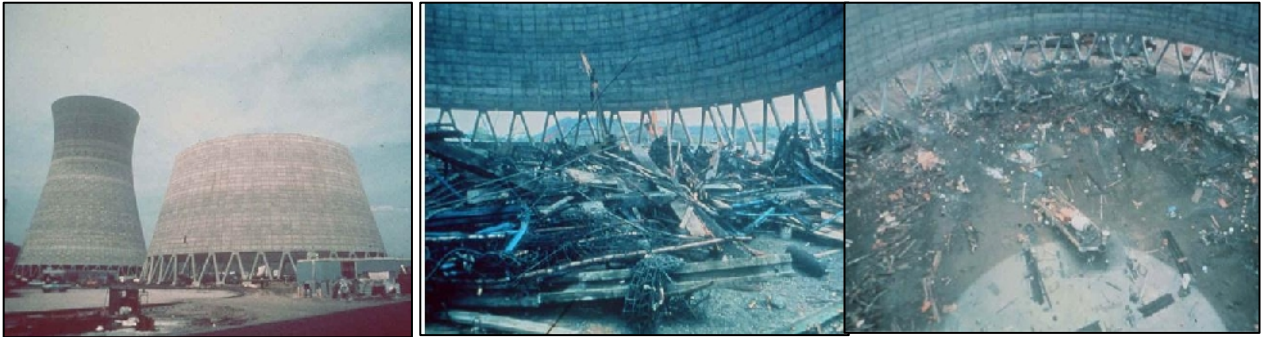
Figura. 2.14 Colapso de un segmento del edificio debido al retiro prematuro del encofrado.

Photo courtesy of the National Institute of Standards and technology.

Los investigadores identificaron una losa de piso de cuatro días de edad, que había sido sometido a un promedio temperatura ambiente de sólo 7 °C como máximo era causa probable del accidente, ya que a bajas temperatura el concreto adquiere resistencia muy lentamente (Cariño y Lew 2001).

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 2.15a y 2.15b). El

accidente produjo la muerte de 51 trabajadores que estaban en el sistema de andamio anclado al cascarón parcialmente terminado.



(a)

(b)

Figura. 2.15: Colapso de una torre debido a la aplicación de cargas a edades tempranas, en la imagen (a) se observa la torre previa al colapso y en la (b) resultado del colapso.

Tomado de NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY / April 28, 1978

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.

Como resultado, la NBS identificó el método de la madurez como una alternativa viable medios para estimar la resistencia del hormigón sometido a diferentes temperaturas de curado (Cariño, 1984; Carino y Lew 2001). Esto, a su vez, condujo a la creación de la primera norma en el mundo (ASTM C1074) para estimar la resistencia del hormigón a través del método de madurez (Cariño y Lew 2001).

Como parte del Programa de Investigación Estratégica de Carreteras (SHRP) en la década de 1990, los Administración Federal de Carreteras (FHWA), recomendó la madurez como una disposición tecnológica para la estimación in-situ del desarrollo de la resistencia del hormigón en las estructuras carreteras (Cariño y Lew 2001).

La FHWA ahora rutinariamente demuestra la aplicación del método de madurez del concreto a personal de transporte federal, estatal y local a través de su Laboratorio de Concreto.

Aplicaciones realizadas del concepto de la Madurez en la construcción del EUROTUNEL entre Francia a Inglaterra a principios de los Noventa para predecir con alto grado de exactitud el momento en el cual el concreto lanzado en las paredes del túnel adquiriría la resistencia requerida, así como para determinar las condiciones mecánicas del concreto, sin necesidad de romper cubos en el ensayo resistencia a la compresión, tanto en los sectores lanzados como en los tramos prefabricados, permitieron que este proyecto realizara un estricto control y un monitoreo en cualquier instante de la calidad

y de las especificaciones más probables del concreto colocado "in situ", con el consecuente ahorro en las fases de programación respecto de los sistemas convencionales, mejorando así notablemente el nivel de confiabilidad de la verificación del cumplimiento de especificaciones del concreto, optimizando los tiempos y tecnificando los sistemas de aseguramiento y control de calidad en obra. Múltiples aplicaciones e investigaciones a nivel mundial han sido realizadas en cuanto al Método de la Madurez, entre las que están:

- El control de Pavimentos de concretos en el Estado de Iowa, Michigan, Indiana, Texas, New York y Washington en los Estados Unidos desde 1989 (Departamentos de Transporte e Instituto Nacional de estándares y tecnología NIST - National Institute of Standards and Technology), Canada-Quebec por el Ministerio de Transporte.
- Control del concreto construcción de líneas del metro de Kioto y reconstrucción en Kobe, Japón desde 1990 (Aoki construction). Y aplicaciones en los proyectos del túnel Townline, Welland y por el Departamento de Energía, Minas y recursos de Otawa en Canadá, desde 1975.
- Investigaciones en las Universidades de Wisconsin (Malhotra), Iowa (Carino), Otawa, Cornell, Pittsburgh (Ragdy), China (Guo Cheng Juo), entre otras, han permitido corroborar la importancia del concepto de la madurez y control térmico en la planeación y desarrollo racional de proyectos de construcción.

Recientemente, una aplicación del método de madurez fue requerido para la reconstrucción del puente Webbers Falls en Oklahoma. El Puente Webbers, sobre el río Arkansas, se derrumbó el 26 de mayo de 2002 después de ser golpeado por una embarcación. El puente fue reconstruido y reabierto al tráfico en julio, 29, a sólo 47 días después. El método de madurez jugó un papel fundamental en medir el tiempo de remoción del encofrado para columnas de soporte y otros elementos de la subestructura. En algunos casos, el desencofrado era posible en un tiempo de tan solo 13 horas. Un sistema de recolección de datos computarizado se utilizó en dicho proyecto. Ver figura 2.16.



Figura 2.16: Puente Interstate-40. Webber Fall.

a) Foto aérea del puente Webbers Falls, a raíz de la colisión.

b) El puente sobre el río Arkansas en Webbers Falls vuelve a abrir el 29 de julio de 2002, a solo 47 días después de que las reparaciones fueron hechas luego de una colisión de barcos en mayo del mismo año.

En la actualidad el método de madurez es muy utilizado en la industria de la construcción y está amparado por las normas ASTM C1074 y C918, ACI 318, 228, 308, FHWA SA 97-105, AASHTO T276.

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 en la figura 2.17.

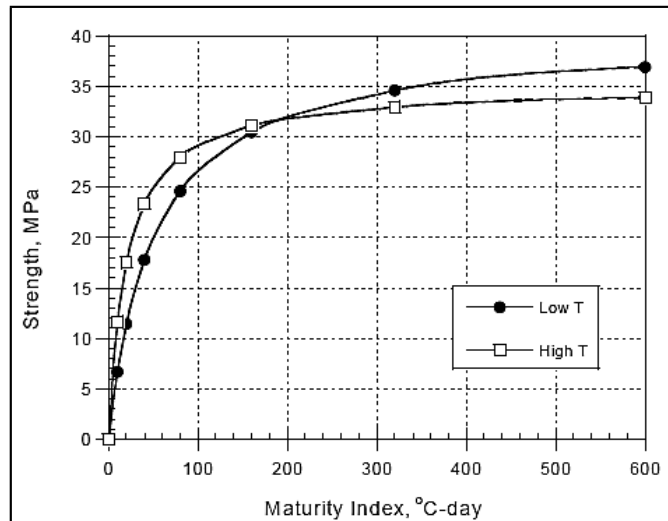


Figura. 2.17: Efecto crossover en dos mezclas de concreto a diferentes temperaturas a edades tempranas, durante el desarrollo de la Relación Resistencia – Madurez.

Tomado de National Institute of Standards and Technology

2.6.3 Reglamentación y 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.

El contenido básico de la norma ASTM C 1074 es:

- Terminología.
- Funciones de madurez.
- Procedimiento para desarrollar relaciones resistencia madurez.
- Procedimiento para estimar la resistencia del concreto in-situ.
- Determinación del datum de temperatura y la energía de activación.

Los pasos más sobresalientes que plantea la normativa consisten en desarrollar primero un diseño de mezcla que se planee utilizar en el proyecto (pavimento o estructura). Luego, colar y curar 17 cilindros en el laboratorio usando esta mezcla, con sensores embebidos en el centro de dos de estos cilindros +/- 15 mm. 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 que el rango de resistencia a compresión de los 2 cilindros excede el 10% de su resistencia promedio), y así contar con valores de resistencia a

compresión para la respectiva madurez. Llamándosele a este proceso calibración de la mezcla, Figura 2.18 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.

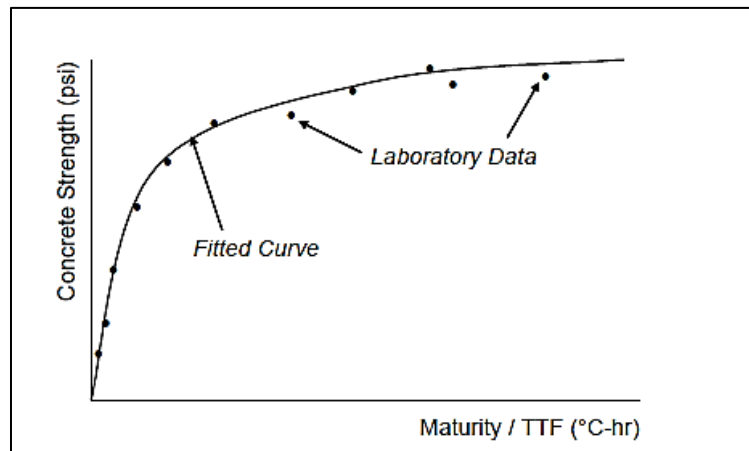


Figura 2.18 Relación entre la madurez y su resistencia a la compresión.

Fuente: IPRF-01-G-002-4

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 son discutidos en la norma ASTM C1074.

En la actualidad el método de madurez es muy utilizado en la industria de la construcción y está amparado por las normas:

- **ASTM C1074** - Práctica estándar para la estimación de la resistencia del hormigón por el método de madurez.
- **ASTM C918 y AASHTO T276** - Método de prueba estándar para medir la resistencia a la compresión a edad temprana y la proyección de resistencia a edades posteriores.
- **ACI 318** – Requisitos de Reglamento para concreto estructural.
- **ACI 228** – Métodos para estimar la resistencia del concreto.
 - **2.7. Maturity Method**
- **ACI 214** – Prácticas recomendadas para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto.
- **ACI 308** – Práctica estándar para el curado del concreto.
- **FHWA SA 97-105 (Administración Federal de carreteras)** – Guía para ensayos no destructivos del concreto.

2.6.4 Fundamentos teóricos del método de madurez

El método para calcular o evaluar la madurez es una técnica no destructiva de estimación de resistencia que se usa en mediciones de tiempo y temperatura para determinar en tiempo real la ganancia de resistencia del concreto colocado, basado en las características del concreto que gana resistencia gradualmente al producirse la reacción exotérmica entre el agua y el material

cementante, dependiendo la resistencia generada para una mezcla específica, del grado de hidratación y de la temperatura interior del concreto.

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.

Los efectos del tiempo y la temperatura en el aumento de resistencia del concreto cuantifican como función de la madurez, que es indicativa de cuanta resistencia el concreto ha desarrollado. Dos funciones de madurez son usadas comúnmente para este propósito, la función Nurse-Saúl y la función Arrhenius, las cuales se describen a continuación.

2.6.4.1 Teoría de Nurse-Saúl (Factor tiempo-temperatura TTF)

En 1949, R.W. Nurse propuso un método para estimar la ganancia de resistencia del concreto basado en una ecuación lineal que relaciona velocidad de hidratación a la temperatura. En 1951, A. G. A. Saúl vincula esta función la madurez a la resistencia a la compresión; lo que él le llamo Ley de la ganancia de la resistencia con 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 función Nurse-Saúl es una de las teorías más utilizadas en América y asume que la velocidad de reacción química en concreto se incrementa linealmente con la temperatura. 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.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad \text{Ecuacion 2.1}$$

Donde:

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

El índice calculado por la Ecuación 2.1 es denominado madurez, sin embargo, la terminología actual es el factor temperatura-tiempo o por sus siglas en ingles **TTF** según ASTM C 1074.

La figura 2.19 muestra un historial esquemático de la temperatura y del factor temperatura-tiempo según la Ecuación 2.1

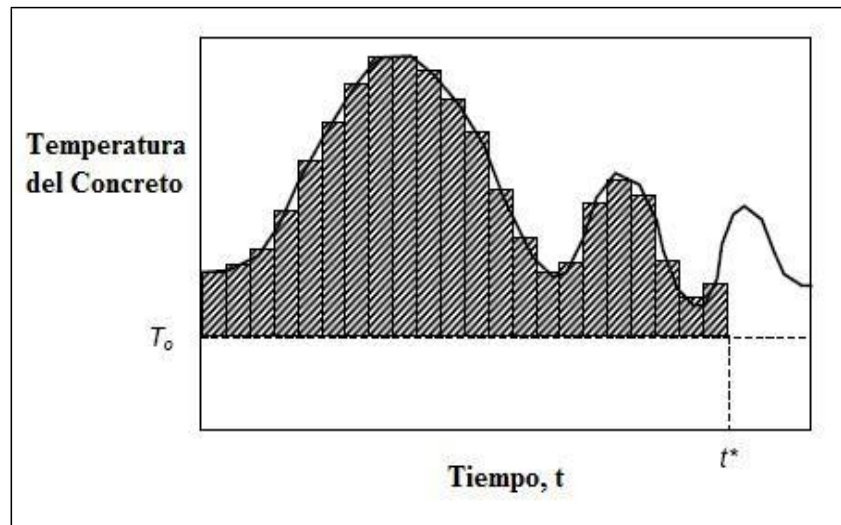


Figura. 2.19 Área bajo la curva, equivale a la madurez del concreto en un tiempo t , limitada por la temperatura del concreto y el datum de temperatura.

Tomado de The Maturity Method: From Theory to application. Carino and Lew 2001

El factor temperatura-tiempo en una cierta edad iguala el área bajo la curva entre la temperatura y el datum, definiendo este último 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, alternativamente el T_0 puede ser determinado para una un diseño de mezcla en específico siguiendo el procedimiento descrito por ASTM C 1074 Anexo A1.

La ecuación 2.1 se fundamenta en el principio de que el índice inicial de desarrollo de resistencia es una función lineal de temperatura [Carino 1984, 1991].Tiempo después de la introducción de la ecuación 2.1 se observó que

esta aproximación lineal no podría ser válida cuando las temperaturas de curado varían sobre un amplio intervalo. 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.

2.6.4.1.1 Datum de temperatura T_0

La explicación teórica de la temperatura Datum o temperatura de referencia es "la temperatura de una mezcla de concreto por debajo del cual todas las reacciones de hidratación cesan". En teoría, cuando la temperatura del hormigón cae por debajo de la temperatura de referencia, no se produce aumento adicional de resistencia, por lo tanto, no hay ganancia neta en la madurez registrada por la ecuación 2.1

La temperatura de referencia puede depender del tipo de cemento, del tipo y la dosificación de aditivos y otros factores que afecten la razón de hidratación y el rango de temperaturas que el concreto experimente cuando endurece. Para cemento Tipo I sin aditivos y en un rango de temperatura de curado de 0° a 40°C, la temperatura que recomienda la ASTM C 1074 en el apéndice X1.2 es 0°C. Para otras condiciones y cuando se desea la máxima precisión

de estimación de la resistencia, la temperatura de referencia apropiada puede ser determinada experimentalmente de acuerdo a los procedimientos dados en el Anexo A1 del mismo estándar.

Para concretos retardante, aquellos que adquieren resistencia muy lentamente debido a las temperaturas muy bajas, aditivos o materiales puzolánicos, el uso de -10 ° C. Concretos con alta resistencia inicial en New Jersey usan como datum +6.5 ° C.¹

Sea cual sea la temperatura dato de que se elija, la curva de predicción y la madurez de la estructura debe utilizar el mismo valor.

2.6.4.2 Teoría de Arrhenius (Edad Equivalente)

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:

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t \quad \text{Ecuacion 2.2}$$

¹ FHWA-NJ-2002-003 "Implementation of concrete maturity meters" December 2002.

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 Δt en grados Kelvin.
- T_r : Temperatura absoluta de referencia

Usando la ecuación 2.2, 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 2.2 eliminó en gran parte las discrepancias entre las relaciones de resistencia - madurez desarrollada con diversas temperaturas de curado inicial.

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 2.2 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 se requieren los siguientes pasos:

1. Elaboración de especímenes y curados bajo diversas temperaturas.
2. Determinación de la resistencia a compresión a intervalos regulares de tiempo.

3. 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.
4. Grafique los logaritmos naturales de la razón constante versus el inverso de la temperatura de curado en grados Kelvin.
5. Determine la mejor tendencia de la ecuación de Arrhenius 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 2.25 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 determinó Arrhenius.

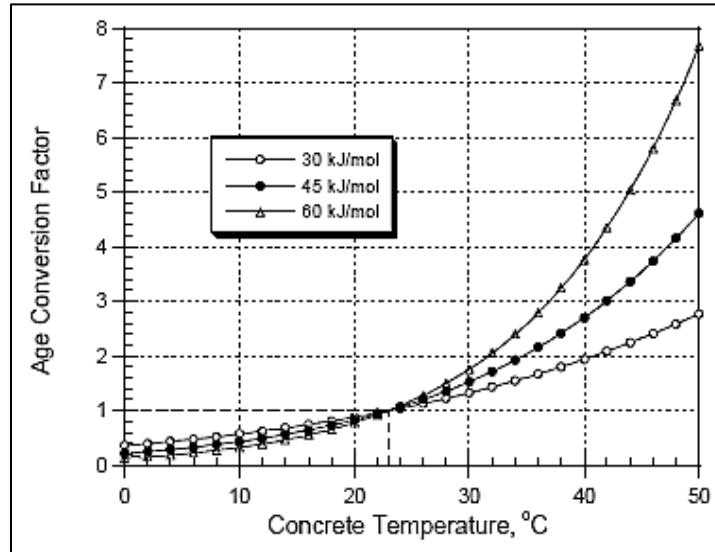


Figura. 2.20 Factor de conversión de la edad para diversos valores energía de activación aparente. Tomado de National Institute of Standards and technology

La idea de la energía de activación fue propuesta por Svante Arrhenius en 1888 para explicar por qué 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:

$$k = A e^{\frac{-E}{RT}} \quad \text{Ecuacion 2.3}$$

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 Δt en grados Kelvin

La ecuación 2.3 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].

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 más 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.

De acuerdo con Cariño (2004), la ecuación de Arrhenius es una mejor representación de la función de tiempo y temperatura que la ecuación de Nurse-Saúl, cuando una amplia variación en la temperatura del concreto se espera. Por otra parte, el enfoque de Nurse-Saúl se limita a que se supone que la tasa de ganancia de fuerza es una función lineal. Sin embargo, la metodología Nurse-Saúl es más ampliamente utilizada en Estados Unidos en gran parte debido a su simplicidad. Ambas funciones de madurez se describen en la norma ASTM C1074.

2.6.4.3 Comparación de Nurse-Saúl y Arrhenius

En cuanto a la ecuación de Arrhenius, los expertos reconocen que su modelo exponencial proporciona una representación teóricamente más exacta de la temperatura de la dependencia de la hidratación de reacciones que se producen en concreto (Cariño y Lew 2001). Esto es debido al hecho de que Las reacciones químicas tienden seguir una ley de velocidad exponencial con respecto a la temperatura, más que el modelo lineal asumido por la ecuación de Nurse-Saúl. Aun así, la hidratación de los materiales cementicos dentro de una masa de concreto implica muchos diferentes reacciones químicas, cada una incrementando arriba y hacia abajo de manera diferente y en diferentes momentos en todo el proceso de curado y teniendo cada uno su propia energía de activación única. Como tal, el uso de un único valor aparente energía de activación para caracterizar la dependencia de la temperatura en

la ganancia de resistencia del concreto para todas las condiciones de curado puede, a veces, ofrecer resultados bastante inesperados o no deseados. Esto es debido a que la energía de activación aparente es la variable significativa en el exponente y la energía de activación es dependiente de cada reacción química y, por tanto, dependiente del tiempo como también de la hidratación del concreto. El dependencia natural del tiempo naturaleza con la energía de activación aparente fue bien documentado por Abdel-Jawad (1988) y en consecuencia lógica las reacciones químicas diferentes se están produciendo en diferentes momentos en el proceso de hidratación del concreto genera su propia energía de activación.

El resultado neto de la naturaleza exponencial de energía de activación aparente es que las pequeñas las variaciones en la energía de activación aparente pueden efectuar grandes cambios en los cálculos del valor de madurez. Este efecto es entonces exacerbado por la naturaleza dependiente del tiempo y la energía de activación aparente. Estas variaciones en los valores de madurez pueden dar lugar variaciones en la resistencia estimada del concreto. A veces, estas variaciones pueden estar del lado conservador. Sin embargo, en otras ocasiones estas variaciones pueden ser poco conservador y, como tal puede, conducir a condiciones indeseables (por ejemplo, la carga del pavimento antes de lograr la resistencia requerida).

En resumen, la energía de activación varía a lo largo del proceso de curado (aplicaciones de compuestos químicos sobre la capa superficial) y/o durante toda la vida de un proyecto (como materiales de cemento con diferentes productos químicos composiciones y/u otras características de calidad puede ser suministrado a lo largo del tiempo de construcción del proyecto, incluso cuando los materiales se reciben de la misma "fuente"). acción aparente para la mezcla de hormigón no puede ser precisamente determinada antes de tiempo y la energía de activación aparente puede

Esta incertidumbre acerca de la "verdadera" energía de activación de la mezcla de concreto crea una situación en la cual uno no puede saber si los cálculos de madurez correspondientes son conservadores o poco conservadores y, posteriormente, si las estimaciones de resistencia mediante madurez son conservador poco conservador. En forma similar, pero menos de una forma menos severa, el método de Nurse-Saúl puede, a veces, ser poco conservador. El impacto es por lo general menos grave debido al hecho de que el método de Nurse-Saúl asume una relación lineal en vez de una relación exponencial entre las velocidades de reacción de temperatura y la hidratación.

2.6.5 Equipos para medición de madurez.

Debido a que la madurez depende sólo de la historia de tiempo y temperatura del concreto, los requisitos de los equipos más básicos para

la determinación de la madurez son un termómetro y un reloj. Sin embargo, el uso de este equipo básico consume tiempo y es poco práctico. Con los años, diversos dispositivos de madurez se han desarrollado que automáticamente vigilar y registrar la temperatura del pavimento como una función del tiempo. Estos dispositivos se conectan a unos terminales mediante cables embebidos en el concreto fresco y puede ser programado para calcular la madurez ya sea por la ecuación Nurse-Saúl o la ecuación de Arrhenius.

En los últimos años han experimentado transformaciones significativas en el uso de microprocesadores para aplicaciones de madurez del pavimento. Estos microprocesadores son pequeños e independientes incrustados en el concreto plástico para registrar y almacenar de forma automática la temperatura del concreto en los intervalos definidos por el usuario. El intervalo de tiempo registrado será de $\frac{1}{2}$ hora o menos para las primeras 48 h y 1 h o menos para después. Los datos pueden ser descargados por el usuario en cualquier momento, algunos incluso por medios inalámbricos.

Los equipos de medición de madurez 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 2.3):

CALIBRACION DE MEZCLA	
<p>Una unidad para medir la resistencia a la compresión del concreto de acuerdo a ASTM C 39 (AASHTO T 22), si se realizan pruebas de</p>	
<p>Un dispositivo para medir la resistencia a la flexión de las muestras de viga de hormigón, siguiendo ASTM C 78 (AASHTO T 97), si se realizara una correlación</p>	
MEDICIÓN DE MADUREZ (APLICACIÓN DEL MÉTODO)	
<p><i>Sensor de Temperatura</i></p> <p>Debe medir las temperaturas dentro del rango de -20 °C a 100 °C, con una precisión de $\pm 1^\circ$ C. Las medidas que se registrarán al menos cada media hora</p>	


<p>Dispositivo de almacenamiento. (Pocket PC)</p>	
<p>Sistema de Cálculo</p>	<ul style="list-style-type: none"> - COMMAND CENTER - IntelliRock TM - i-QT® - iButtons® - HIPERPAV - Concrete Monitoring Software (Wireless technology)

Tabla 2.3 Componentes de un equipo de madurez

2.6.5.1 Sensor de Temperatura

Dos diferentes tipos de sensores de temperatura se utilizan en la medición de la madurez, las termocuplas (termopares) y termistores. Sea cual sea el tipo de sensor de temperatura que se emplee, debe cumplir con la norma ASTM C1074, que establece que el sistema de medición de temperatura deberá tener una precisión de ± 1 °C. Un termopar se compone de dos alambres de metal disímiles soldadas entre sí en un extremo (referido como la unión "caliente") y conectado a un circuito eléctrico en el otro extremo (referido como la unión "fría" o unión de referencia). Los cables producen una diferencia de voltaje siempre que la temperatura de la unión caliente es diferente a la temperatura de la unión fría.

Los termistores son resistencias sensibles a la temperatura. Para medir la temperatura real del termistor, su resistencia se mide y se convierte a continuación en la temperatura utilizando curva de conversión resistencia temperatura preestablecida. Esta calibración de conversión es realizada típicamente por el fabricante.

2.6.5.2 Localización típica de sensores.

Sin tener en cuenta el tipo de equipo usado, los sensores de temperatura deben ponerse en las ubicaciones críticas dentro del hormigón, en términos de condiciones de exposición y requerimientos estructurales.

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.

Las ubicaciones de los sensores (termocuplas o termistores) para las aplicaciones de madurez de pavimentos de hormigón dependen de cómo se usarán los datos.

Se presentan a continuación algunas pautas de las ubicaciones generales [ACPA 2002]:

- Los sensores colocados en la mitad de la losa son útiles para determinar la resistencia promedio de la losa y los tiempos apropiados por abrir el tránsito.
- Los sensores colocados dentro de 1" (2.5 centímetros) de la superficie puede usarse para determinar el tiempo de corte de juntas.
- Los sensores deben ser colocados por lo menos 2 pies (0.6 m) fuera del borde de la losa.
- Los sensores deben ser colocados en intervalos entre 500 y 1000 pies (150 y 300 m) a lo largo de la longitud del pavimento para responder a las variaciones en tiempo de la colocación y proporcionar estimaciones de los tiempos óptimos de acerrado de juntas en cada intervalo o sección.
- Los sensores se colocan a menudo en estacas o armaduras que están ancladas en la base, previo a las operaciones de pavimentación permitiendo la colocación del sensor a la profundidad deseada.

2.6.6 Proceso de prueba de madurez.

El método de madurez es una propuesta relativamente simple para estimar la resistencia del hormigón in situ, basada en el desarrollo térmico del mismo y en una relación resistencia/madurez previamente establecida. Con la utilización de sensores colocados dentro del hormigón, este método da ventajas importantes cuando se usa en conjunto con, o en vez de, técnicas tradicionales de ensayo destructivas. Hasta ahora, lo más común ha sido hacer ensayos en terreno con probetas elaboradas con la misma mezcla de

hormigón usada en el proyecto. Pero estas pruebas, muchas veces, no reflejan fielmente la resistencia del hormigón en el interior de la estructura, debido a que hay diferencias de colocación y desarrollo térmico entre las probetas y la estructura.

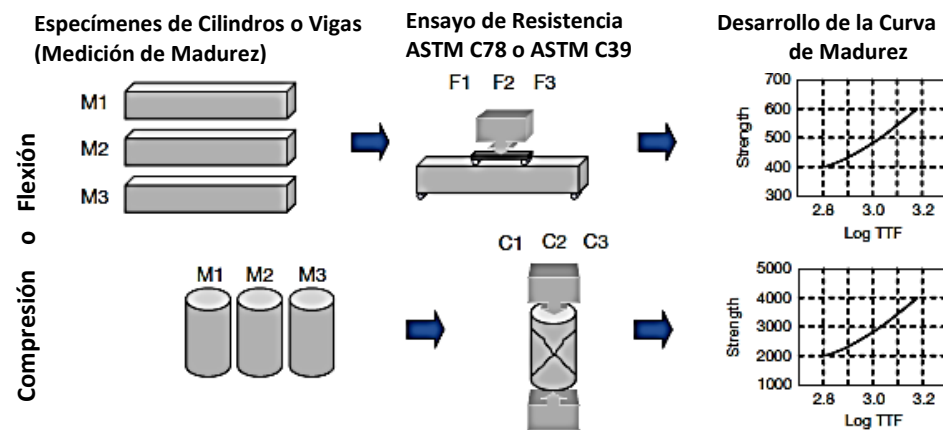
Los procesos de prueba de madurez consisten esencialmente en dos pasos:

(Figura 2.21)

1. Desarrollar la curva de madurez.
2. Medición de la madurez en in-situ.

Con esta información las propiedades del concreto en la obra pueden ser monitoreadas y evaluadas a edades tempranas y en tiempo real.

PASO 1. Desarrollo de la curva de madurez para la mezcla de concreto.



PASO 2. Medición de la madurez del concreto in-situ.

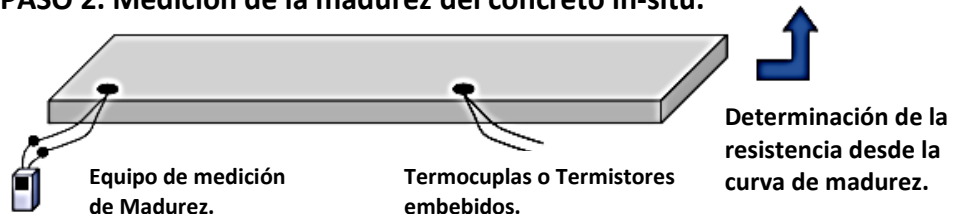


Figura 2.21 Proceso de Ensayo de Madurez.

Fuente: ACPA "Prueba de Madurez en pavimentos de concreto: Aplicaciones y beneficios" IS257P 2002.

2.6.6.1 Desarrollo de la curva de calibración.

El desarrollo de la curva de calibración de madurez para cualquier mezcla de hormigón dada puede hacerse en el laboratorio antes de la construcción del pavimento actual; alternativamente, puede ser realizada en el campo al principio de la construcción del pavimento. En cualquier caso, deben usarse los materiales específicos del proyecto porque las curvas de la calibración son dependientes de las características de la mezcla específica; cualquier cambio en el material origen, en las proporciones de la mezcla, o en el equipo de mezclado requiere el desarrollo de una nueva curva de la calibración.

La calibración para cada diseño de mezcla específica se lleva a cabo normalmente en un entorno de laboratorio.

Sin embargo, el hormigón utilizado para el lote de calibración puede ser producido en el laboratorio o en el campo. Independientemente de cómo el hormigón se dosifica, la calibración las muestras deben ser curados en condiciones controladas de temperatura y humedad (como especificado en la norma ASTM C192).

Los pasos generales en el desarrollo de una curva de madurez se describen a continuación:

1. Moldear como mínimo 15 probetas de vigas o cilindros, estando seguro de ensayar el contenido de aire y el asentamiento. Generalmente se prefieren los cilindros porque ellos son más fáciles manejar y porque hay menos

variabilidad asociada con los resultados de ensayos de resistencia a compresión comparados a los resultados de ensayos de resistencia a flexión.

2. Embeber los sensores de temperatura dentro de ± 15 mm. del centro de por lo menos 2 probetas. Conectar los sensores a los instrumentos de madurez o a los equipos de registro de temperatura. Estas probetas no se ensayarán pero se usarán para evaluar la madurez de las mismas.

Un método para ayudar en el posicionamiento propio del sensor es insertar una barra rígida de pequeño espesor en el centro del cilindro fresco. La barra empujará a un lado interfiriendo a las partículas de agregado. Luego de que la barra y el sensor se insertan en el cilindro, la cara del cilindro moldeado deberá ser golpeada con un martillo de goma o barra de compactar asegurándose de que el hormigón entre en contacto con el sensor.

3. Se realizará el curado de las probetas de acuerdo a ASTM C192.

4. Realizar ensayos de compresión a edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. Ensayar 2 probetas a edad temprana y computar la resistencia promedio. Si el rango de resistencia a compresión de las 2 probetas excede el 10 % de su resistencia promedio, ensayar otro cilindro y computar el promedio de los tres ensayos. Si el resultado del ensayo bajo es debido a una probeta defectuosa, desecharlo. Ver figura 2.22

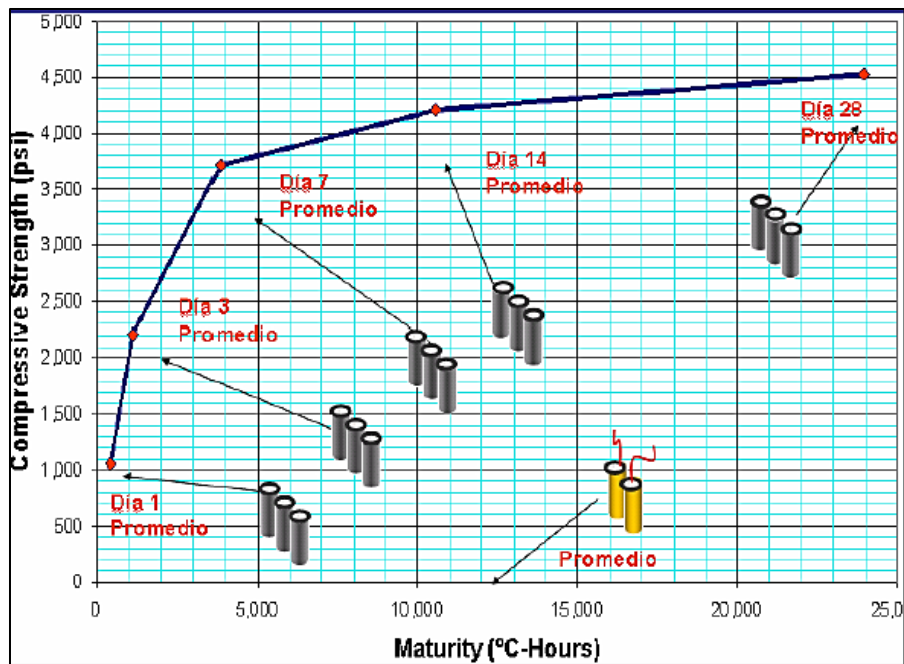


Figura 2.22. Resumen De Proceso De Calibración.

Fuente: Revista ISCYC N° 53 Año 14.

A edades tempranas de ensayo, registrar el índice de madurez para las muestras instrumentadas.

_ Si se usan instrumentos de madurez, registre el promedio de los valores exhibidos.

_ Si se usan registros de temperatura. Evalúe la madurez de acuerdo a la ecuación de Nurse-Saúl o a la ecuación de Arrhenius. Use un intervalo de tiempo de $\frac{1}{2}$ hora o menos de las primeras 48 horas del registro de la temperatura.

5. Trazar la resistencia a compresión promedio como una función del valor promedio del índice de madurez. Dibujar la curva mas adecuada con los

datos. Utilizando la función de línea de tendencia de Excel, ajustar una curva logarítmica a través de estos puntos, mostrando la ecuación y el R^2 .

La ecuación tendrá la forma: Resistencia a Compresión = $B \ln(\text{Madurez}) + A$ y es la relación madurez-resistencia a ser usada para estimar la resistencia de la mezcla de concreto en específico curada bajo otras condiciones de temperatura. R^2 debe exceder de 0.95.

La ecuación anterior es exactamente la forma en que Plowman⁽²⁾ recomienda en la década de los 50, excepto que utiliza el logaritmo natural, en vez del logaritmo base 10. Para los fines del método madurez, y para estimar la resistencia, B es un coeficiente que está relacionado con la velocidad inicial de aumento de la resistencia, $\ln(M)$ es el logaritmo natural de la madurez y, A, es un coeficiente que se relaciona con la relación a/c, el factor de cemento, y el tipo de cemento y quizás la temperatura. Estudios indican que todas las relaciones resistencia-madurez tienen una similitud significativa independiente del tipo de cemento o la temperatura. Ver figura 2.23.

² Plowman, J.M., "Maturity and the Strength of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 8(22), page 13-22, 1956

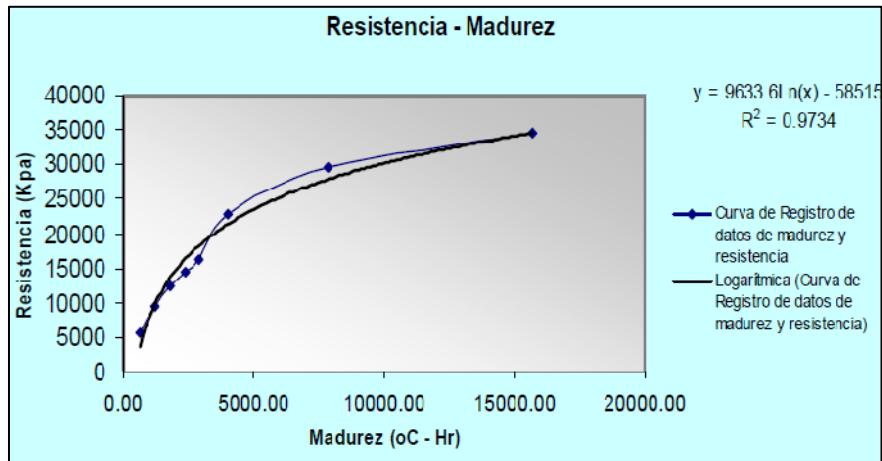


Figura 2.23. Ejemplo de línea de tendencia logarítmica para calibración de mezcla

2.6.6.2 Estimación de la resistencia in-situ.

En el campo, los sensores (termopares o microprocesadores) se instalan en la losa de pavimento en lugares descritos en la sección anterior y cuando se requieran valores de temperatura/madurez se conectan al dispositivo de madurez para extraer los datos. Las mediciones de madurez se toman a intervalos regulares, y la madurez del hormigón es monitoreada. La resistencia en el lugar del pavimento, puede estimarse utilizando la curva de calibración previamente desarrollada. Ver Figura 2.24

Los sensores están conectados a los instrumentos de madurez o dispositivos de grabación de temperatura que se activa tan pronto como sea posible después de la colocación del concreto. Cuando una estimación de la resistencia se desea, el índice de madurez del instrumento madurez se lee o el índice de madurez es evaluada desde la los registros de temperatura. Utilizando los valores de madurez y la relación previamente

establecida, resistencias a la compresión en las ubicaciones de los sensores se estiman. Debido a que la historia de la temperatura es la única medición realizada en el campo, no hay garantía de que el hormigón en el lugar tiene las proporciones de la mezcla correcta. Por lo tanto, la norma ASTM C 1074 requiere la verificación de la resistencia potencial del hormigón en el lugar antes de realizar las operaciones esenciales, tales como la eliminación de encofrado o postensado. De lo contrario esto puede llevar a consecuencias drásticas en el caso de errores de procesamiento de batchadas que pasan desapercibidos, como el uso de cantidades excesivas de los reemplazos de cemento o aditivos retardantes.

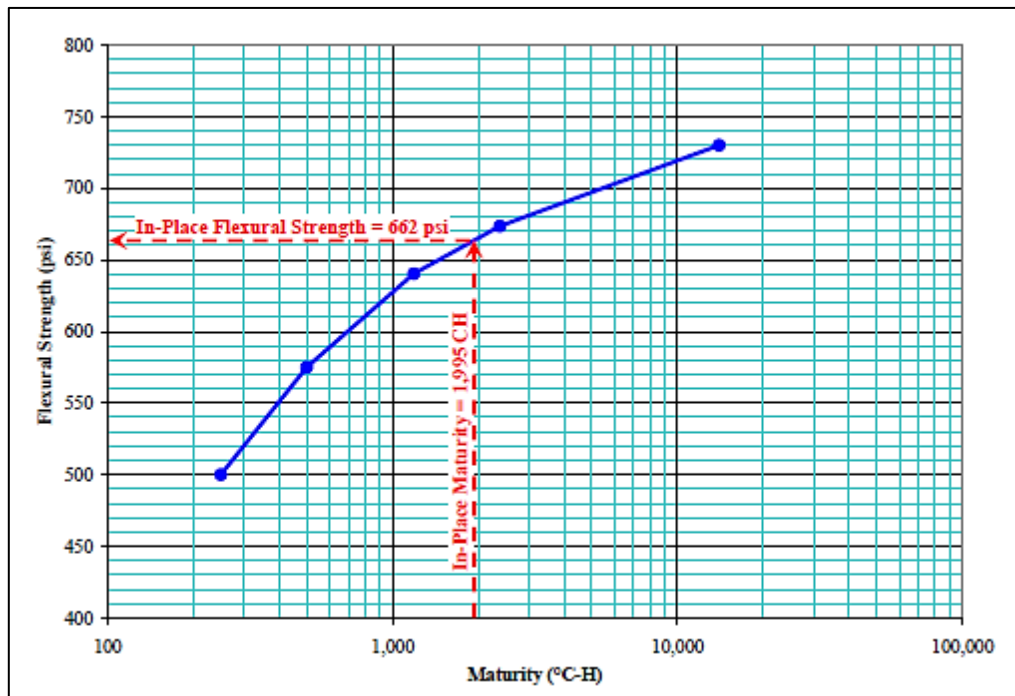


FIGURA 2.24- Estimación De La Resistencia Mediante El Índice De Madurez. Tomado: Aplicación Del Ensayo De Madurez En Pavimentos De Hormigón. V. Mechura. UTN Facultad Regional La Plata..

El hormigón debe ser el mismo que se utilizó para desarrollar la relación resistencia-madurez. La temperatura a la que el ensayo se va a hacer no debe variar en más de 20 ° C más baja que la temperatura a la cual se determinó la curva de resistencia-madurez. Esto se debe a que una estimación de resistencia con un cambio de temperatura a más de 20 °C podría resultar dudosa, sin el refinamiento continuo. En tales casos, una nueva curva resistencia-madurez debe ser desarrollada cerca de la temperatura necesaria, a menos que se puede demostrar que la relación resistencia-madurez todavía es válida a temperaturas más bajas.

2.6.6.3 Verificación de la Curva de Madurez.

La verificación de la relación resistencia-madurez es el proceso mediante el cual se confirma que la ecuación estimada previamente es aplicable al pavimento de concreto.

Puesto que los materiales, el rendimiento de los equipos de mezclado, y las condiciones de la construcción pueden variar con el tiempo, es importante verificar la relación de la resistencia-madurez. Las pruebas de validación se deben realizar cada vez que existan cambios significativos en el proceso de dosificación o se sospecha las materias primas. Sin embargo, incluso en el caso de que pequeños ajustes sean intencionalmente puestos al diseño de la mezcla, una completamente nueva relación resistencia-madurez puede o puede no ser necesario.

Una vez al mes, las pruebas de validación deben llevarse a cabo por el constructor o supervisor para determinar si la resistencia del hormigón está siendo adecuadamente representada por la curva de madurez actual.

Hay dos métodos para verificar la curva de madurez:

- a) Supervisar la madurez de las probetas moldeadas durante la construcción y comparar estas resistencias con la curva de madurez, o

- b) Estimar la resistencia in-situ usando otros métodos
 - Cilindros curados en campo ASTM C31 y ensayados mediante ASTM C39
 - Pull-Out (Prueba de extracción) ASTM C900
 - Break-Off. ASTM C1150
 - Cilindros vaciados en sitio. ASTM C873
 - Resistencia a la penetración. ASTM C803
 - Prueba de pulso ultrasónico. ASTM C597

La curva original se considera válida si el promedio de los ensayos realizados por cualquiera de los métodos antes descritos en el literal b, son:

- Para la validación de resistencia a la flexión - dentro de 0,34 MPa (50 psi) de la curva de madurez original.
- Para la validación de resistencia a la compresión – dentro de 3,4 MPa (500 psi) de la curva de madurez. Si el valor medio no cumple con ese criterio (el

promedio de las pruebas es superior o inferior), una curva de madurez nuevo debe ser desarrollada.³

La ASTM C1074 recomienda que la curva puede ser considerada válida si los promedios de resistencia de los valores de verificación están dentro del 10% de la relación original.

A continuación se escritura el método de validación por el método a).

Para determinar si una nueva relación se requiere, una validación de dos puntos puede llevarse a cabo. El siguiente paso a paso muestra el protocolo para realizar una validación de dos puntos de la relación resistencia-madurez.

- 1.** Seleccione la parte de la curva de resistencia-madurez de mayor importancia para el proyecto (por ejemplo, 697 ° CH, correspondiente a 600 psi, MR=42 kg/cm²).
- 2.** Elabórese un mínimo de siete ejemplares viga usando el diseño de la mezcla ajustada o que se desconoce su validez.
- 3.** Instrumentalizar uno de los especímenes de viga con un sensor de madurez.
- 4.** Pruébense al menos tres (3) ejemplares vigas a un valor algo menor que la madurez del valor seleccionado en la Etapa 1 (por ejemplo 400 ° C-H).
- 5.** Pruébense al menos tres (3) ejemplares vigas a un valor algo mayor que la

³ ACPA: Maturity Testing of Concrete Pavements: Applications and Benefits

madurez el valor seleccionado en la Etapa 1 (por ejemplo 1.000 ° C-H).

6. En una escala semi-logaritmica, trazar la media de cada conjunto de tres vigas frente a su resistencia correspondiente junto con la relación anterior de resistencia-madurez (como se muestra en las figuras 2.25 y 2.26).

7. Si ambos puntos se encuentran por encima de la relación resistencia-madurez previamente establecida, pero su línea proyectada corta a la anterior curva (como se muestra en la Figura 2.35), la curva anterior puede ser utilizado en toda la gama de valores de madurez cubiertos por la validación de dos puntos (por ejemplo 400 a 1.000 ° C-H). Fuera de este intervalo, la curva anterior se debe utilizar con precaución y cautela - una relación posterior y específica de madurez puede ser necesaria-.

8. Si ambos puntos de validación caen claramente por encima de la relación anterior de madurez y su proyección no intersectan la curva anterior (como se muestra en la Figura 2.25), la curva anterior es de confianza.

9. Si ambos puntos de validación de caer debajo de la curva, la relación anterior no puede ser utilizada. Una nueva relación resistencia-madurez debe ser establecida.

10. Si uno de los puntos cae por debajo de la curva de resistencia-madurez y el otro queda por encima, la validación de dos puntos no es concluyente. Otra validación de dos puntos se deberá realizar

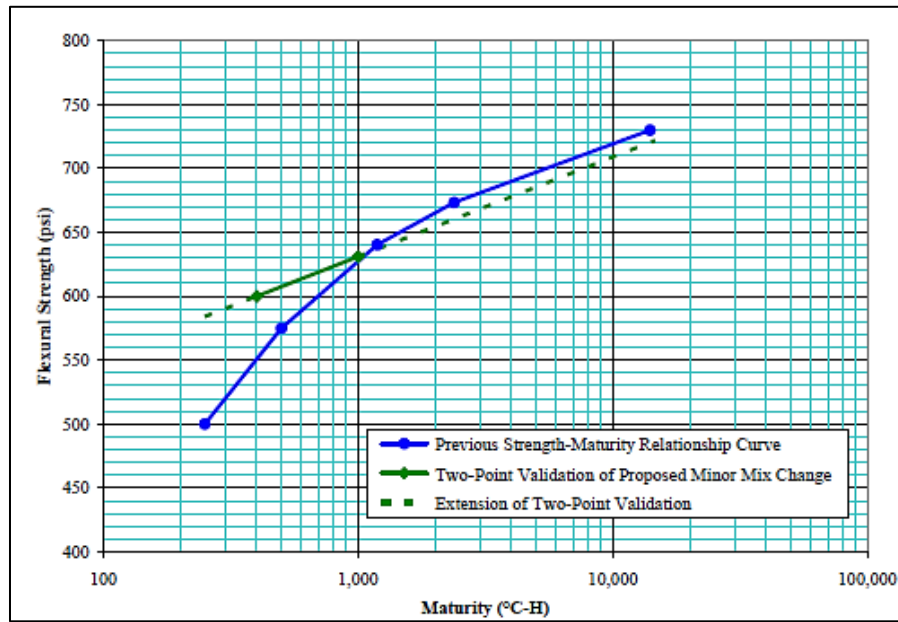


FIGURA 2.25 Ejemplo De Validación De Dos Puntos Cuando Caen Encima De La Relación Resistencia-Madurez Anterior Y Se Extienden Hasta Intersectar La Curva Anterior.

Tomado: Report IPRF-01-G-002-03-6

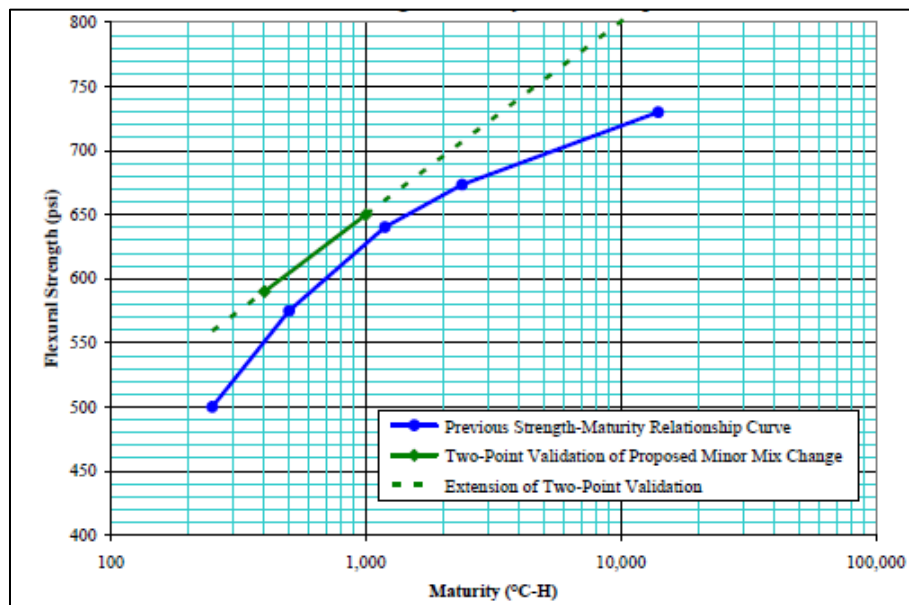


Figura 2.26 Ejemplo De Validación De Dos Puntos Cuando Caen Encima De La Relación Resistencia-Madurez Anterior Tomado: Report IPRF-01-G-002-03-6

2.6.6.4 Precisión y fuentes de error.

Esta sección trata sobre las fuentes específicas de error que potencialmente pueden influir en la exactitud y fiabilidad de las mediciones de resistencia a la compresión-flexión, a partir de su madurez. Aunque algunas de estas fuentes de error son peculiares para el método de la madurez, muchos también están presentes con los métodos estándar de ensayos "físicos". Por ejemplo, los errores debidos a altas temperatura en el lugar, así como el efecto crossover influyen en gran medida la utilización de muestras de vigas o cilindros para estimar la resistencia exacta a flexión o compresión in-situ ya que ellas afectan la relación resistencia-madurez.

La ASTM C1074 manifiesta que la precisión de la resistencia estimada es dependiente de varios factores, tales como la inapropiada función de madurez para una mezcla específica, el historial de temperatura a temprana edad y las proporciones de la mezcla.

A pesar de las posibles fuentes de error que se describen en esta sección sin duda puede ocurrir concurrente con otras y, como tal, pueden ser aditivas, a continuación se agrupan las más comunes:

- Los errores debidos a las altas temperatura en campo.
- Los errores e incongruencias en las dosificaciones.
- Los cambios de las características de Materias Primas.
- Los errores en el ensayo de calibración.

- Errores humanos al recopilar los datos de madurez o de cálculo de la resistencia de la madurez.
- Los errores de la función Nurse-Saúl.
- Los errores de la función Arrhenius.
- El efecto Crossover.

2.7 Aplicaciones del método de madurez.

La prueba de madurez es un efectivo medio para supervisar la ganancia de resistencia temprana de pavimentos de hormigón. El principal beneficio de usar este método es que proporciona un medio no destructivo relativamente rápido para supervisar continuamente la resistencia del hormigón permitiendo evaluar la resistencia efectiva del pavimento.

Este método, logra así, una relación directa entre los hormigones de laboratorio con los hormigones de obra ya que ambos llevan un control a una misma temperatura dando así similares valores de madurez.

El Departamento de Transporte de Iowa, ha concluido que las pruebas de la madurez reduce el tiempo de construcción y retrasos en el tráfico, y mejora las relaciones públicas durante la construcción⁽⁴⁾. Asimismo, los costos control de calidad se puede reducir debido a que el número de vigas o cilindros necesarios para el método de madurez son menos que los

⁴ Cable, J. K., Evaluation of Maturity and Pulse Velocity Measurements for PCC Traffic Opening Decisions, Iowa DOT Project HR-380, Iowa Department of Transportation, March 1998.

necesarios para las pruebas control de calidad con los métodos de ensayos destructivos.

El uso de las pruebas de madurez puede reducir los costos de construcción. Ansari et al⁽⁵⁾ estima que el tiempo de construcción para proyectos de autopistas podría reducirse en más del 50%.

Los autores también concluyeron que el número de muestras de ensayo ocupados durante la construcción podría reducirse en aproximadamente un 75%. Hunt y Mihm⁽⁶⁾ afirman que los ahorros en Texas tienen el potencial de ser notable.

Las ventajas y aplicaciones típicas de las pruebas de madurez se resumen a continuación:

- Herramienta de control de calidad.
- Habilitar un pavimento al tránsito, puede permitir el tráfico en las superficies de concreto tan pronto haya sido alcanzada la resistencia necesaria.
- Permite la determinación del momento óptimo para cortar las juntas.
- Facilita la solicitud de vías rápidas.
- Requiere un menor número de especímenes (vigas o cilindros) para los ensayos, reduciendo así los costos de control de calidad.

⁵ Ansari, F., et al, Development of Maturity Protocol for Construction of NJDOT Concrete Structures, Final Report to New Jersey Department of Transportation, Dec. 1999.

⁶ Hunt J. E. and Mihm, A. M., "Concrete Maturity Testing in Texas Project," Better Roads, vol. 69, no.3, March 1999.

- Los moldes del encofrado en proyectos de puentes o edificios pueden retirarse más rápido, agilizando la construcción y disminuyendo costos de arrendamiento.
- Los cables de postensado pueden ser tensados más pronto.
- Los efectos del clima frío sobre la ganancia de resistencia pueden ser monitoreados y los sistemas de calentamiento detenidos más rápidamente.
- Puede supervisarse la resistencia in-situ en las ubicaciones críticas del hormigón a edad temprana.
- Permite una programación de construcción acelerada. La reducción del tiempo de trabajo permite que los contratistas reciban su pago más rápidamente al tiempo que se reducen las horas de labores.
- La temperatura baja o alta —o un gradiente de temperatura demasiado grande— puede mandar una señal de alerta
- Mejora las relaciones públicas, reduciendo el tiempo de cierre para la finalización del proyecto.

2.7.1 Uso de la Madurez como una herramienta de control de calidad.

El método de madurez de hormigón puede ser implementado como una herramienta de control de calidad de gran alcance en que los contratistas pueden rápidamente identificar las desviaciones importantes de los diseños de mezcla especificadas (en cuestión de horas o días después de la colocación que tarde varias semanas) y por lo tanto tomar acciones correctivas en forma oportuna. Además, en lugar de utilizar vigas coladas en campo de conformidad con la norma ASTM C78, la prueba de verificación se puede realizar utilizando métodos alternativos de verificación de la fuerza física, como la tracción indirecta (ASTM C496), la tensión directa (ASTM C1583), o resistencia a la compresión (ASTM C39).

Cada diseño de mezcla de concreto tiene una única relación resistencia-madurez. Esta naturaleza específica del método de madurez representa un limitación significativa en la fiabilidad de la estimación de la resistencia a partir de la madurez, ya que los valores de madurez son directamente afectados por la variabilidad de y/o cualquier cambio en los procedimientos de mezclado o en las materias primas.

Esto es debido al hecho de que cualquier cambio en la mezcla que afecta a la resistencia resultante del hormigón o la tasa de aumento de resistencia lo más probable es que alterare la curva resistencia madurez.

Las circunstancias antes mencionadas exponer la necesidad de establecer procedimientos consistentes para el procesamiento de mezclado. El método

de la madurez en sí misma puede ser utilizado para evaluar las características intrínsecas de la mezcla directamente en base a su sensibilidad a los cambios que afectan a la velocidad de ganancia de resistencia como se mencionó anteriormente.

Esta sensibilidad a cambios en la mezcla se puede utilizar para alertar rápidamente al contratista, este proceso convierte el método de la madurez no sólo en un instrumento poderoso para acelerar de construcción, sino también un medio muy beneficiosos para el control de calidad.

Para hacer realidad estos beneficios de control de calidad, un proceso sistemático de las verificaciones periódicas se deben de ejecutar en conjunción con la prueba de la madurez.

2.7.2 Uso de la Madurez en decisiones de apertura al tráfico.

El método de madurez del hormigón es muy beneficioso para las decisiones de apertura al tráfico en una carretera. Este beneficio surge del hecho de que la resistencia a la flexión real del pavimento en el proyecto puede ser determinado a través de mediciones en tiempo real de las propiedades físicas, dimensiones, y condiciones de curado del pavimento en estudio, sin necesidad de un número excesivo de probetas en campo.

Bajo este escenario, un valor umbral diferente de resistencia a la flexión puede ser determinado para cada uno de los principales tipos de equipos de construcción necesarios en el pavimento. Estos umbrales son pre-calculado

sobre la base de espesor del pavimento, condiciones de apoyo, las huellas de los equipos y las presiones de contacto.

La apertura sin demora innecesaria puede resultar en ahorros considerables de tiempo y dinero, y un aumento en la seguridad debido a la menor exposición de la zona de trabajo al tráfico.

El criterio de la resistencia del concreto para la apertura al tráfico varía principalmente con el tipo de tráfico: los vehículos de construcción o vehículos públicos.

Sin embargo, muchos otros factores que también afectan las resistencias reales:

- Tipo, peso y cantidad de las cargas previstas durante las edades tempranas.
- Ubicación de las cargas en la losa.
- Módulo de elasticidad de hormigón.
- Diseño de Pavimentos (construcción nueva, o la superposición sobre el asfalto).
- Espesor de losa
- Fundación de apoyo (módulo de reacción subrasante, k .)
- Acabado de los bordes de apoyo (ampliado carril o unidos a la acera o cunetas o en el hombro)

Para las aplicaciones de pavimentos de concreto, la resistencia a la flexión es el criterio de estructural más adecuado para evaluar la capacidad de carga. Los valores de resistencia a flexión proporcionar una valoración de

la resistencia a la tracción en el fondo de la losa donde las cargas de las ruedas inducen esfuerzos de tracción.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la flexión usando ASTM C 78 son muy sensibles a la preparación de las vigas de ensayo y a sus procedimientos.

Muchas empresas se dan cuenta esta deficiencia y prefieren utilizar la prueba de resistencia a la compresión (ASTM C-39) para la aceptación del concreto y criterios de apertura al tráfico, previamente desarrollan una correlación entre la resistencia a la flexión o módulo de ruptura y la resistencia a la compresión.

Para pavimentos de gran intensidad de tráfico o de aeropuerto la Administración Federal de Aviación FAA (AC-180/5370) permiten la apertura al tráfico cuando la resistencia a la flexión supere los 3,8 MPa (550 psi) o hasta que el concreto tenga 14 días después de colocado.

En los estados de Georgia y Michigan (EE.UU) se han puesto en servicio carreteras con reparaciones en concreto cuando los módulos de ruptura en las viguetas de prueba han alcanzado 2.1Mpa⁽⁷⁾, en estos casos la apertura temprana al tráfico no ha tenido efectos negativos aparentes. Antes de abrir el pavimento al tráfico, todas las juntas o bien deberán estar selladas o protegidas de daños en el borde y de la intrusión de materiales extraños en la articulación.

⁷ Revista ISCYC Año 8, N° 29. Pag. 23

2.7.3 Uso de la madurez para determinar los tiempos de corte de juntas.

Otra situación en la que necesitamos conocer la evolución de la resistencia con el tiempo-temperatura, es para la toma de decisiones técnicas para la ejecución del corte de juntas transversales o juntas de construcción en los pavimentos, lo cual en la mayor parte de los casos se determina de forma empírica.

Las juntas de control o empalmes de los pavimentos de concreto hidráulico son comúnmente fabricadas para controlar el agrietamiento al azar que sufren las losas del pavimento debido a los esfuerzos internos que se dan en éstos. Estos empalmes son comúnmente cortados para crear un plano de debilidad vertical en localizaciones predeterminadas.

Los cortes de juntas para crear la zona de debilidad se deben hacer en pavimentos de concreto monolíticos dentro de un periodo de tiempo.

Este periodo de tiempo, mayormente determinado empíricamente o por experiencia del constructor, oscila entre 2 – 4 horas después del colado o cuando el pavimento haya endurecido lo suficiente como para soportar el peso del equipo para el corte.

La mayoría de proyectos utilizan máquinas de corte para crear estas juntas. El concreto debe ser capaz de soportar los esfuerzos y vibraciones que producen las actividades del aserrado sobre el pavimento.

La capacidad de soportar estos esfuerzos está relacionada con el tiempo de fraguado del concreto, el cual se ve afectado por diferentes factores como son:

- Condiciones ambientales (temperatura ambiente, velocidad del viento, humedad relativa)
- Tipo de cemento utilizado en el proyecto.
- Tipo de aditivos.

En algunos proyectos, se especifica que el corte de juntas debe iniciarse a partir del momento en que se puede colocar una máquina de corte sobre la superficie de rodado sin dejar marcadas las huellas, efectuando pruebas de sierra para verificar la capacidad de resistir el corte, o cuando se esfuerza el pavimento con el peso de una persona. Se especifica también que el contratista deberá considerar el endurecimiento del concreto y la temperatura ambiente para definir el momento justo en el cual se efectuara el corte de juntas, el cual deberá realizarse lo antes posible para evitar las fisuras y tensiones de alabeo en las losas.

La figura 2.27 ilustra los efectos del aserrado temprano o tardío de los pavimentos de concreto.

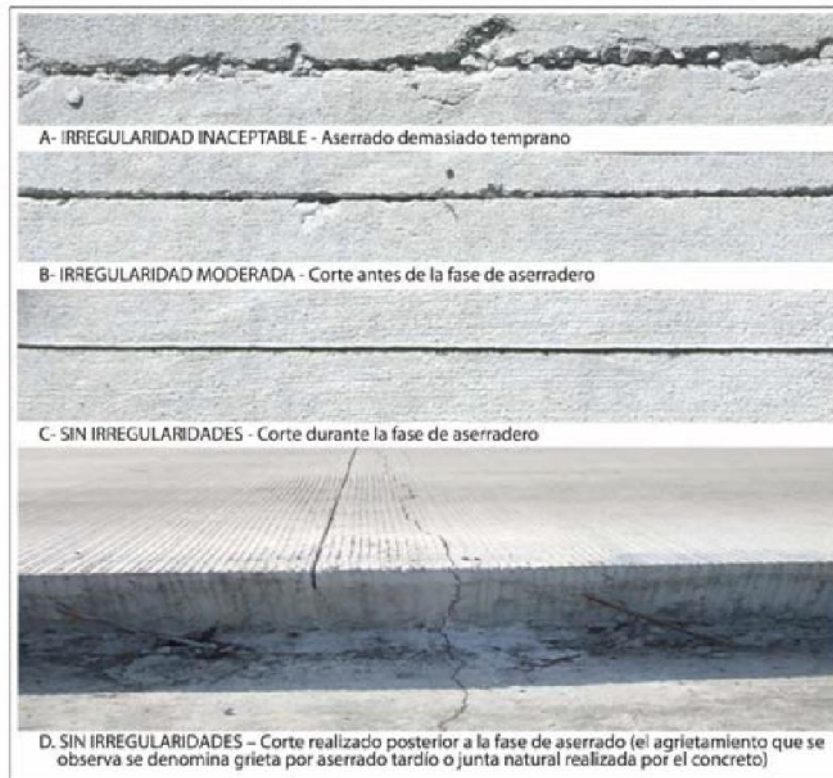


Figura 2.27 Aserrado Temprano o Tardío de los Pavimentos de Concreto.
Tomado: Revista ISCYC N°51 Año 13.

En nuestro medio no existe un criterio técnico que indique el tiempo adecuado para realizar el corte de juntas por medio de pruebas estandarizadas. Mediante el método de madurez es posible determinar este tiempo, monitoreando el desarrollo de la resistencia del concreto en el lugar a edades tempranas (términos de horas), lo cual no puede ser determinado por los métodos destructivos tradicionales.

CAPITULO 3

CAPITULO III:
DESARROLLO DE LA RELACIÓN RESISTENCIA – MADUREZ
PARA LA MEZCLA DE CONCRETO

3.1 Descripción y ubicación del Proyecto “Tramo 7 de la Carretera Longitudinal del Norte”

El estudio e investigación del método de madurez se realizará en la construcción del Tramo 7 de la Carretera Longitudinal del Norte, en los municipios de Corinto, en Morazán; Lislique y Anamorós en el departamento de La Unión.

INICIO: 8 de Marzo del 2011

LONGITUD: 16.93 kilómetros

EMPRESA CONSTRUCTORA: Asocio Terrasal-Salazar Romero

DURACION ESPERADA: 17 Meses

BENEFICIARIOS: 43,346 personas

MONTO: 12.9 millones

FINANCIAMIENTO: Corporación del Reto del Milenio del Gobierno de los Estados Unidos de América.

LAS OBRAS A REALIZARSE SON:

- Construcción de 16.93 kilómetros de carretera de con dos carriles de concreto hidráulico.

- Construcción de un Puente
- 8 cajas como Obras de Paso
- Construcción de 3,285 ml de drenajes.
- Construcción de 37,200 ml cordón cuneta

El tramo 7 de la carretera en construcción se divide en dos tramos A Y B:

DESCRIPCIÓN DEL TRAMO 7A. Este tramo inicia sobre la calle que conduce desde la población de Corinto (Departamento de Morazán) hacia Lislique (Departamento de La Unión), dirigiéndose con rumbo noreste sobre terreno montañoso, girando hacia el sureste aproximadamente a los 1,500 metros de iniciado el proyecto. El tramo continúa sobre terreno montañoso hasta aproximadamente la estación 6+700, donde gira con rumbo noreste hasta el final del proyecto en la entrada de la población de Lislique.

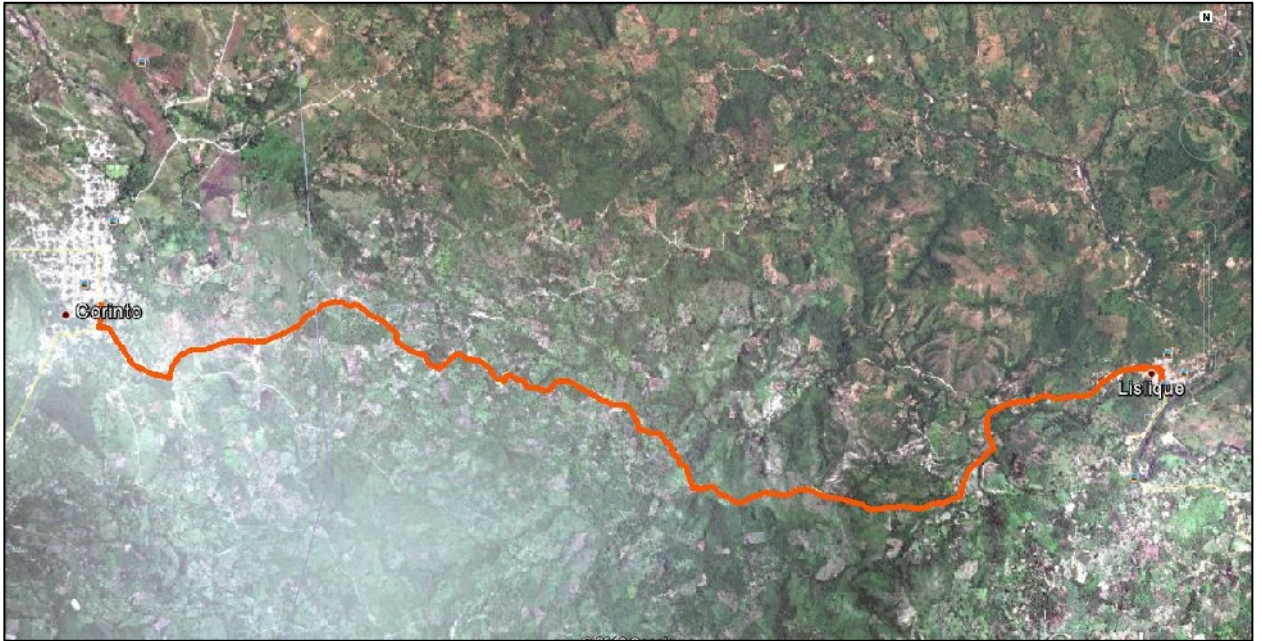


Figura 3.1 Esquema de tramo 7A, Corinto-Lislique

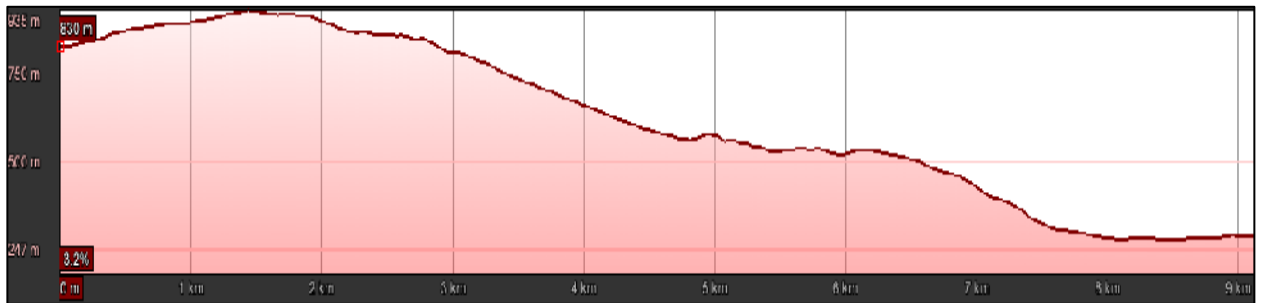


Figura 3.2. PERFIL DEL TERRENO, TRAMO 7A

DESCRIPCIÓN DEL TRAMO 7B. Este tramo inicia sobre la calle que conduce de la Ciudad de Lislique a la ciudad de Anamorós (Departamento de La Unión), justo en el comienzo del puente existente a la entrada de la ciudad, dirigiéndose con dirección Sur-Este sobre terreno montañoso en sus

primeros 3.5 km y entre ondulado y plano en el resto del tramo, hasta llegar a empalmar con calle adoquinada en la periferia de la Ciudad de Anamorós.

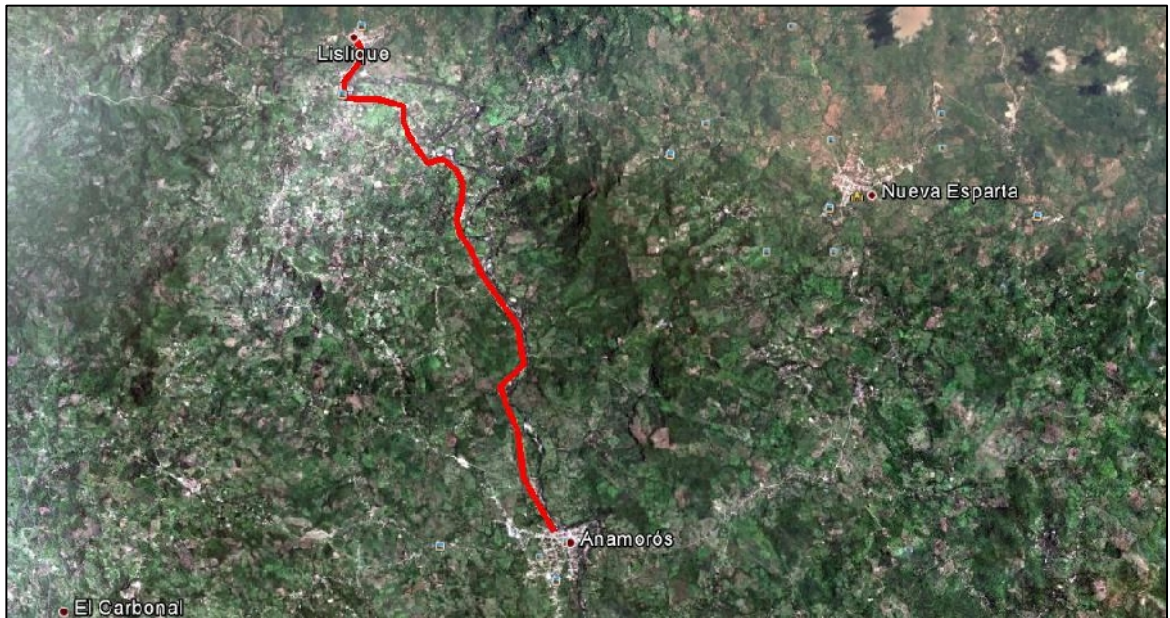


Figura 3.3. Esquema de tramo 7B: Lislique-Anamorós

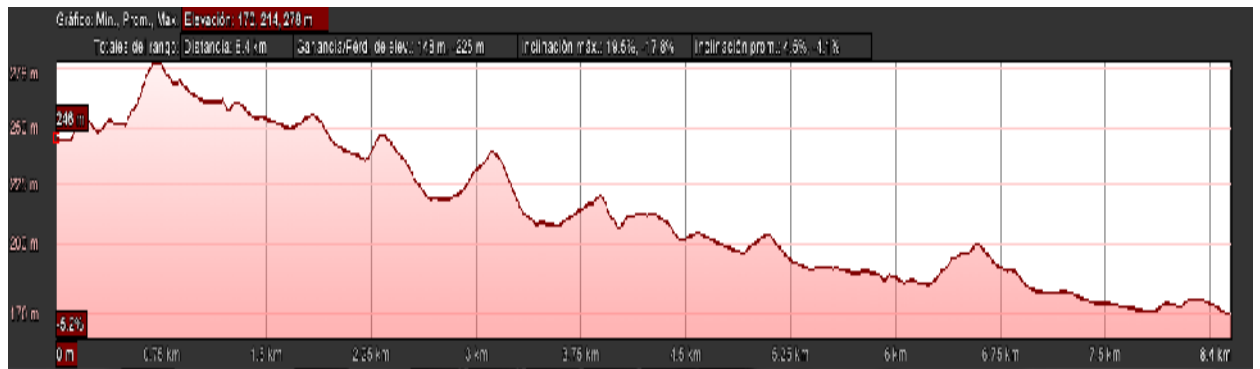


Figura 3.4. PERFIL DEL TERRENO, TRAMO 7B

3.2 Diseño de mezcla y características de los materiales.

En los alcances de nuestra investigación no se propuso realizar un diseño de mezcla porque en el proyecto actual, ya se posee un diseño de mezcla adecuado a las necesidades de este pavimento, sin embargo el diseño de mezcla original, realizado por Holcim Concretos SA de CV se expondrá en esta tesis, ya que la investigación amerita tener un buen estudio del diseño de mezcla sabiendo de antemano que esta es la base para la producción y evaluación de todo concreto, y más aún si se está implementando el método de la Madurez del Concreto la cual pide una caracterización muy bien hecha del concreto a usar.

Condiciones Generales.

Cemento: Tipo I
Marca : Holcim
Tipo : ASTM C-150-09 tipo I
Peso específico : 3.15
Agua:
Pozo Propio (Rio Anamoros)
Peso específico 1.00

Características del Concreto:

MR : 40 kg/cm²
Resistencia específica : 280kg/cm²
Revenimiento : 100mm ± 25mm (4pulg ± 1pulg)
(Corresponde a una consistencia Plástica según tabla 5.1)

Consistencia	Asentamiento
Seca	0" (0mm) a 2" (50mm)
Plástica	3" (75mm) a 4" (100mm)
Fluida	>5" (125mm)

Tabla 3.1. Consistencia y asentamientos.

Tamaño máximo nominal de agregado (T.N.A.)

Las Normas de Diseño Estructural recomiendan que el tamaño máximo nominal del agregado grueso sea el mayor que sea económicamente disponible, siempre que sea compatible con las dimensiones y características de la estructura.

El código ACI 318-08 prescribe que el agregado grueso no deberá ser mayor de:

- a) 1/5 de la menor dimensión entre las caras de encofrados; o
- b) 1/3 del peralte de la losa; o
- c) 3/4 del espacio libre mínimo entre barras individuales de refuerzo, paquetes de barras, tendones o ductos de presfuerzo.

El tamaño máximo nominal determinado aquí, será usado también como tamaño máximo simplemente.

Siempre el T.N.A es del tamaño del tamiz donde se produce la primera retención, denotando así el tamaño máximo en el agregado, para este caso el tamaño máximo es de:

$$\phi = 38 \text{ mm}$$

Determinación de la resistencia Promedio Requerida:

Contamos con una desviación estándar de $\sigma = 30 \text{ kg/cm}^2$ según los datos de laboratorio y además Tenemos que:

$$f'_{cr} = f'_c + 1.83 \sigma$$

Sustituimos:

$$f'_{cr} = 280 \text{ kg/cm}^2 + 1.83(30 \text{ kg/cm}^2)$$

$$f'_{cr} = 335 \text{ kg/cm}^2$$

Determinar del contenido de aire:

Si tenemos un TNA de 38mm es igual a un agregado máximo de 1½"

Por lo tanto haciendo uso adecuado de la tabla siguiente podemos encontrar el contenido de aire en la mezcla.

TNA Agregado Grueso	Aire Atrapado
3/8"	3.0%
1/2"	2.5%
3/4"	2.0%
1"	1.5%
1½"	1.0%
2"	0.5%
3"	0.3%
4"	0.2%

Tabla 3.2 contenido de aire de acuerdo al tipo de agregado. Tomado del manual de diseño de mezcla del ISCYC

Entonces tenemos que el aire atrapado es el 1.0% de todo el volumen de concreto.

Relación agua-cemento (A/C) por resistencia:

Para concretos preparados con cemento Portland tipo 1 o cementos comunes, puede tomarse la relación a/c de la tabla 3.7

RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (f'cr) (kg/cm ²)	RELACION AGUA/CEMENTO DE DISEÑO EN PESO	
	CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO	CONCRETO CON AIRE INCORPORADO
450	0.38	—
400	0.43	—
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

Tabla 3.3 Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto.

Interpolando para f'cr de 335kg/cm² tenemos que la relación resultante es de

$$A/C = 0.50$$

Cálculo del Factor Cemento:

$$\text{Cemento} = \text{agua} / a/c = 165 / 0.50 = 330\text{kg/m}^3$$

MATERIALES:

Material	Identificación	Densidad kg/dm	Absorción
Cemento	C -150	3.15	
Adición			
Agua	Pozo Propio (Rio Anamoros)	1.00	
Agregado Fino			
Agregado fino 1	Arena Triturada Comalapa	2,60	3.5%
Argado Fino 2		1.00	
Agregado Grueso			
Agregado Grueso 1	No. 67 - (3/4" "El Carmen")	2.70	2.5%
Agregado Grueso 2	No. 4 -(1 1/2" "El Carmen)	2,68	2.5%
Aditivos			
Aditivo 1	IMIX RB 910	1.15	
Aditivo 2	WRAD	1.3	
Aditivo 3	MEGAFLOW	1.00	
Fibras			
Fibra 1			
Fibra 2			

Tabla 3.4 Resumen de materiales. Tomado del diseño de mezcla HOLCIM para planta KM26; tramo 7 (Anamoros-Lislique-Corinto)

DOSIFICACIÓN FINAL

Material	Identificación	Cantidad Final	Unidad
Cemento	C- 150	330	kg/m ³
Adición			
Agua	Pozo Propio (Rio Anamoros)	165	Litro s/m
Agregado Fino			
Agregado Fino 1	Arena Triturada Comalapa	725	kg/m ³
Agregado Fino 2			
Agregado Grueso			
Agregado Grueso 1	No. 67-(3/4" "El Carmen")	710	kg/m ³
Agregado Grueso 2	No. 4-(1/2' "El Carmen")	475	kg/m ³
Aditivos			
Aditivo 1	IMIX RB 910	0.5	Litros/m ³
Aditivo 2	WRAD	1.50	Litros/m ³
Aditivo 3	MEGAFLOW		
Sumas		$\Sigma=2408$	kg/m ³

Tabla 3.5 Dosificación Final. Tomado del diseño de mezcla HOLCIM para planta KM26; tramo 7 (Anamoros-Lislique-Corinto)

Evaluación de aditivos en el diseño de mezcla.

- **IMIX-RB910:** es un compuesto sintético líquido formulado como un aditivo para el concreto, retardador de fraguado inicial y promotor de resistencia con características de revenimiento extendido. El concreto con IMIX.RB910 mantiene el revenimiento por tiempo prolongado de acuerdo a las necesidades de la obra. Este diseñado para proveer a una mezcla dada, la máxima trabajabilidad y el tiempo para su colocación comparado con una mezcla sin aditivo.

Reacciona con el cemento durante el estado plástico del concreto poniéndolo en estado de reposo por un espacio de tiempo, esto producto de la retardación en la hidratación de los aluminatos tricalcicos y aluminatos dicalcicos. El tiempo es controlado por la dosificación que se use. La temperatura inicial del concreto no aumenta mientras esta en su estado plástico. El concreto es menos permeable y con más resistencia a la flexión.

- **WRAD:** Es un compuesto líquido color café formulado con ingredientes selectos para preparar un aditivo reductor de agua y retardador. Es altamente procesado y es libre de cloruros y azucares. Este aditivo aumenta la resistencia a temprana y última edad; mejora la trabajabilidad aun con revenimientos bajos.
- **MEGAFLOW:** es un compuesto líquido color café, formulado con poderosos reductores de agua que funcionan de forma electro-química con las partículas del cemento. Al tener contacto con el cemento hace

que las partículas del cemento se carguen negativamente, causando que se repelan entre si, produciendo un movimiento de plasticidad al tratar de polarizarse con una cantidad mínima de agua presente en la mezcla. Este fenómeno causa que se reduzca el agua de amasado substancialmente, como resultado se produce un aumento de temprana y ultima edad.

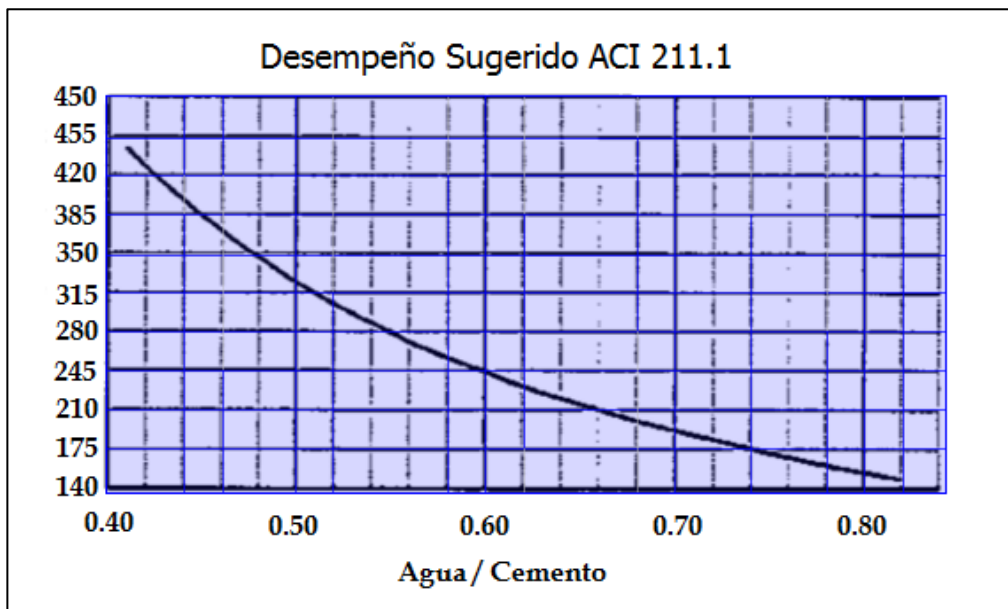


Figura 3.5 Relación Agua/Cemento. Tomado del diseño de mezcla HOLCIM para planta KM26; tramo 7 (Anamoros-Lislique-Corinto)

3.3 Aplicación del método de Madurez

La aplicación del método de madurez en la presente investigación está orientada a los pavimentos de concreto hidráulico. En los últimos años, en El Salvador, este tipo de pavimentos ha sido muy utilizado en la construcción y rehabilitación de carreteras, debido a su versatilidad, durabilidad y resistencia, incluso arterias principales que otrora eran de asfalto se reconstruyen en concreto hidráulicos.

Para verificar la calidad y resistencia de un concreto que será colocado en una carretera se analiza el módulo de ruptura (MR) mediante la norma ASTM C78, aunque alternativamente se establece una correlación directa entre el MR y la resistencia a compresión ($f'c$); dicha relación varía en concordancia con la variación del agregado grueso, tipo de cemento, aditivos, etc. Algunas investigaciones en nuestro país, han podido concluir que para concretos de peso normal, el Módulo de Ruptura puede determinarse mediante la siguiente ecuación: $MR = 199 - 2.65 \sqrt{f'c}$. Holcim utiliza una relación de 2.40 en su diseño. La resistencia a flexión del concreto a utilizar en la carretera a evaluar es de $MR=40 \text{ kg/cm}^2$ ($f'c=280 \text{ kg/cm}^2$) y con una resistencia requerida de $f'cr=335 \text{ kg/cm}^2$.

Esta investigación proporcionará parámetros adicionales que ayuden a determinar tiempos-resistencias para el corte de juntas longitudinales y transversales, así como también parámetros para apertura al tráfico. Si bien

es cierto en algunos proyectos carreteros alejados de las urbes no es indispensable conocer en qué momento una carretera esta apta para su apertura, como si lo es en las carreteras tipo fast-track o vías de gran demanda de transito; siempre es necesario conocer en qué momento puede utilizarse algún carril o franja recién colada para el tránsito de equipo de construcción y afluencia de transito particular.

El uso del método de madurez no se limita a la predicción de la resistencia del concreto para la sincronización de las operaciones críticas de esfuerzo. También se puede utilizar para las tareas más rutinarias de control de calidad y de garantía de calidad.

3.4 Calibración de la mezcla según Astm C-1074

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.

Como se explicó en el capítulo 2, sección 2.6.4 existen dos funciones de madurez, una se basa en la teoría de Arrhenius (edad equivalente) y la otra en la teoría de Nurse-Saúl (Factor-Temperatura-Tiempo). Esta investigación profundizara el estudio sobre la teoría de Nurse-Saúl la que puntualiza que el concreto con la misma madurez tendrá la misma resistencia, no importando las combinaciones de temperaturas, siempre y cuando sea la misma mezcla.

Uno de los parámetros importantes para definir una fidedigna relación es el datum de temperatura, este último es definido como la temperatura a la cual el concreto deja de ganar resistencia; por lo tanto es un límite propiamente dicho, para el cálculo del área bajo la curva e influye directamente en valor de madurez.

Para llevar a cabo esta investigación se asumió una temperatura de referencia o Datum igual a 0 °C basándonos en las especificaciones de la normativa ASTM C1074 que indica que para cementos tipo I sin adiciones y un rango de temperatura de curado de 0° a 40°C es recomendable usar este valor. Adicionalmente y cuando se requiera se puede calcular dicho datum con la metodología escrita en la C1074 en su Anexo A1.

El procedimiento a emplear para determinar la relación Resistencia-Madurez se indexa a continuación y se detalla más adelante:

- a) Elaboración de especímenes para la determinación de la resistencia
- b) Determinación de resistencia mecánica de especímenes
- c) Procesamiento de datos de madurez con equipo digital PocketPC
- d) Desarrollo de la curva Resistencia-Madurez (TTF)

3.4.1 Elaboración de especímenes para la determinación de la resistencia

El grupo de tesis junto al equipo técnico del ISCYC se trasladó hasta las instalaciones de la planta de HOLCIM en Anamoros, con la finalidad de

iniciar la fase I (de laboratorio). En la Planta de HOLCIM se procedió a realizar las siguientes pruebas:

3.4.1.1 Muestreo del Concreto Fresco (ASTM C-172)

La muestra para nuestra investigación se obtuvo de 3 camiones, generando así 3 bachadas de concreto para el llenado de cilindros y vigas, se coloca concreto en una cantidad aproximada de 1ft^3 en la carretilla, que permite llenar un aproximado de 8 cilindros; el concreto que se utilizó para realizar nuestra investigación estaba en óptimas condiciones pues la muestra se obtuvo justo cuando los camiones habían sido cargados y se desplazaban para el tramo de calle a colar. Ver figura 3.6



Figura 3.6 Resumen Fotográfico ASTM C172

3.4.1.2 Temperatura del Concreto Fresco (ASTM C-1064)

Luego de obtener la mezcla de concreto representativa del camión se procedió a medir la temperatura del concreto plástico de cada bachada en la carretilla, inicialmente se utilizó un termómetro convencional y se verificó con un termómetro digital obteniendo resultados similares. Ver Figura 3.7



Figura 3.7 Resumen Fotográfico. Medición de la temperatura del concreto en estado fresco.

A continuación se presenta una tabla de las lecturas obtenidas

BACHADA	1	2	3
TEMPERATURA (°C)	29.2	29	30

Tabla 3.6 A: Temperaturas del concreto

3.4.1.3 Revenimiento (ASTM C-143)

Se procedió a obtener el revenimiento para cada bachada, la mezcla se obtenía de la carretilla, se llenaba el cono de Abrams en tercios y se varillaba 25 veces cada capa procurando que varilla penetrara 1" en la capa inferior; luego se levantó el molde en 5 ± 2 s y se procedió a medir el asentamiento.



Figura 3.8 Resumen Fotográfico. Revenimiento del concreto en estado fresco.

Según el diseño de mezcla proporcionado por Holcim Concretos S.A de C.V. el revenimiento de diseño es de 100 mm \pm 25 mm (4" \pm 1")

El revenimiento obtenido para cada bachada se presenta en la siguiente tabla:

Bachada	1	2	3
Revenimiento	3 ³ / ₄ "	4"	4"

Tabla 3.6 B: Revenimiento del concreto

3.4.1.4. Elaboración y curado de especímenes de prueba en laboratorio (ASTM C-192)

Una vez obtenido la información sobre la temperatura y el revenimiento del concreto se procedió a llenar los moldes, los cuales miden 12pulg de alto por 6pulg de diámetro, para la fabricación de todos los especímenes cilíndricos se requirieron de 2 bachadas por lo que la ASTM C1074 indica que si 2 o más bachadas son necesarias para preparar el numero requerido de

cilindros, deben ser colados igual número de cilindros de cada bachada, y ensayar un cilindro de cada una a las edades indicadas.

Se llenaron 8 cilindros de la bachada 1, 8 cilindros de la bachada 2, y de la bachada 3 se llenaron 2 moldes de vigas. Para poder identificar los cilindros para la prueba posterior se denominó con una letra A a los llenados de la primera bachada y con una B a los de la segunda bachada. Ver Figura 3.9



Figura 3.9 Resumen Fotográfico. Aplicación de desmoldante, llenado de probetas cilíndricas y vigas y rotulación final.

De manera simultánea se seleccionaron 2 cilindros a los cuales se les embebieron los sensores, quedando los sensores posicionados a ± 15 mm de su centro, la metodología empleada para introducirlo consistió en llenar el cilindro hasta su segunda capa, luego con una varilla de 5/8" se empujo el sensor con el cuidado de proporcionarle la posición correcta, luego se colocó la tercera capa de concreto para llenar el cilindro y se enrasó la superficie, de esa manera los sensores quedaron embebido en los cilindros. Ver figura 3.10.



Figura 3.10 Resumen Fotográfico. Introducción de sensores en el centro del cilindro, cuando se colocaba la 2da capa.

Luego de transcurridas 24 horas de su fabricación, los especímenes cilíndricos y de vigas fueron desmoldados en la planta de Holcim y luego se procedió a ser curados por inmersión en un tanque de agua a una temperatura promedio de 23 ± 2 °C tal como lo establece la ASTM C192. Ver figura 3.11



Figura 3.11 Resumen Fotográfico.

Curado por inmersión a una temperatura de 23 ± 2 °C

3.4.2 Determinación de resistencia mecánica de Especímenes

Para establecer la correlación entre madurez y resistencia mecánica es necesario que estos dos parámetros se grafiquen simultáneamente en el mismo plano y que sus resultados sean obtenidos en idénticas condiciones, independientemente que se trate de dos propiedades diferentes.

Según el procedimiento estandarizado, deben ser ensayados dos especímenes por edad; y un tercero, solamente si el rango de resistencia a

compresión de estos, excede el 10% del promedio, el valor requerido será el promedio de los 3 ensayos.

Durante el periodo de curado los especímenes se ensayarán a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, 2 cilindros por cada día, en concordancia con C1074 y las vigas se ensayaran solamente a edad de 28 días con el fin de correlacionar estos resultados con las lecturas de madurez para las edades indicadas. Esto debe hacerse siguiendo el procedimiento de ensayo que establece la ASTM C39 “Resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto” y la ASTM C78 “Método de prueba estándar para resistencia a la flexión del concreto (Uso de viga simple con carga en los tercios del claro)”.

Antes de someter a compresión los cilindros se registraron el peso y las dimensiones de los cilindros para fines de cálculo. Ver figura 3.12



Figura 3.12 Resumen Fotográfico.
Actividades de registro de peso y dimensiones.

De esta manera se procedió a ensayar los especímenes dentro de las tolerancias siguientes para cada edad:

Edad de ensayo	Tolerancia Permitida
24 h	± 0.50 h o 2.1%
3 días	2 h o 2.8%
7 días	6 h o 3.6%
28 días	20 h o 3.0%

A continuación se presenta un resumen fotográfico de los ensayos de resistencia a todas las edades: Ver figura 3.13

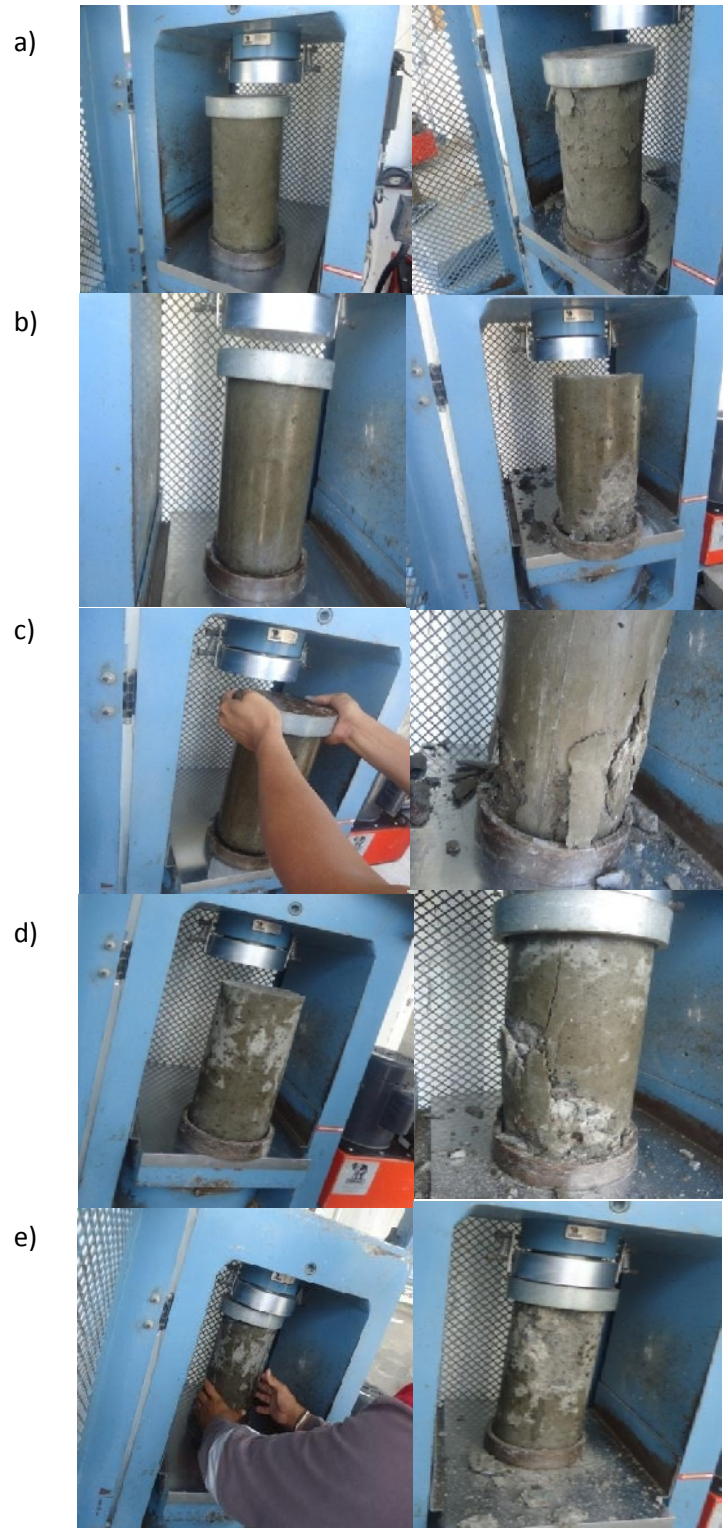


Figura 3.13: Resumen fotográfico de edades de compresión.
a) 24 horas, b) 3 días, c) 7 días, d) 14 días, e) 28 días.

A continuación se muestra el resumen de los datos obtenidos para cada edad: (Tabla 3.7)

Cilindro	Nº Muestra	Edad de Ensayo (días)	Fecha de Ensayo	Hora de ensayo	Diám. (cm)	Alt. (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
1	1A	24 h	30-05-12	12:15 pm	14.9	30.1	12.30	23,061	130.5	125
2	1B	24 h	30-05-12	12:27 pm	15.2	30.0	12.28	20,322	115.0	
3	2B	24 h	30-05-12	12:45 pm	15.0	30.2	12.26	22,884	129.5	
4	2A	3	01-06-12	12:05 pm	15.0	29.9	12.50	39,505	223.5	232
5	3A	3	01-06-12	12:12 pm	15.0	30.0	12.44	42,550	240.5	
6	3B	7	05-06-12	12:20 pm	15.0	29.9	12.30	55,625	315.0	309
7	4A	7	05-06-12	12:25 pm	15.0	29.9	12.46	53,520	303.0	
8	4B	14	12-06-12	12:05 pm	15.0	30.0	12.42	57,185	323.5	317
9	5A	14	12-06-12	12:07 pm	15.0	30.0	12.50	54,845	310.0	
10	5B	28	26-06-12	11:25 am	14.9	30.1	12.68	56,425	319.0	333
11	6B	28	26-06-12	11:41 am	15.0	29.9	12.54	61,385	347.0	
Viga 1	1	28	26-06-12	11:45 pm			35.32	9,428	56.13	56.18
Viga 2	2	28	26-06-12	11:50 pm			35.54	9,441	56.22	

Tabla 3.7 Resumen de resistencia mecánica de especímenes en laboratorio.

En conjunto con los valores de esfuerzo promedio se graficarán los registros de madurez para cada edad y trazara la línea de tendencia en logaritmo natural más representativa para obtener la ecuación que relacionará a las dos variables.

3.4.3 Procesamiento de datos de Madurez con equipo digital (Pocket PC)

Antes se explicó la relación estrecha entre temperatura y madurez, así como también la relación Resistencia-Madurez, sabiendo esto podemos llegar a comprender muy bien el comportamiento del concreto en cualquier momento.

En la Fase de laboratorio del método de madurez (FASE I) se instrumentalizaron dos cilindros del mismo concreto del proyecto, los dos cilindros contienen un sensor cada uno el cual toma registros de temperatura cada 20 minutos (por defecto), al mismo tiempo el equipo de medición es capaz de arrojar datos de la función de madurez basándose en la ecuación de Nurse-Saúl expuesta anteriormente.

Como se muestra en la Figura 3.14, el equipo necesario para obtener datos de madurez desde los cilindros instrumentalizados, una Pocket PC o Laptop, el Software COMMAND CENTER y los sensores térmicos.



Figura 3.14 -Equipo de madurez: Pocket PC, Software COMMAND CERTER, sensor Térmico o termocupla.

Con el equipo de Madurez antes descrito se pueden recolectar y procesar los datos de temperatura y madurez en esta fase de la investigación, los sensores tienen memoria para almacenar 2,048 datos de temperatura y si sabemos que cada 20 minutos guarda un dato significa que justamente tiene memoria para guardar datos durante 28 días.

Al momento de realizar los cilindros de prueba para esta fase se dejaron embebidos dos sensores a los que llamaremos sensor 1 y sensor 2 (ver figura 3.15), no es necesario conectar los sensores en el momento de colado de los cilindros ya que el equipo de madurez está diseñado para minimizar las interrupciones durante la construcción y el colado del concreto, los

sensores son totalmente funcionales cuando son instalados en la obra. Lo único que se requiere es anotar la hora en que el concreto cubre al sensor.

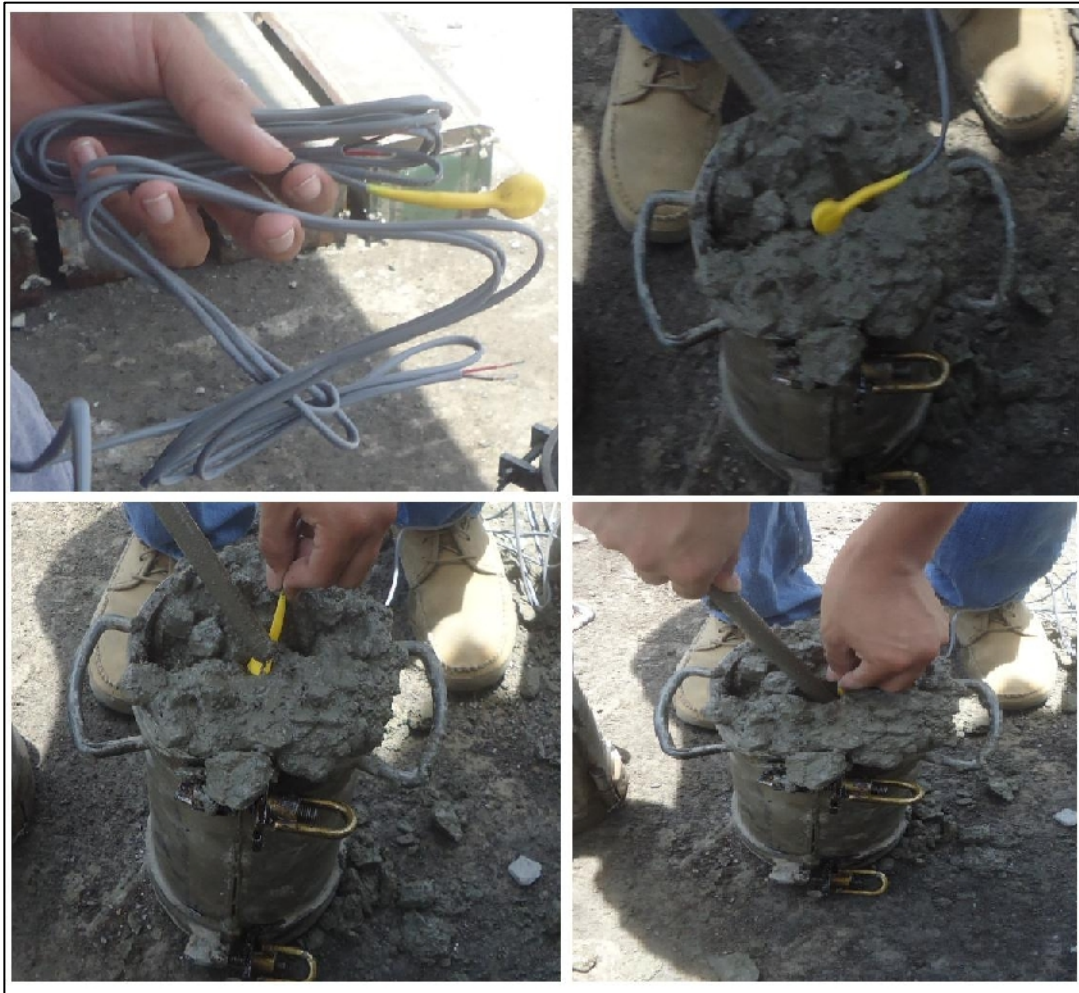


Figura 3.15: Instrumentalización de 2 cilindros de prueba

En nuestro caso ya que disponíamos de tiempo, los sensores se conectaron al equipo de madurez para su configuración y lectura al poco tiempo después del moldeo con el objetivo de verificar la conexión y funcionamiento del sensor.

3.4.3.1. Configuración del equipo

Antes de conectar cualquier sensor al Pocket PC y realizar lecturas se deben de introducir parámetros importantes para que el equipo de madurez arroje datos exactos. Estos parámetros son fecha y hora de colado, datum, descripción del sensor, estacionamiento, sistema de unidades a utilizar, referencia del tiempo o clima.

1- *Maturity*

En la Pocket PC abrimos el software COMMAND CENTER, en el menú “input” seleccionamos la opción “maturity” esta nos desplegará una pantalla donde nos pide ingresar datos, (ver Figura 3.16) en esta pantalla nos limitaremos a seleccionar la primera casilla “Maturity/Strength Calculations Enabled?”, el recuadro llamado “maturity curve parameters” se deja intacto ya que esto nos servirá cuando ya tengamos la curva de madurez (punto a tratar en el siguiente capítulo) luego en llenamos la casilla “Datum Temperature” en nuestro caso colocaremos cero grados Celsius (0°C) ya que es el valor recomendado por la norma ASTM 1074 para cementos tipo I además la obtención del datum con el procedimiento que la norma señala se sale de nuestros alcances previamente establecidos. Una vez terminado presionamos “ok” para que se guarden los cambios realizados.

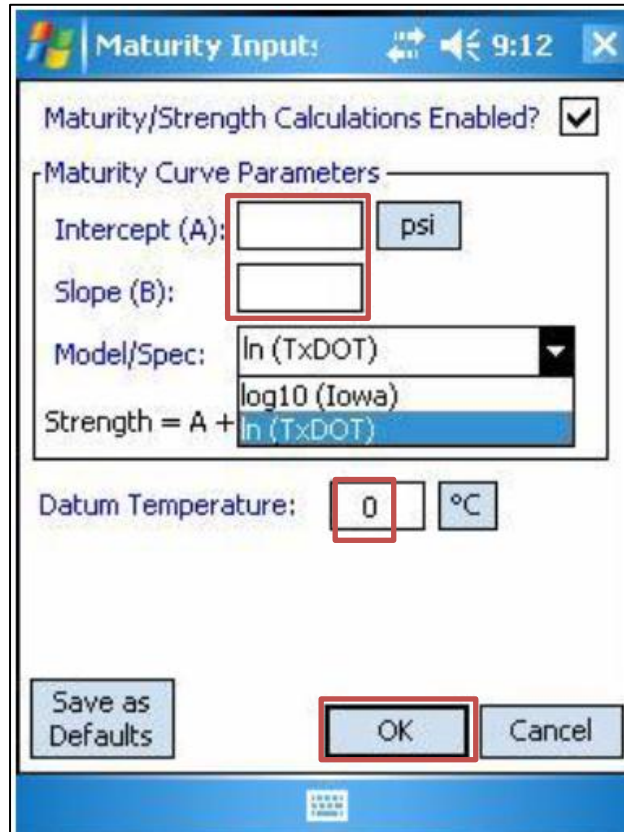


Figura 3.16: Configuración del submenú “Maturity” del menú “Input” marcados en rojo las casillas a llenar.

2- Placement

Después de esto siempre en el mismo menú “input” seleccionamos el submenú “Placement” se despliega una pantalla (ver Figura 3.17) donde nos pide fecha y hora de bachada es decir el momento en que el sensor toco el concreto, nos pide descripción o nombre para el sensor, en nuestro caso pondremos “sensor 1” luego nos pide estación del sensor (opcional) ya que

se usa cuando estamos en el pavimento y se ponen varios sensores a distintas distancias, en la siguiente casilla nos pide la profundidad del sensor para este caso introducimos a 150 mm ya que el sensor quedo colocado a la mitad del cilindro. La siguiente casilla nos pregunta si deseamos graficar datos a partir de la fecha de bachada ahí llena esa casilla para que estos sean los únicos datos que nos arroje ya que son los que nos interesan.

Placement Input

Batch Date: Tuesday, MAY 29, 2012

Batching Time: 12:05:00PM

Sensor Description: Sensor 1

Sensor Location (or Station):

Sensor Depth: 150 mm

Plot Only Data since Batching?

OK Cancel

Figura 3.17: Menú ingreso de datos del sensor 1 en el menú “Placement input”

3- Preferences

En el menú "Input" elegimos la opción "Preferences" (ver imfigura 3.18), en la primera casilla se definen las unidas con las que vamos a trabajar ya sea en sistemas inglés 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 numero de puertos de la PocketPC así que no se les hace ningún cambio 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. Al final dar ok para guardar cambios

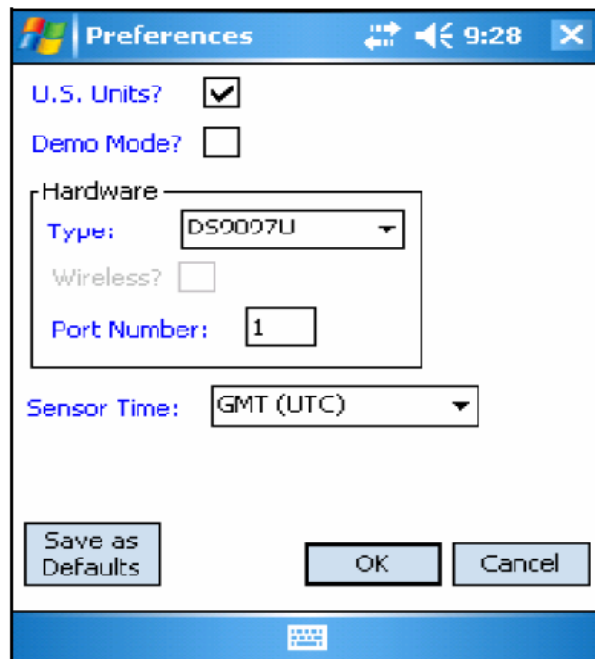


Figura 3.18: Opción preferences del menú input.

3.4.3.2. Lectura del sensor o termocupla

Tras esta previa configuración se procede a conectar la PocketPC con el sensor 1, por medio de un cable serie 9-pin (ver imagen 3.19 y 3.20), luego que conectemos el sensor vamos al menu “Sensor” del software y ejecutamos el comando “Read” esto nos dará una pantalla en la cual podremos observar datos de temperatura y madurez desde el colado hasta el momento presentados en gráficos distintos con opción de obtener una vista general de las variaciones de temperatura y también de saber en cualquier punto alguna temperatura y madures en un momento deseado. Una vez tengamos cargado los datos en la Pocket se Procede a Guardar desde el menú “File” seleccionamos la Opción “Save” guardamos el documento con el nombre “sensor 1” con una extensión (.pce) , cabe mencionar que este proceso se repite para obtener los datos del segundo sensor, ya que en el segundo sensor cambia la hora de Colado por unos minutos.

Los datos se pueden actualizar diariamente si se quisiera y cada vez para salvar los datos se va al menú “file” comando “save” y se sobrescribe en los documentos (sensor 1) y (sensor 2) según corresponda. El último día para hacer las lecturas es el día 28 ya que una vez pasado este tiempo se empezaran a borrar algunas lecturas de madurez que los sensores guardan pues este día supera su límite de memoria.



Figura 3.19: Cable serie 9-pin que conecta los sensores a la Pocket PC para la lectura de datos.



Figura 3.20: conectando el sensor al Pocket Pc y leyendo los datos de temperatura y madurez con el software COMMAND CENTER.

El equipo de madurez registra los gráficos de las variables tiempo, temperatura y madurez, como lo muestran las graficas siguientes:

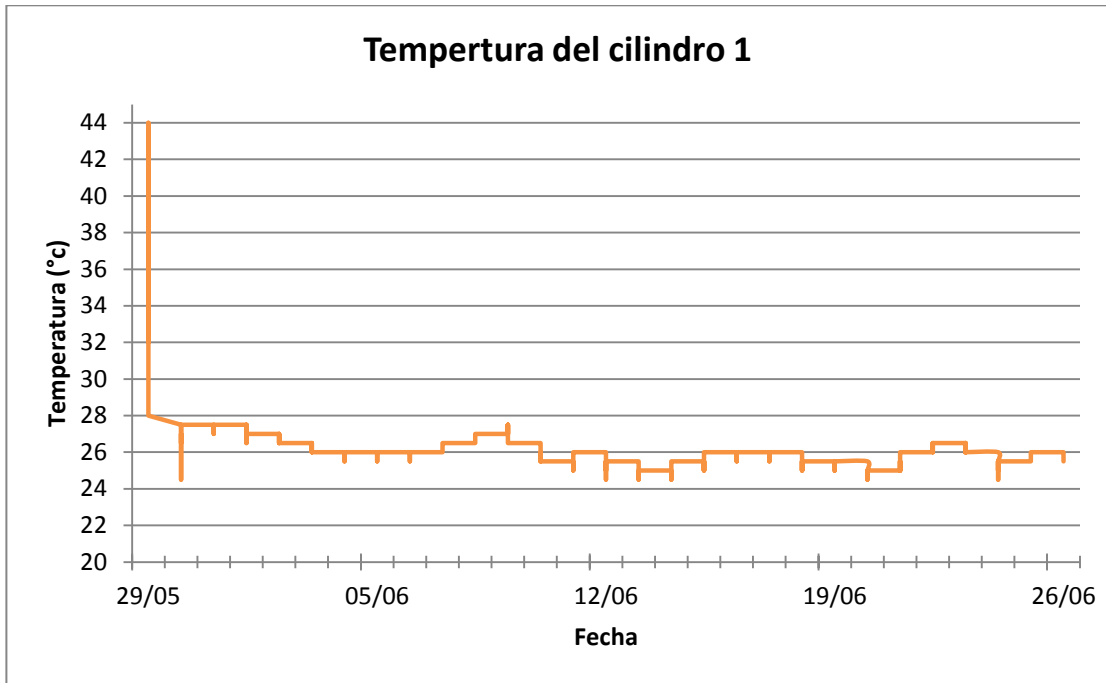


Figura 3.21 Grafica temperatura-tiempo Cilindro 1

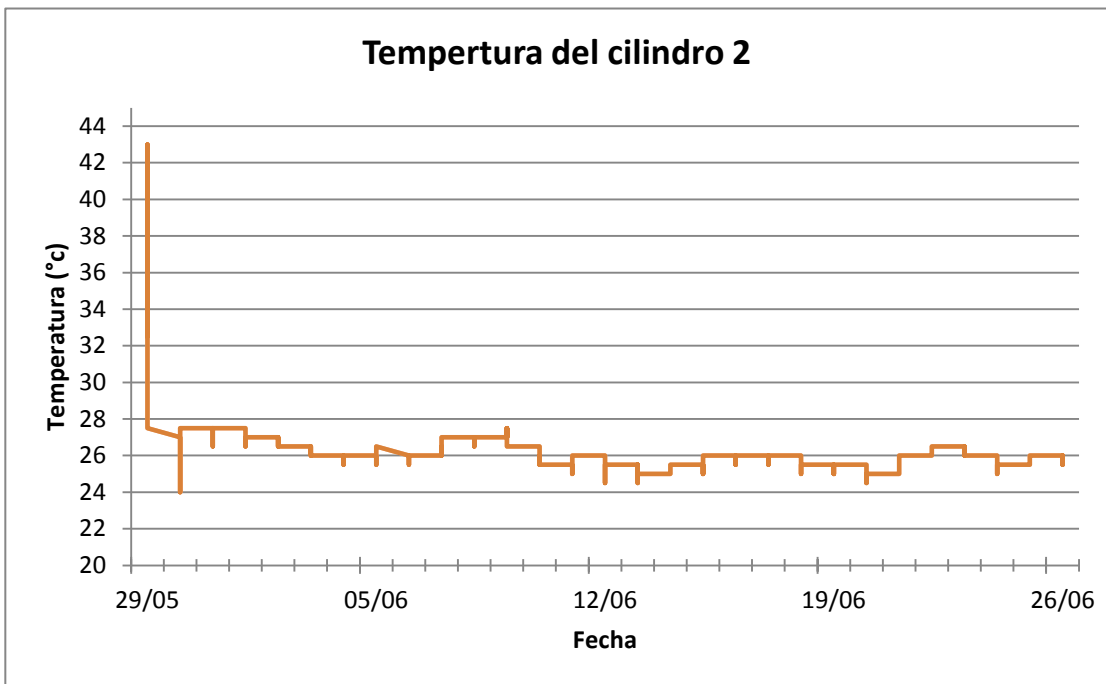


Figura 3.22 Grafica temperatura-tiempo Cilindro 2

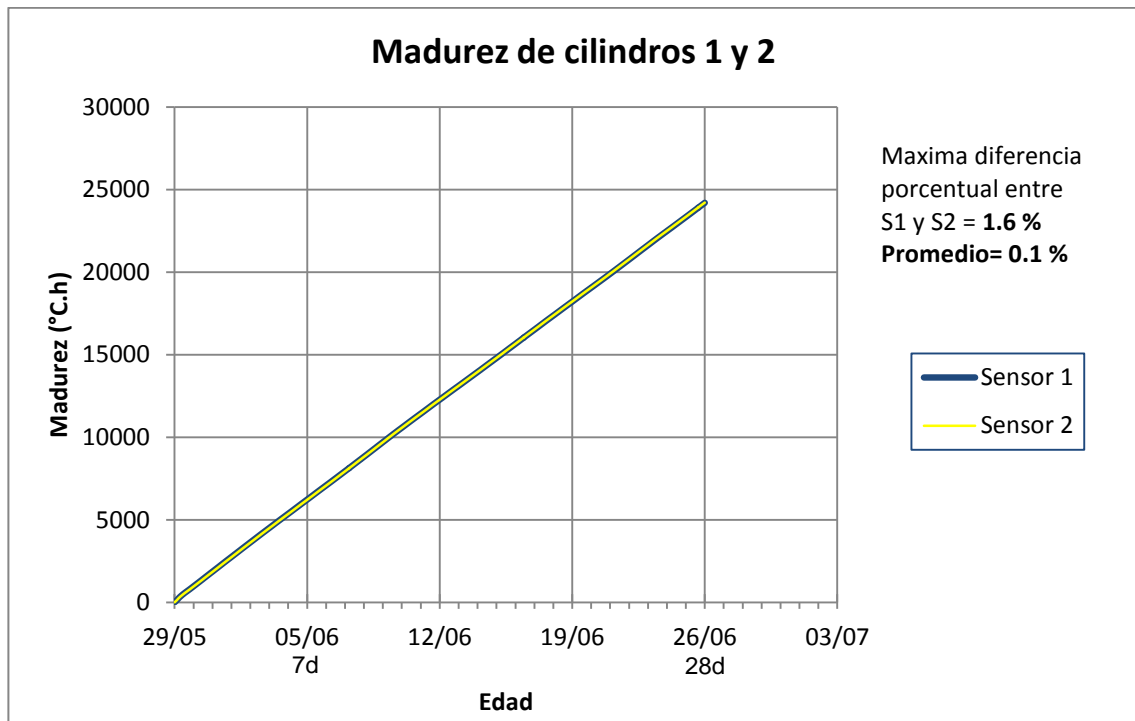


Figura 3.23 Grafica Madurez en cilindros 1 y 2.

3.4.4 Curva de correlación Resistencia-Índice de Madurez (TTF)

Luego de obtener los datos de laboratorio de los ensayos a compresión cilindros y flexión de vigas junto con las lecturas de madurez arrojadas por los sensores a los días 1, 3, 7, 14 y 28; se procede a vincular ambos parámetros mediante una ecuación, en donde en el eje de las ordenadas (Y) se grafican valores de resistencia obtenidas en laboratorio y en el eje de las abscisas (X) se grafica el índice de madurez, para el cual esta investigación utiliza Factor tiempo-temperatura (TTF).

A continuación se detalla en la tabla 3.8 el resumen con los valores de resistencia y madurez a las edades especificadas:

Edad (días)	Resistencia		Madurez (°C-h)		
	KiloPascales	Kg/cm2	Sensor 1	Sensor 2	Promedio Madurez
1	12,258.31	125	981	971	976
3	22,751.43	232	2,759	2,745	2,752
7	30,302.55	309	6,232	6,222	6,227
14	31,087.08	317	12,284	12,283	12,283.5
28	32,656.14	333	24,202	24,215	24,208.5

Tabla 3.8: Resumen de edad, resistencia y madurez de cilindros.

Se emplea la línea de tendencia central y se obtiene la ecuación logarítmica natural y el valor de R^2 que correlaciona la resistencia y la madurez para el diseño de mezcla específico del proyecto.

En la figura 3.23 se observa la correlación la resistencia versus la madurez. De esta misma se obtiene la siguiente ecuación.

$$f'c = 6,400.8 \ln(M) - 29,301 \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Dónde:

$f'c$ = Resistencia a compresión del concreto (Kilopascales)

M = Madurez del concreto (°C-h)

La ecuación 3.1 servirá para predecir o estimar la resistencia del concreto en el campo.

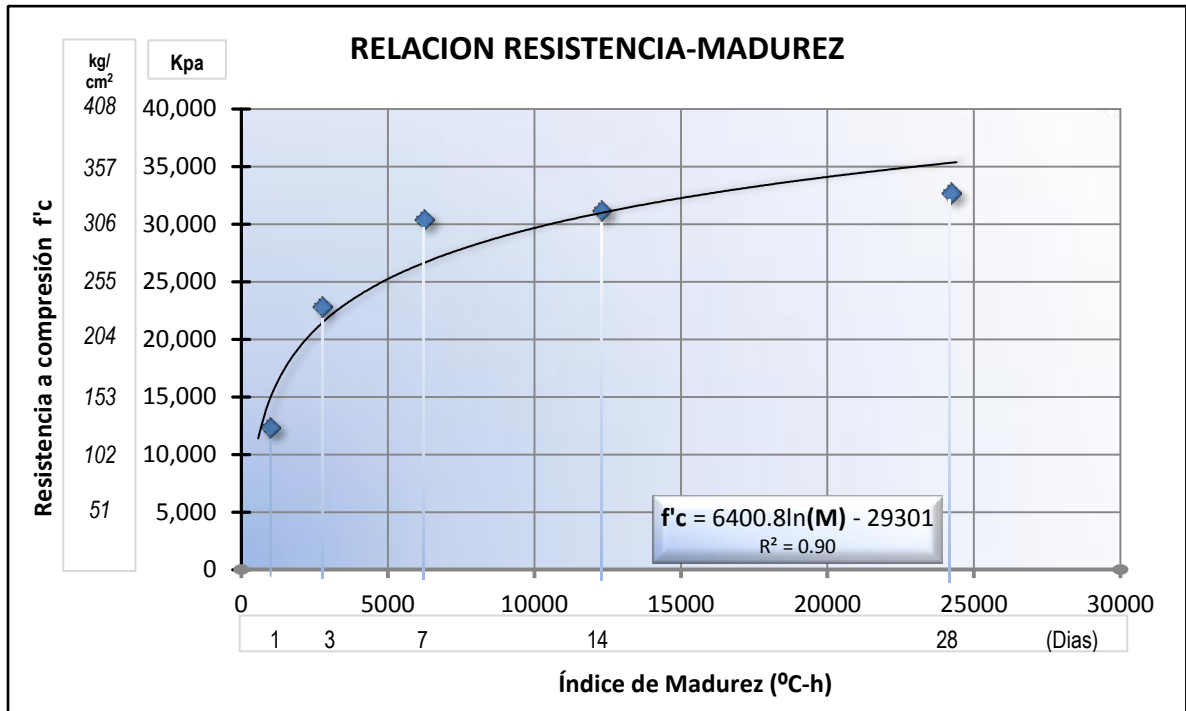


Figura 3.23 Grafica de Resistencia Vs Madurez.

CAPITULO 4

CAPITULO IV:

MEDICION DE MADUREZ Y RESISTENCIA IN SITU

4.1 Resumen Metodológico para la Aplicación del pavimento hidráulico.

Una vez terminado el proceso de calibración de la mezcla y obtenida la ecuación que sirve para determinar la resistencia del concreto en el campo por medio del equipo de madurez, se procede a instrumentalizar con los sensores térmicos para evaluar la resistencia del pavimento.

A continuación se hará un resumen del método utilizado para colocar el concreto en la carretera. La practicidad del método de la madurez/resistencia en la fase de campo está altamente relacionada con la metodología utilizada para colocar el concreto plástico sobre la sub-base, en este apartado se expondrá la secuencia utilizada en dicho proyecto por la empresa constructora; dicho método presentó deficiencias y ventajas en cuanto a la instrumentalización de los **150** metros lineales de calle en un carril.

Proceso constructivo para la colocación del concreto hidráulico con regla vibratoria:

1) Colocación del molde metálico y limpieza de la zona de colado.

Se coloca el molde metálico de acuerdo al alineamiento topográfico, anclándolo con pines de 5/8" al suelo cemento previamente recibido y aprobado por la supervisión. Dicho molde tiene una altura de 15 cm. Ver figura 4.1

Después de la colocación de los moldes, se procede a limpiar el área del carril con soplete para eliminar toda partícula fina (polvo) y enseguida se utiliza un camión cisterna para rociar y humedecer la zona de colado.



Figura 4.1 Molde metálico anclado en la base.

2) Colocación del concreto y texturizado del concreto.

Como el colado es por un carril a la vez, el camión puede entrar en el carril de trabajo o alternativamente puede ubicarse en el carril adyacente.

Holcim S.A. de C.V. sirve el concreto en camiones concreteros “trompos” tipo Mixer; de capacidad de 8 Ton. Cuando se descarga, varios auxiliares distribuyen el concreto con azadones para obtener un área homogénea.

Ver figura 4.2



Figura 4.2 Descarga y distribución del concreto en zona de colado.

Luego se enraza con regla vibratoria para sacar todos los vacíos y acomodarlo a los moldes. Adicionalmente se introducen vibradores manuales para mejorar la compactación del concreto.

Cuando la regla vibratoria haya enraizado en concreto se procederá a llanearlo con una Bump Cutter para quitar cualquier protuberancia que presente en la superficie, y se utilizará la llana tipo Channel Float para darle una apariencia lisa. A continuación un grupo de albañiles darán el acabado final para eliminar cualquier imperfección mínima utilizando llanas metálicas manuales. Ver figura 4.3



Figura 4.3 Enrazado y acabado de superficie de concreto.

Luego que la superficie del concreto este totalmente lisa se procederá a realizar el texturizado para cumplir con el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) para carreteras. Este se ejecutará con un cepillo de celdas metálicas.

Ver figura 4.4



Figura 4.4 Texturizado del concreto con cepillo celdas metálicas.

3) Curado del concreto

Se realiza el curado aplicando una membrana que retiene el agua, la cual es aplicada con bombas de aspersión, como un roció fino y suave de forma continua y uniforme. Ver figura 4.5.



Figura 4.5 Curado del concreto con aditivo formador de membrana.

4) Corte y sellado de juntas

El corte de juntas se realizará de acuerdo a las especificaciones del proyecto, parámetros tradicionales establecen que dentro de un rango de 2 a 6 horas después del colado o cuando el concreto tenga suficiente resistencia como para soportar el peso de la máquina cortadora y su vibración.

Ésta investigación profundiza más en este tópico, estableciendo además de los parámetros temporales (tiempo), cuantificaciones de resistencia a compresión del concreto.

El corte es de un ancho de 3mm y una profundidad de $\frac{1}{4}$ de la losa (1.5") y se realizará con cortadora de concreto en verde Husqvarna Soff-Cut. Ver figura 4.6.

Pasados 7 días de colado o cuando el concreto haya alcanzado aproximadamente el 80% de su resistencia se realizará la limpieza de las juntas transversales y longitudinales utilizando un compresor de aire portátil; inmediatamente se procederá a colocar la tira de respaldo (Backer Rod) y se sellará con Dow Corning890 (Silicona autonivelante)



Figura 4.6 Corte de junta transversal

4.2 Procedimiento para la instrumentalización de tramo de 150 m.

La etapa de la instrumentalización en campo inicio en julio 5 de 2012 a las 12:10 pm, en el tramo 7B de la carretera longitudinal de norte, que conduce de Lislique a Anamorós, con una longitud total de 8+200.00.

El tramo de análisis es la 0+743 hasta la 0+893, para un total de 150 metros lineales en un solo carril, se colocaron 3 sensores a cada 50 ± 0.1 metros a diferentes profundidades para evaluar y monitorear la madurez en distintas zonas del pavimento.

A continuación se explica, en resumen, el procedimiento empleado para instrumentalizar:

- Mediante un taladro se perforó la base de suelo-cemento para anclar las piezas en forma de U (Grapas) que sirven para controlar la profundidad y ubicación de los sensores. Cabe señalar que las grapas de $\Phi \frac{1}{4}$ " con punta redondeada no eran suficientes para perforar por si mismas la base, a lo que se recomienda utilizar grapas de $\Phi \frac{1}{2}$ " cuando las bases sean de suelo-cemento. Ver figura 4.7

Las grapas se colocaron paralelas a la dirección de pavimentación para proporcionar estabilidad adicional al momento que el concreto se descargue sobre ellos.



Figura 4.7 Instalación de grapas para colocación de sensores.

En la colocación de las grapas y sensores se cumplió con la ACPA 2002 (American Concrete Pavement Association) que establece diferentes alturas de la losa de concreto. El primer sensor se colocó a 1.2" (3.0 cm) desde la superficie, la cual nos proporciona información útil para determinar el momento preciso de corte de las juntas, reduciendo las posibilidades de fisura; el segundo sensor se colocó al centro de la losa (a 7.5cm) y proporciona información de la resistencia temprana la cual nos dará criterios de control de calidad y de apertura al tráfico, y el último sensor colocado en el último tercio del espesor del pavimento (a 3.75cm de la base) proporciona información sobre los esfuerzos y temperaturas a esa profundidad para evaluar las diferencias que hay entre las ubicaciones, *ver figura 4.8*. Luego se sujetaron los sensores con cinta adhesiva a las grapas y los cables

conductores se anclaron con grapas de acero a la base manteniendo una línea recta para evitar que se dañen con las operaciones de colado. Los cables se sacaron al exterior del molde y sus extremos fueron etiquetados; se recomienda que queden protegidos en el interior de un poliducto y evitar que los cables queden a simple vista.

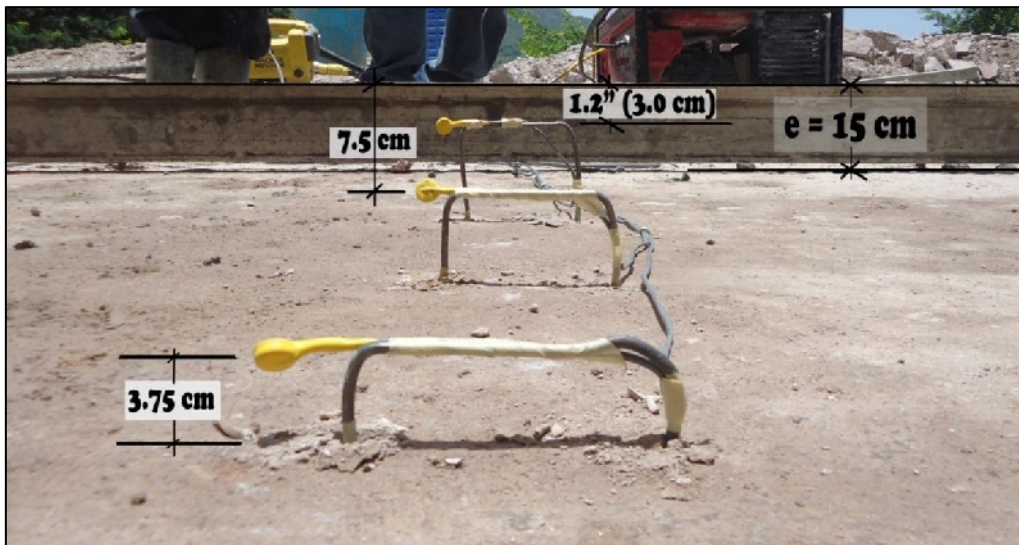


Figura 4.8 Profundidad de los sensores antes del colado.

El sensor más externo se ubicó a 60 cm (2ft) del borde de la losa y el resto espaciados 30 cm (1ft) del primero. Tal como se muestra en la figura 4.9.

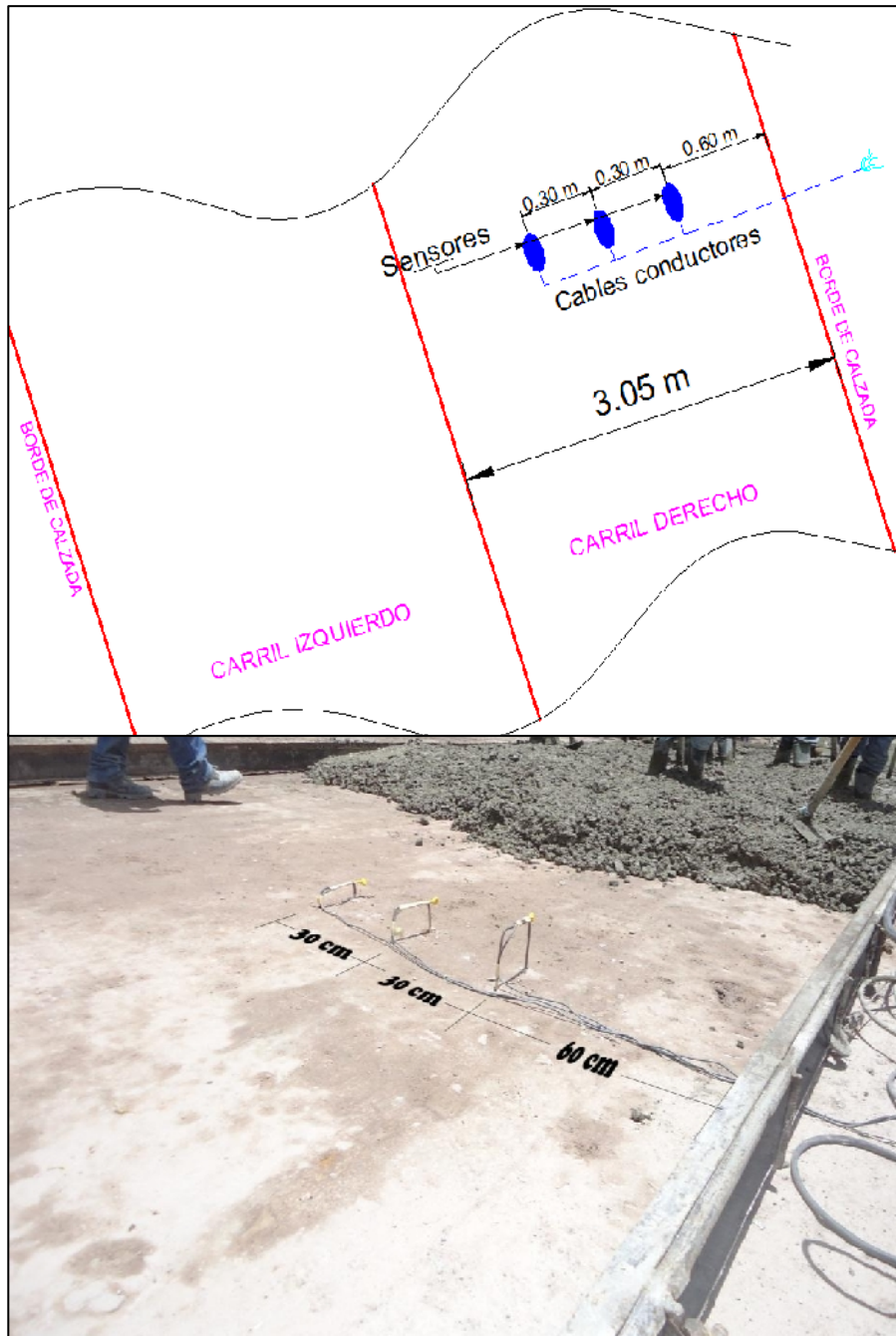


Figura 4.9 Ubicación en planta de los sensores.

Es importante mencionar que se alternaron arreglos de los sensores en cada estacionamiento, de manera que el sensor colocado en la estación 0+743 a 60 cm del borde de la losa y en la parte superior (a 1.2” de la rasante) en la primera estación se alternó en la estación siguiente (0+793), colocándolo a 90 cm del borde de la calzada y siempre a la misma profundidad; cambiándolo nuevamente en la 0+843 colocándolo a 120 cm del borde exterior del pavimento y manteniendo la misma profundidad. Esto con el motivo de atender las variaciones de la temperatura en diferentes posiciones de la losa y establecer un mejor parámetro de correlación promediada de madurez y resistencia en los diferentes posicionamientos.

A continuación se presenta un cuadro resumen que muestra las posiciones y profundidades de los 12 sensores empleados:

Sensor	Profundidad medida a partir del borde superior de losa.	Localización lateral con respecto al borde de la losa
Estación 0+743		
A	11 cm	120 cm
B	7.5 cm	90 cm
C	3 cm	60 cm
Estación 0+793		
A	11 cm	60 cm
B	7.5 cm	120 cm
C	3 cm	90 cm
Estación 0+843		
A	11 cm	90 cm
B	7.5 cm	60 cm
C	3 cm	120 cm
Estación 0+893		
A	11 cm	120 cm
B	7.5 cm	90 cm
C	3 cm	60 cm

Tabla 4.1 Resumen de ubicación lateral de sensores en carril.

Inmediatamente después de la instalación de los sensores el camión concretero descargó una porción de concreto para que Control de Calidad evalué el revenimiento, temperatura y elabore especímenes cilíndricos para aceptar la resistencia, cilindros que nos servirán para establecer la validación de la curva de relación resistencia-madurez elaborada en la fase I.

Después se continuó con el proceso de pavimentación, vertiendo concreto sobre los sensores mediante el canal que tiene el camión y luego los auxiliares dispersaron con azadones el concreto hasta que quedó casi homogéneo, para después pasar la regla vibratoria. Ver figura 4.11.



Figura 4.10 Resumen fotográfico de pavimentación con sensores de madurez colocados en la base.

4.3 Medición de la madurez en campo

En esta fase es donde podremos estimar la resistencia del concreto en campo por medio del equipo de madurez, si bien sabemos que la versatilidad de este método hace que sea posible medir resistencias en cualquier momento después de colado el concreto pero para ese efecto se requiere previamente introducir al Pocket Pc en el Programa "COMMAND CENTER" la ecuación de resultante del proceso de laboratorio donde se hizo la calibración de la mezcla.

Obtuvimos la (Ecuación 3.1) del apartado 3.4.4 del capítulo anterior donde se reescribe a continuación:

$$\text{Resistencia}(Kpa) = 6400.8 \ln(M) - 29301 \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Si bien sabemos en la etapa anterior con el equipo de Madurez solo se obtenían datos de temperatura y madurez; en esta etapa esto cambia ya que con las variables que nos da la ecuación 3.1, nos servirán para que dar la función al equipo de Madurez de arrojar datos de resistencias directamente, al mismo tiempo que se obtienen datos de madurez y temperatura del concreto.

En la figura 4.11 se muestra como fueron introducidos las variables necesarias para configurar los archivos en donde se guardarán cada uno de los registros que los sensores instrumentados, si bien se introdujeron 12 sensores en pavimento repartidos en cuatro grupos, así mismo igual número de archivos fue necesario configurar para dar la lectura a los sensores correctamente.

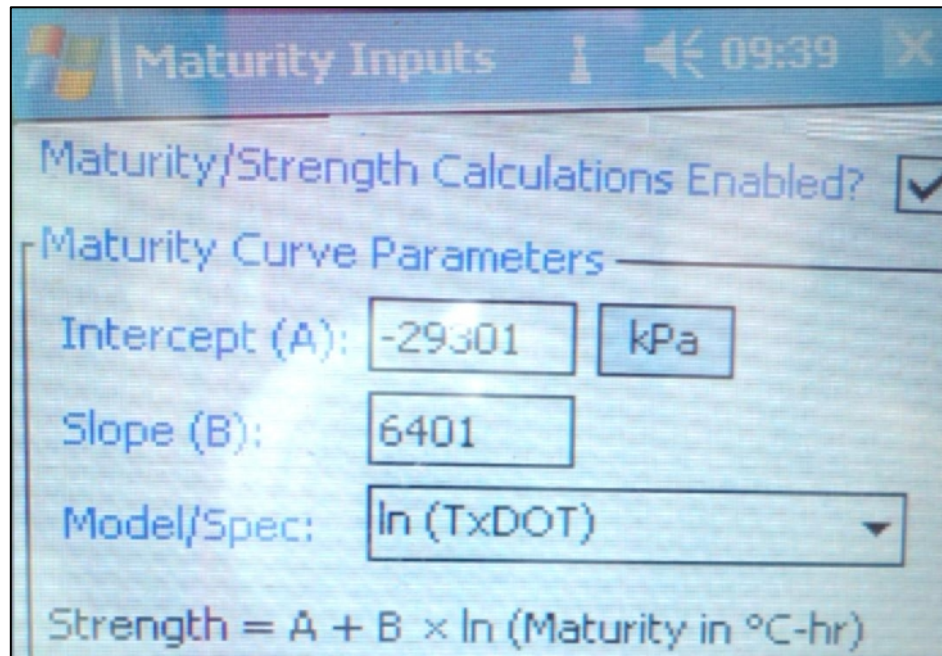


Figura 4.11 Captura de pantalla del Software Command Center en la que se introducen los Datos de la curva de Madurez.

Según la ecuación 3.1 tenemos que los Valores que el equipo de madurez pide en nuestro caso fueron $A = -29,301$ y $B = 6,401$ una vez introducidos estos datos y los demás explicados en el apartado 3.4.3 de esta tesis se

procede a hacer un archivo para cada sensor de los 12 que usamos en esta etapa de campo. Y de una vez se está listo para la obtención de los tres tipos de registros: Temperatura, Madurez, y Resistencia.

Aun así los sensores colocados tienen la capacidad de almacenar cada 20 minutos los registros de Temperatura-Madurez-Resistencia durante 28 días continuos alcanzando un total de 2048 lecturas que se irán sobrescribiendo a medida que pasa el tiempo.

Una vez configurado el equipo para la etapa de campo, la toma de lecturas es prácticamente similar a la etapa de calibración de la mezcla, los sensores se conectan al Pocket Pc y desde el Software "Command Center" se abre el archivo respectivo de cada sensor, es ahí donde indicamos que vamos a leer el sensor desde el Comando *Read* y así obtendremos los datos de Resistencia que son los que más importancia tienen en la investigación.

Ver figura 4.12



Figura 4.12: Tomando lecturas de resistencia en campo con el equipo de Madurez

Depuse de la etapa de colado se tomaron las lecturas y se guardaron los datos de 24 horas después del colado, después de estos se recolectaron a edades de 7 y 28 días.

A continuación se presentan los datos del primer grupo de sensores ubicados en el estacionamiento 0+743 a las 24 horas luego del colado:

Hora de colado: 12:04 pm

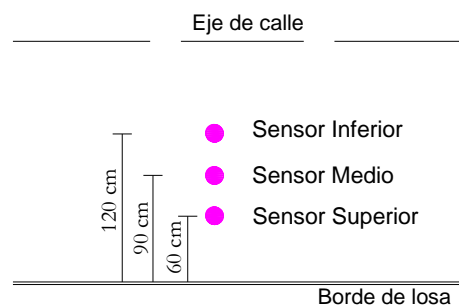
ESQUEMA DE UBICACIÓN 0+743

Ubicación a partir del borde de la losa:

Sensor inferior: 120 cm

Sensor medio: 90 cm

Sensor superior 60 cm



Hora	Sensor Inferior				Sensor Medio				Sensor Superior			
	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c		Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c		Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c	
			Kpa	Kg/cm2			Kpa	Kg/cm2			Kpa	Kg/cm2
1	31.5	51	0	0.00	32	50	0	0.0	33	44	0	0.0
2	34	85	0	0.00	35.5	84	0	0.0	36	79	0	0.0
3	37.5	121	1406	14.3	40	123	1476	15.1	40	118	1218	12.4
4	41.5	161	3238	33.0	45	166	3408	34.8	44.5	160	3199	32.6
5	45	206	4792	48.9	45.5	212	4971	50.7	45.5	206	4798	48.9
6	44	250	6042	61.6	44.5	256	6202	63.3	44.5	251	6055	61.8
7	43	293	7065	72.1	43	300	7205	73.5	43.5	294	7083	72.2
8	42	336	7928	80.9	42	342	8051	82.1	42.5	337	7950	81.1
9	41	377	8671	88.4	40.5	383	8775	89.5	41	378	8694	88.7
10	40	417	9322	95.1	39.5	423	9411	96.0	40	419	9345	95.3
11	39	457	9898	101.0	38.5	462	9973	101.7	39	458	9922	101.2
12	38	495	10414	106.2	37.5	500	10477	106.9	38	497	10438	106.5
13	37	532	10880	111.0	36.5	537	10932	111.5	37.5	534	10906	111.2
14	36.5	569	11306	115.3	35.5	573	11347	115.7	36.5	571	11332	115.6
15	35.5	605	11697	119.3	35	608	11731	119.7	36	608	11725	119.6
16	35	640	12059	123.0	34	654	12197	124.4	35	654	12202	124.5
17	34.5	675	12397	126.5	34	677	12415	126.6	34.5	678	12423	126.7
18	34	709	12711	129.7	33	721	12822	130.8	34	723	12839	131.0
19	33.5	742	13007	132.7	32.5	743	13013	132.7	33.5	745	13034	132.9
20	33	775	13285	135.5	32.5	786	13376	136.4	33	790	13403	136.7
21	33	808	13552	138.2	33	808	13552	138.2	33.5	812	13581	138.5
22	33.5	841	13810	140.9	34.5	842	13816	140.9	34.5	846	13844	141.2
23	34.5	876	14064	143.5	36	866	13993	142.7	35.5	869	14019	143.0
24	36	911	14319	146.1	38.5	916	14353	146.4	38	919	14371	146.6

Tabla 4.2: Datos de temperatura, madurez y resistencia obtenidos del primer grupo de sensores ubicados en el estacionamiento 0+743

Hora de colado: 2:05 pm

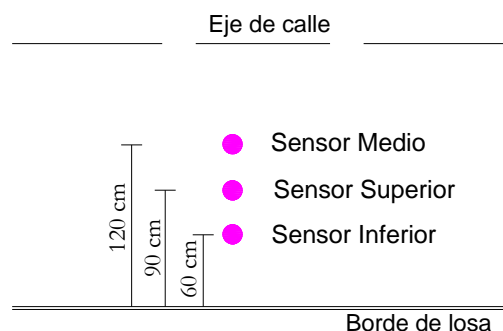
ESQUEMA DE UBICACIÓN 0+793

Ubicación a partir del borde de la losa:

Sensor inferior: 60 cm

Sensor medio: 120 cm

Sensor superior 90 cm



Hora	Sensor Inferior				Sensor Medio				Sensor Superior			
	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c		Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c		Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c	
			Kpa	Kg/cm2			Kpa	Kg/cm2			Kpa	Kg/cm2
1	35.5	51	0	0.0	35	53	0	0.0	36	51	0	0.0
2	38.5	89	0	0.0	38.5	90	0	0.0	39	89	0	0.0
3	42	129	1823	18.6	42	131	1897	19.3	42	130	1848	18.8
4	45.5	174	3728	38.0	45.5	176	3777	38.5	44	174	3716	37.9
5	44.5	219	5194	53.0	44.5	221	5238	53.4	43.5	218	5150	52.5
6	44	263	6370	65.0	43	264	6391	65.2	42	260	6293	64.2
7	43	306	7343	74.9	41.5	306	7336	74.8	41	301	7237	73.8
8	42	349	8168	83.3	40	347	8131	82.9	39.5	341	8035	82.0
9	40.5	390	8880	90.6	39	386	8820	90.0	38.5	380	8728	89.0
10	39.5	430	9506	97.0	38	424	9423	96.1	37.5	418	9337	95.2
11	38.5	469	10062	102.6	36.5	461	9959	101.6	36.5	455	9880	100.8
12	38	507	10563	107.7	36	497	10442	106.5	36	492	10369	105.8
13	37	544	11019	112.4	35	532	10882	111.0	35	527	10813	110.3
14	36.5	581	11436	116.6	34.5	567	11286	115.1	34.5	562	11221	114.5
15	35.5	616	11819	120.6	33.5	601	11656	118.9	34	596	11598	118.3
16	35	652	12176	124.2	33	634	12002	122.4	33.5	607	11948	121.9
17	34.5	686	12508	127.6	32.5	667	12323	125.7	33	607	12275	125.2
18	34	721	12819	130.8	32.5	699	12628	128.8	32.5	607	12582	128.3
19	34	755	13114	133.8	33	732	12920	131.8	33	607	12876	131.3
20	34.5	789	13397	136.6	35	766	13212	134.8	34.5	607	13169	134.3
21	35	812	13584	138.6	37.5	803	13510	137.8	36	607	13365	136.3
22	37	860	13954	142.3	38.5	835	13760	140.4	40	842	13813	140.9
23	38.5	898	14230	145.1	40.5	875	14058	143.4	42	883	14119	144.0
24	40	938	14506	148.0	42	916	14355	146.4	43.5	926	14425	147.1

Tabla 4.3: Datos de temperatura, madurez y resistencia obtenidos del primer grupo de sensores ubicados en el estacionamiento 0+793

Hora de colado: 4:20 pm

ESQUEMA DE UBICACIÓN 0+843

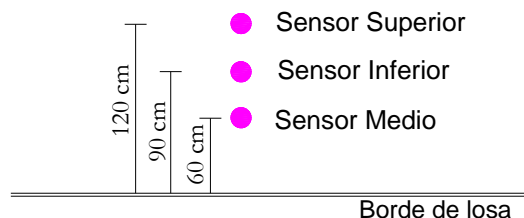
Eje de calle

Ubicación a partir del borde de la losa:

Sensor inferior: 90 cm

Sensor medio: 60 cm

Sensor superior 120 cm



Hora	Sensor Inferior				Sensor Medio				Sensor Superior			
	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c		Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c		Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c	
			Kpa	Kg/cm2			Kpa	Kg/cm2			Kpa	Kg/cm2
1	33.5	46	0	0.0	31.5	54	0	0.0	31.5	50	0	0.0
2	35	81	0	0.0	34	88	0	0.0	32.5	82	0	0.0
3	37	117	1191	12.1	36	123	1502	15.3	34.5	116	1127	11.5
4	39.5	156	3009	30.7	39	161	3225	32.9	37	152	2857	29.1
5	41.5	197	4506	46.0	42.5	202	4688	47.8	40.5	192	4352	44.4
6	41.5	238	5731	58.5	42.5	245	5908	60.3	40.5	233	5591	57.0
7	41	279	6748	68.8	42	287	6925	70.6	39.5	272	6582	67.1
8	40.5	320	7619	77.7	41	328	7787	79.4	38.5	311	7439	75.9
9	39.5	360	8370	85.4	40	369	8531	87.0	37	349	8177	83.4
10	39	399	9034	92.1	39.5	409	9185	93.7	36.5	385	8806	89.8
11	38.5	438	9626	98.2	38.5	447	9766	99.6	35.5	421	9378	95.7
12	37.5	475	10157	103.6	37.5	485	10286	104.9	34.5	456	9889	100.9
13	37	513	10639	108.5	37	522	10758	109.7	34	490	10349	105.6
14	36.5	549	11079	113.0	36	559	11189	114.1	33	523	10767	109.8
15	35.5	585	11484	117.1	35.5	594	11585	118.2	32.5	556	11158	113.8
16	35.5	620	11861	121.0	35	630	11953	121.9	33	589	11527	117.6
17	35	656	12212	124.6	35	665	12299	125.4	34	622	11876	121.1
18	35.5	691	12548	128.0	35.5	700	12631	128.8	35.5	657	12227	124.7
19	36.5	727	12873	131.3	37	736	12956	132.2	38	694	12577	128.3
20	37.5	764	13191	134.5	38	774	13276	135.4	40.5	734	12936	131.9
21	38.5	802	13502	137.7	39.5	813	13590	138.6	42.5	776	13292	135.6
22	40	841	13810	140.9	41.5	854	13905	141.8	44	819	13637	139.1
23	40.5	882	14109	143.9	42.5	896	14213	145.0	44.5	864	13980	142.6
24	41	923	14400	146.9	42.5	939	14509	148.0	44.5	908	14298	145.8

Tabla 4.4: Datos de temperatura, madurez y resistencia obtenidos del primer grupo de sensores ubicados en el estacionamiento 0+843

Hora de colado: 7:45 pm

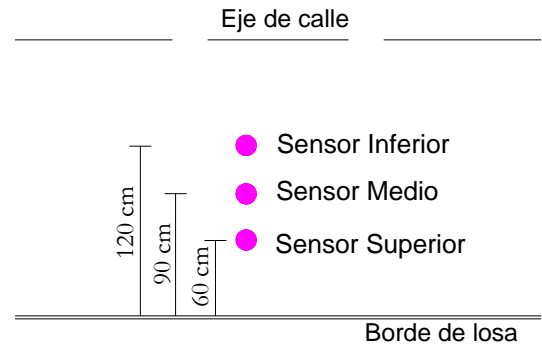
ESQUEMA DE UBICACIÓN 0+893

Ubicación a partir del borde de la losa:

Sensor inferior: 120 cm

Sensor medio: 90 cm

Sensor superior 60 cm



Hora	Sensor Inferior				Sensor Medio				Sensor Superior			
	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c		Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c		Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c	
			Kpa	Kg/cm2			Kpa	Kg/cm2			Kpa	Kg/cm2
1	29	46	0	0.0	29.5	47	0	0.0	28	45	0	0.0
2	30	75	0	0.0	30.5	77	0	0.0	28	73	0	0.0
3	31.5	106	570	5.8	32	108	689	7.0	29.5	102	293	3.0
4	33.5	139	2292	23.4	33.5	141	2391	24.4	31	132	1970	20.1
5	35.5	174	3716	37.9	35.5	176	3801	38.8	33	165	3369	34.4
6	36.5	210	4931	50.3	37	213	5017	51.2	35.5	199	4592	46.8
7	36.5	247	5956	60.8	37	250	6042	61.6	35.5	235	5641	57.5
8	36	283	6836	69.7	36.5	287	6918	70.6	34.5	270	6527	66.6
9	35.5	319	7595	77.5	35.5	322	7672	78.3	33.5	304	7283	74.3
10	34.5	354	8259	84.2	35	358	8334	85.0	32.5	336	7941	81.0
11	34	388	8853	90.3	34.5	392	8926	91.0	32	368	8525	87.0
12	34	422	9391	95.8	34	426	9458	96.5	32.5	401	9064	92.5
13	34	456	9887	100.8	34.5	461	9957	101.6	34.5	434	9580	97.7
14	35	491	10356	105.6	36	496	10432	106.4	37	471	10092	102.9
15	36.5	527	10809	110.3	37.5	533	10892	111.1	40	510	10601	108.1
16	38	564	11250	114.8	39.5	572	11342	115.7	42.5	551	11100	113.2
17	39.5	603	11678	119.1	41.5	613	11781	120.2	44.5	595	11589	118.2
18	41.5	644	12099	123.4	43	655	12210	124.5	45.5	640	12064	123.1
19	42	686	12502	127.5	43.5	699	12620	128.7	45.5	686	12506	127.6
20	42	728	12882	131.4	43.5	742	13007	132.7	45	732	12914	131.7
21	42.5	770	13244	135.1	43.5	786	13371	136.4	45	777	13299	135.6
22	42	812	13585	138.6	43	829	13715	139.9	43.5	821	13652	139.3
23	41	854	13904	141.8	42	871	14035	143.2	41.5	863	13971	142.5
24	40.5	881	14105	143.9	41.5	899	14236	145.2	40.5	890	14170	144.5

Tabla 4.5: Datos de temperatura, madurez y resistencia obtenidos del primer grupo de sensores ubicados en el estacionamiento 0+893

A continuación se presentan las gráficas de temperatura de los sensores embebidos en losa de pavimento a edad temprana (24 horas).

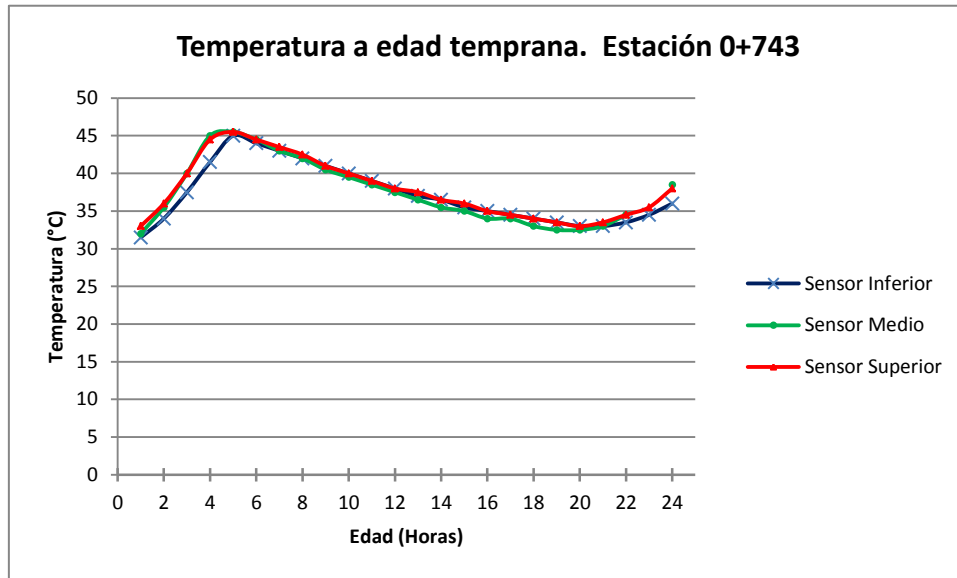


Figura 4.13 Grafica de temperatura vrs edad temprana. Estación 0+743

Se observa que la temperatura del sensor superior (rojo) en las primeras 24 horas es ligeramente superior a la temperatura del sensor del centro (verde); lo que indica que la influencia de la radiación solar afecta fuertemente la evolución de la madurez y por ende de la resistencia. El concreto a nivel de la parte inferior de la losa, cerca de la base se encuentra más “frio” debido a la poca influencia solar en sus primeras 5 horas.

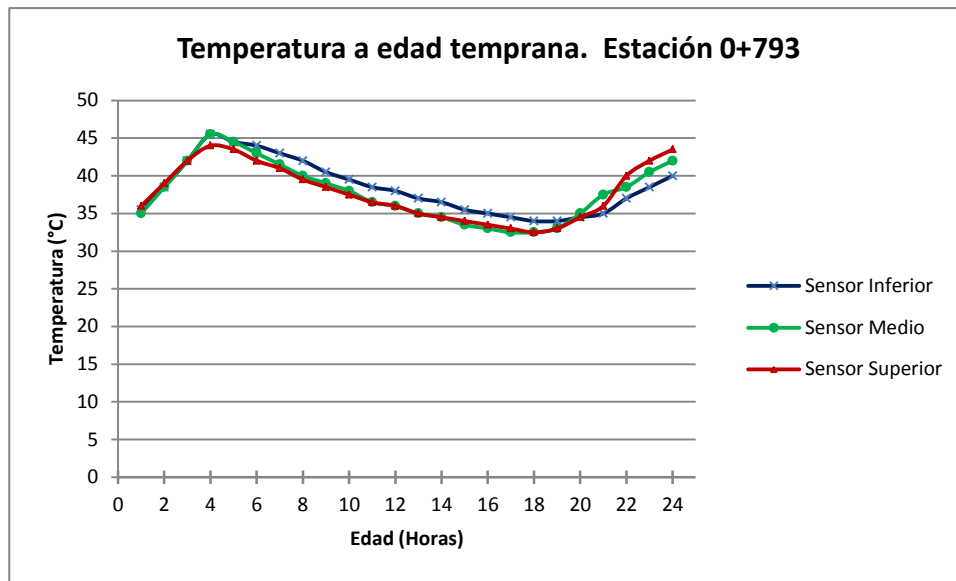


Figura 4.14 Grafica de temperatura vrs edad temprana. Estación 0+793

En la figura 000 (anterior) se muestra el registro térmico en función del tiempo de un colado hecho a las 2:05 pm; el concreto a profundidad de 3 cm (superior) indica que a las 4 horas después del colado (6:05 pm) posee una temperatura de 44.0°C, mientras que el concreto adyacente al sensor ubicado al centro de la losa especifica un valor de 45.5°C, estando éste 1.5°C por encima del superior debido a que la temperatura ambiente y el calor transmitido por el sol decreció a esas horas de la noche, mientras que el calor generado por la hidratación del concreto permaneció semi constante.

Caso contrario sucede en la estación 0+843 (ver figura 4.15) donde el concreto adquiere su máxima temperatura interna a edad de 6 horas posterior al colado, el sensor superior registra un valor de 40.5°C en comparación al sensor medio que registra una máxima de 42.5°C a la misma edad.

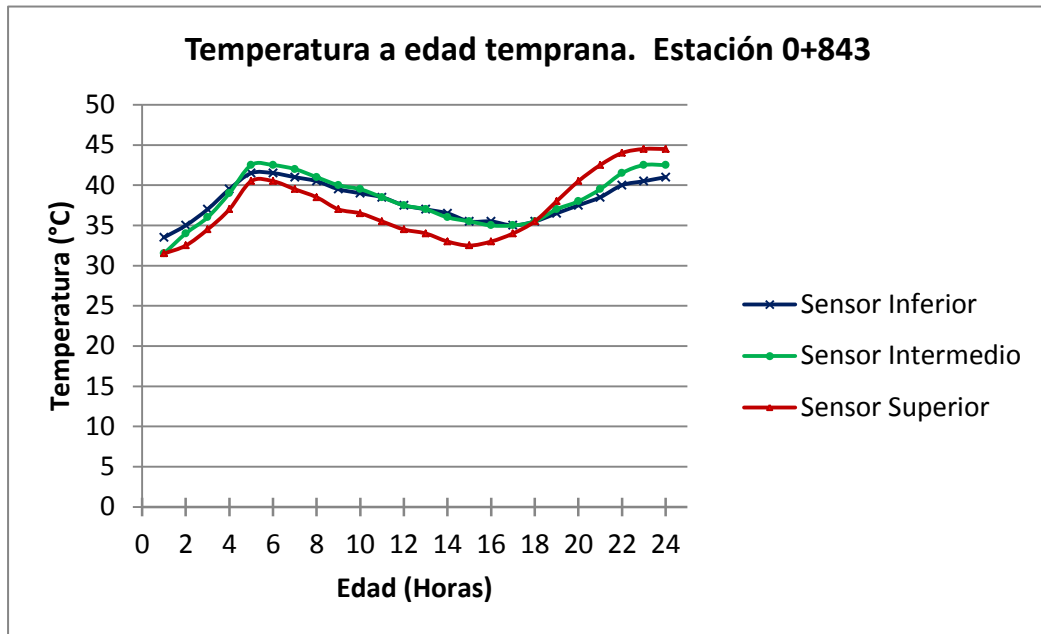


Figura 4.15 Grafica de temperatura vrs edad temprana. Estación 0+843

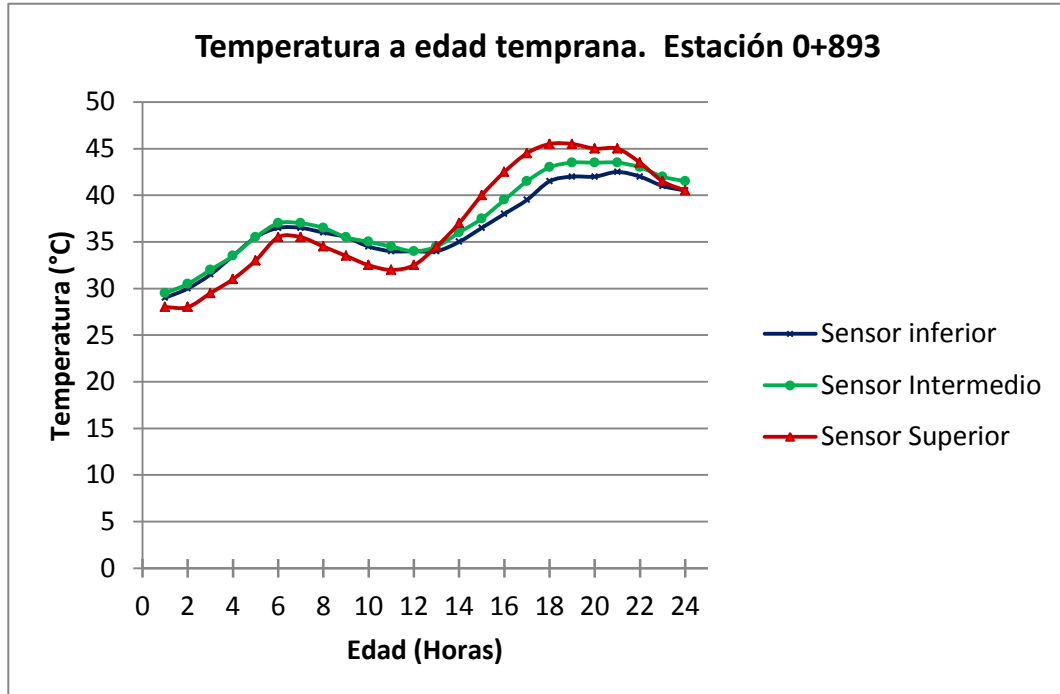


Figura 4.16 Grafica de temperatura vrs edad temprana. Estación 0+893

Un diferencial extremo sucede cuando el colado del concreto se realiza en horas nocturnas, la figura 4.16 nos muestra para la edad de 6 horas posterior al colado (2:45 am) que el concreto en la zona superior esta menos caliente que el concreto en el centro (-1.5°C), pero a medida avanza el tiempo la superficie de concreto se empieza a calentar debido a la influencia del sol llegando a una diferencia máxima de 2.5°C ocurrido a las 1:45 pm (18 horas después del colado).

A continuación se presenta el resumen de Temperatura, Madurez Y Resistencia registrada por cada sensor durante los 28 días de la etapa de campo.

	S1A			S1B			S1C		
	Sensor Inferior			Sensor Medio			Sensor Superior		
DIA	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)
3	34	2563	20941	36	2608	21053	35.5	2630	21104
7	31	5662	26014	33	5737	26098	32.5	5779	26144
14	34	11380	30482	35.5	11571	30588	36.5	11542	30572
28	36	23489	35120	38	23887	35228	41	24048	35271

Tabla 4.6: Datos de temperatura, Madurez y resistencia durante los 28 días Obtenidos del primer grupo de sensores ubicados en el estacionamiento 0+743

	S2A			S2B			S2C		
DÍA	Sensor Inferior			Sensor Medio			Sensor Superior		
	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)
3	35.5	2631	21107	37.5	2607	21048	38.5	2622	21087
7	34.5	5690	26045	37.5	5715	26073	39.5	5717	26075
14	39	11497	30547	41	11584	30596	43.5	11651	30633
28	37	23620	35156	39.5	23913	35235	42	24062	35275

Tabla 4.7: datos de temperatura, Madurez Y resistencia durante los 28 días
Obtenidos del segundo grupo de sensores ubicados en el estacionamiento 0+793

	S3A			S3B			S3C		
DÍA	Sensor Inferior			Sensor Medio			Sensor Superior		
	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)
3	36.5	2656	21169	37	2680	21225	35.5	2620	21081
7	37	5805	26174	38.5	5838	26209	41.5	5751	26113
14	40	11702	30660	41.5	11758	30691	45.5	11708	30664
28	37.5	23990	35256	39	24071	35277	43	24110	35288

Tabla 4.8: datos de temperatura, Madurez Y resistencia durante los 28 días
Obtenidos del tercer grupo de sensores ubicados en el estacionamiento 0+845

	S4A			S4B			S4C		
DÍA	Sensor Inferior			Sensor Medio			Sensor Superior		
	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)	Temp. (°C)	Madurez (°C*h)	f'c (Kpa)
3	32.5	2558	20927	32.5	2605	21044	30	2553	20916
7	36.5	5693	26049	36.5	5797	26164	34	5710	26068
14	40	11624	30618	40	11831	30731	35.5	11788	30707
28	39	23677	35172	41	24021	35264	46	23707	35180

Tabla 4.9: datos de temperatura, Madurez Y resistencia durante los 28 días
Obtenidos del cuarto grupo de sensores ubicados en el estacionamiento 0+ 893

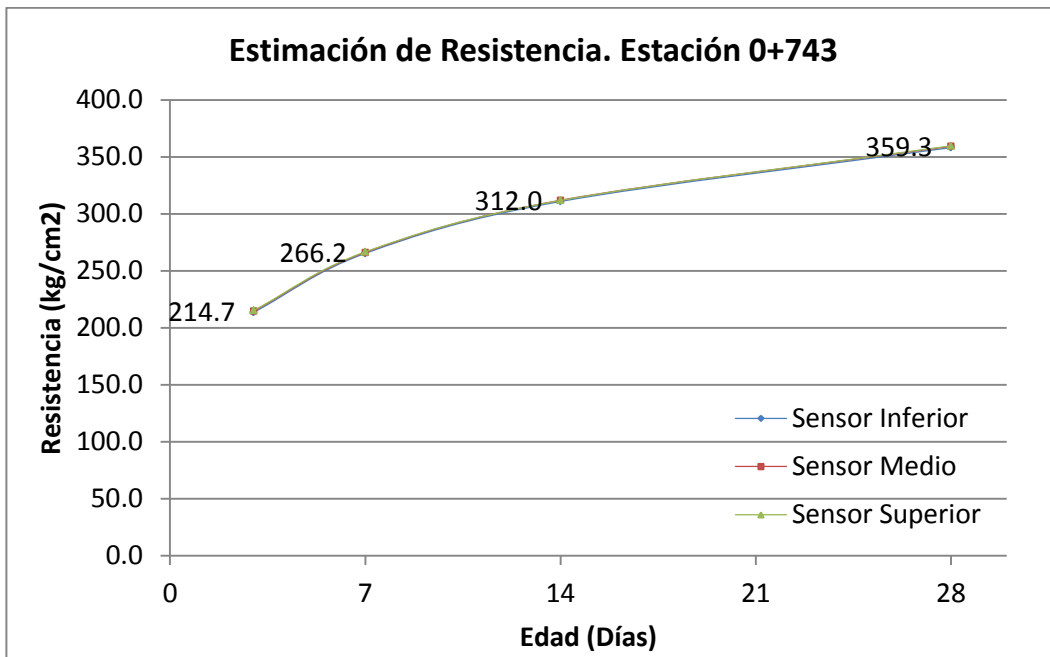


Figura 4.17 Grafica de temperatura vrs Resistencia 28 dias. Estación 0+743

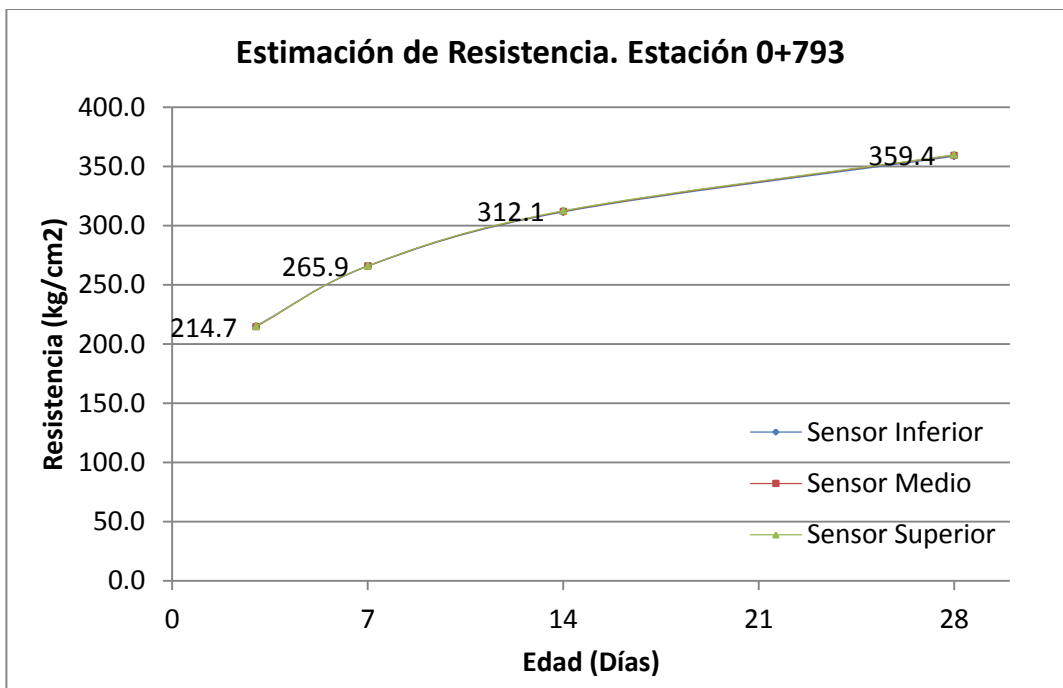


Figura 4.18 Grafica de temperatura vrs edad temprana. Estación 0+743

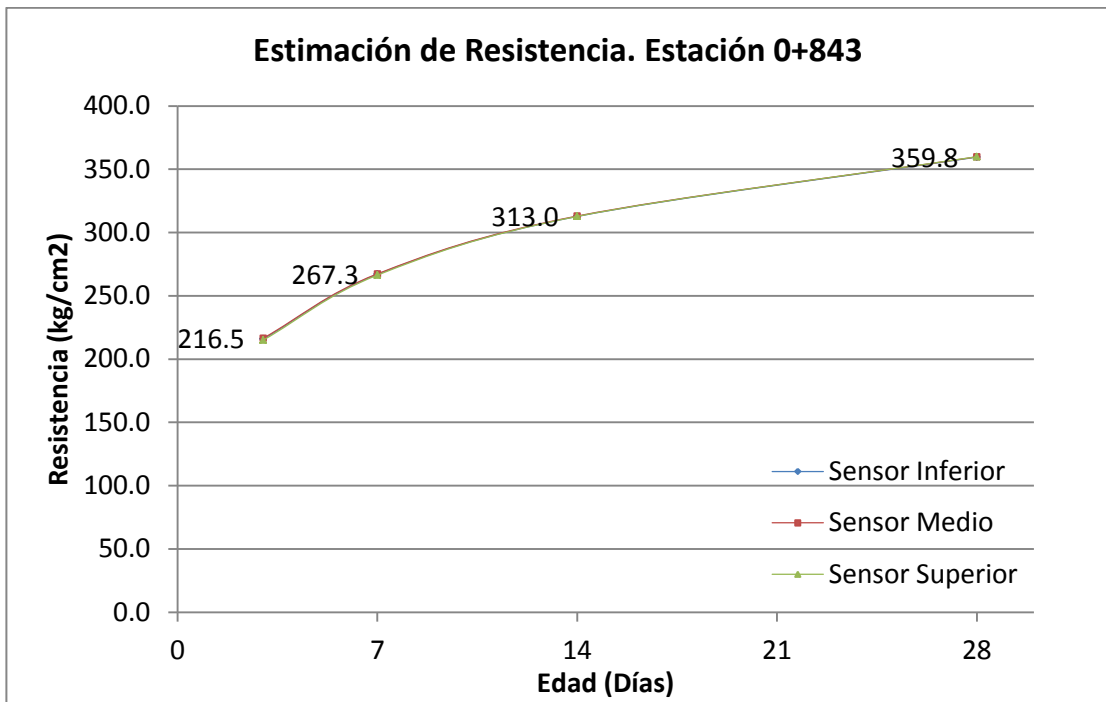


Figura 4.19 Grafica de temperatura vrs edad temprana. Estación 0+743

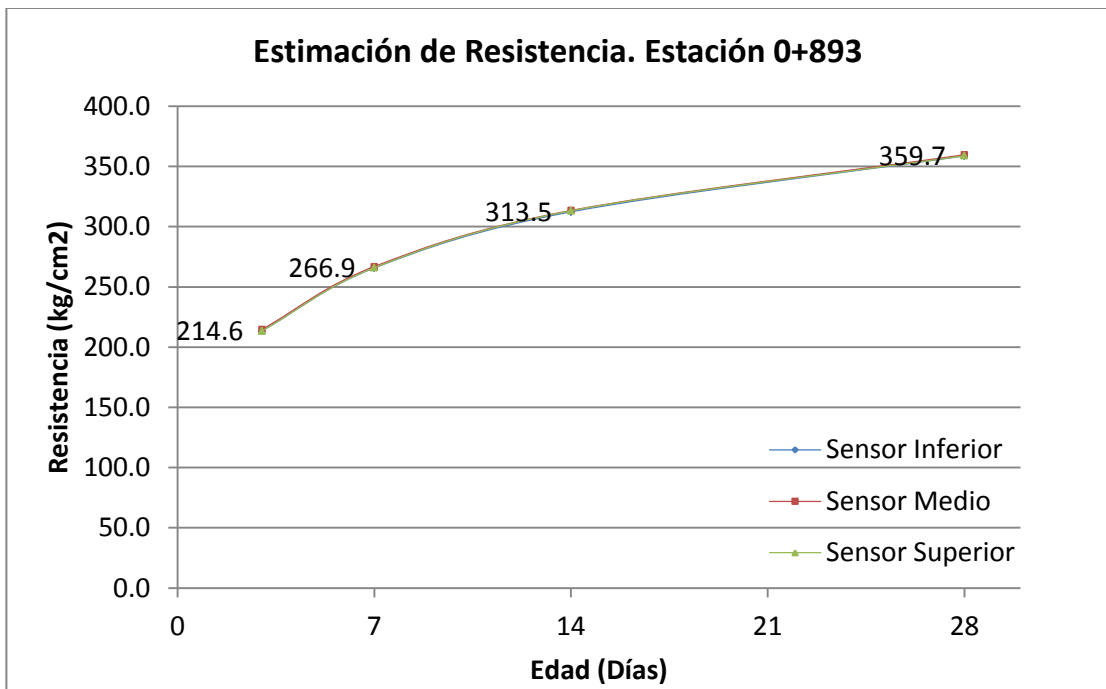


Figura 4.20 Grafica de temperatura vrs edad temprana. Estación 0+743

4.4 Validación de la curva de calibración.

El método de madurez se utiliza para determinar la resistencia del hormigón. Sin embargo, la madurez método se basa en mediciones de temperatura y tiempo solamente. No hay ninguna garantía de que el hormigón in situ tiene las proporciones de mezcla correctas, como en el diseño. Como tal la ASTM C1074 requiere la verificación de la resistencia potencial del hormigón in-situ antes de realizar operaciones críticas, como la eliminación de encofrado o postensado o simplemente cuando se sospechen de variaciones de las proporciones de la mezcla con la cual se realizó la relación y la que se sirve en campo.

Para la verificación por cualquier método se requiere que los puntos de validación estén dentro del 10% de la relación resistencia-madurez original, si no es así, una nueva relación deberá ser establecida o se deberán tomar medidas para incluir los efectos de la variación.

Como ya fue mencionado anteriormente hay dos maneras de realizar esta validación, para nuestra investigación optamos por supervisar los cilindros elaborados en la construcción y comparar estas resistencias con la curva de madurez.

Para el método de validación a usar son necesarios solamente 2 puntos o 2 valores de resistencia; de manera simultánea a la instrumentalización se elaboraron 4 cilindros para ser ensayados al día 7 y 28, a continuación se

presenta una tabla en la cual se muestran los resultados obtenidos de los ensayos.

Nº de cilindro	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia prom. (kg/cm ²)
1	05/07/2012	12/07/2012	7	15.2	30.6	61192	337.2	329.8
2	05/07/2012	12/07/2012	7	15.6	30.5	61616	322.4	
3	05/07/2012	02/08/2012	28	15.3	30.5	68536	372.8	374.87
4	05/07/2012	02/08/2012	28	15.3	30.5	69306	377.0	

Tabla 4.22: Ensayos de cilindros para validación de la curva de madurez

Los valores presentados han sido graficados y comparados con la relación resistencia-madurez previamente establecida en la Fase de Laboratorio. A continuación se puede apreciar la gráfica de validación.

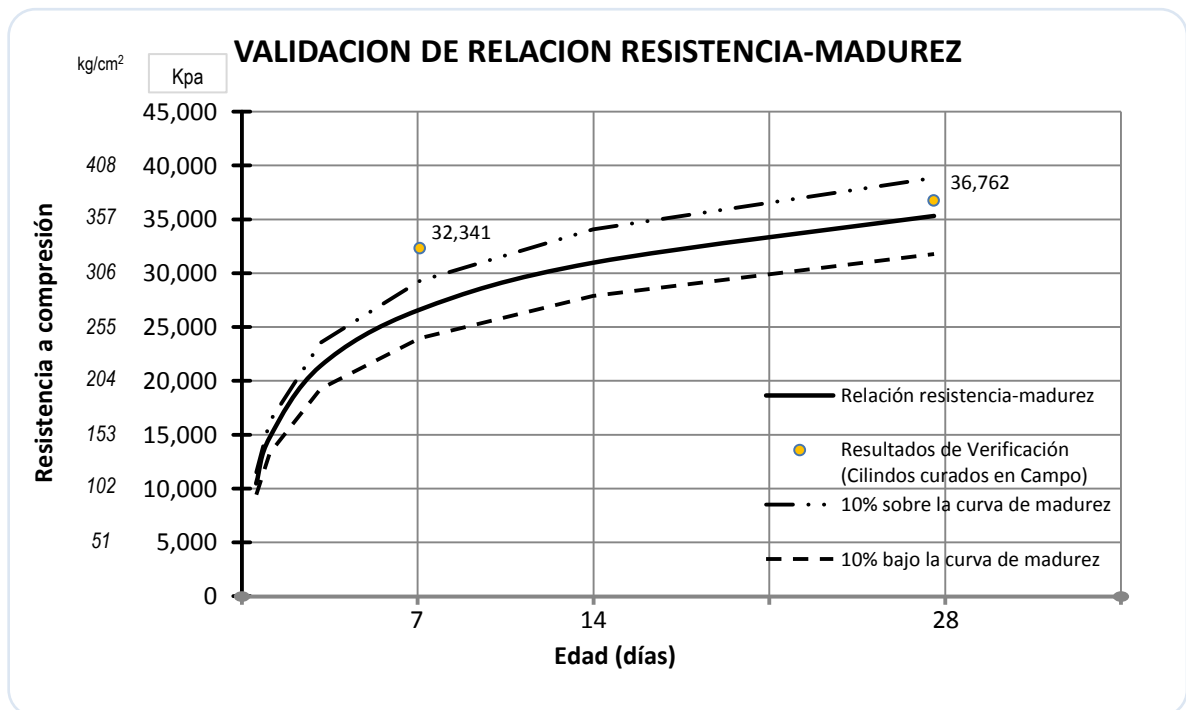


Figura 4.21 Verificación de la relación resistencia-madurez

Los círculos amarillos indican la resistencia de los cilindros curados en campo mediante la ASTM C31 y ensayados a los 7 y 28 días, las líneas punteadas indican la máxima desviación permitida para considerar válida dicha curva. El par de cilindros ensayados a los 7 días muestra una resistencia de 32,341 Kpa (329.8 kg/cm^2), por lo que existe una diferencia porcentual respecto al límite superior de 10.44%; este valor de acuerdo a la ASTM C1074 es inaceptable para poder considerar válida dicha curva, por lo que no es representativa del concreto servido en obra, esto se debe principalmente a la inclusión de un acelerante de resistencia a edades tempranas.

Los cilindros curados en laboratorio y ensayados a 7 días para la calibración de la mezcla (Fase I) tienen una resistencia promedio de 309.0 kg/cm^2 , y los curados en campo para el proceso de validación tienen 329.8 kg/cm^2 por lo que hay una leve diferencia de sólo 20.8 kg/cm^2 que representa un porcentaje de variación de 6.7%, por consiguiente al utilizar la relación resistencia-madurez original se está subestimando la resistencia real en campo y se tendrán datos conservadores. Desde el punto de vista de seguridad estructural es aceptable y se puede seguir utilizando la curva con confianza, pero desde el punto de vista de economía y representatividad es inaceptable y se tendrá que realizar una nueva calibración de la mezcla.

CAPITULO 5

CAPITULO v:

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.

5.1 Estimación de tiempo/resistencia en corte de juntas

El corte debe iniciarse tan pronto como sea posible, con el fin de evitar que las grietas de contracción aparezcan en las losas antes de cortar las juntas en las cuales se las desea canalizar. En el sentido indicado, las operaciones de corte deberán comenzarse tan pronto el hormigón haya endurecido lo suficiente como para que la superficie del pavimento no resulte dañada, para que el corte sea nítido, sin roturas ni desprendimientos del hormigón ni del mortero adyacente al corte que se practica. Si al realizar la operación se observa alguno de los inconvenientes indicados, el aserrado deberá suspenderse hasta que pueda realizarse sin dichos inconvenientes.

Debe tenerse muy presente que la contracción del hormigón por secado del mismo está directamente vinculado con su contenido unitario de agua y con las condiciones climáticas que pueden favorecer más, o menos, la evaporación del agua libre contenida en su masa. Se entiende entonces que mientras más pueda demorarse la evaporación del agua libre, más demorará el hormigón en contraerse y más tiempo disponible se tendrá para iniciar las operaciones de corte. Por lo que, el curado reviste entonces, una importancia fundamental.

En términos generales puede decirse que el momento preciso de iniciar el aserrado debe determinarse experimentalmente para cada obra y para las condiciones particulares en cuanto a materiales y condiciones climáticas en el momento del aserrado.

Durante tiempo caluroso, el hormigón estará listo para su aserrado entre las 4 y 8 horas posteriores a su colocación. En tiempo frío, o cuando el agua de la mezcla se encuentra por debajo de los 10 °C, se puede retrasar hasta 24 horas.

5.1.1 Ventana o Fase de Aserrado

Existe un momento óptimo para aserrar las juntas de contracción en un pavimento de concreto. Este momento ocurre dentro de un intervalo llamado fase de aserrado como se muestra en la Figura 5.1.

El momento más temprano para aserrar las juntas se determina usualmente basándose en el ensayo de rayado efectuado por el operador de la sierra o en la observación de la disgregación o el descascaramiento en las juntas el efectuar el primer corte.

Si se producen astillamientos a lo largo del corte durante el aserrado, o si la sierra arranca el agregado de la superficie en lugar de cortarlo, es señal de que el hormigón no ha endurecido lo suficiente.

Una norma general para establecer el límite final de la ventana de oportunidad es aserrar antes de que la temperatura superficial del hormigón

disminuya significativamente, que no exceda los 8 °C; una disminución de no más de 5° C es recomendada.

En general, bajo la mayoría de las condiciones de pavimentación, la temperatura superficial comenzará a disminuir mientras debajo de la superficie continúan aumentando.

Al disminuir la temperatura superficial del hormigón se genera un gradiente térmico que da lugar a que se desarrollen tensiones de restricción de rotación térmica. Si estas tensiones exceden la resistencia a tracción del hormigón, entonces éste se agrietará. Al aserrar antes de que la superficie enfríe significativamente, las tensiones por restricción a la rotación permanecerán bajas y la fisuración se produce sólo en las juntas planificadas.

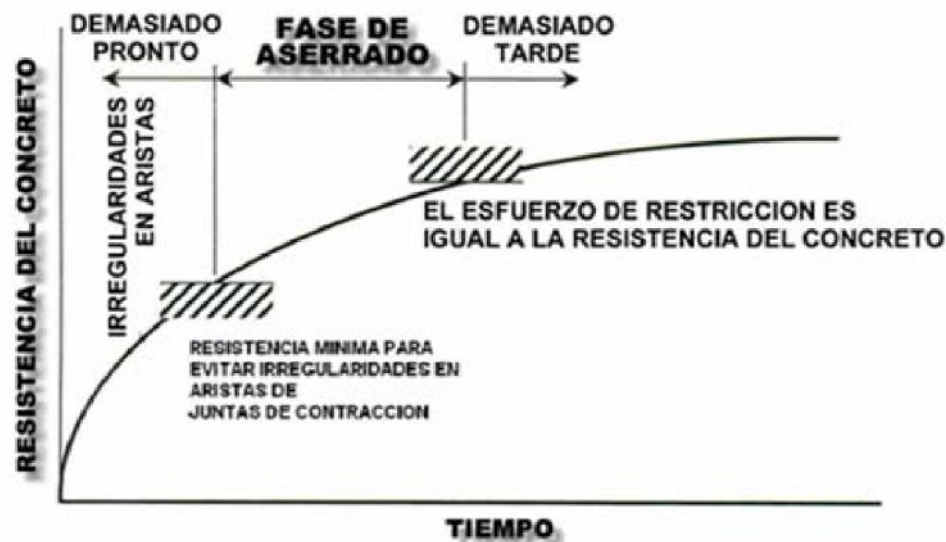


Figura 5.1: Fase o Ventana de Aserrado.

Adaptado de Mejores prácticas para la construcción de pavimentos de concreto de cemento Pórtland. Informe IPRF-01-G-002-1

5.1.1.1. Resistencia mínima para corte de juntas

El corte demasiado temprano en concreto, antes de que se produzca la hidratación del cemento causa despostillamiento inaceptable. La mayoría de operadores de sierras suelen determinar el corte temprano mediante pruebas en el nivel de despredimiento de agregados del concreto

Investigaciones de la FHWA en su reporte RD-91-079 calificaron cualitativamente la calidad de un corte de junta, proporcionando las siguientes directrices:

Calificación = 1 - Astillado excesivo: corte demasiado temprano

Calificación = 2 - Inaceptable

Calificación = 3 - Aceptable, se requiere de un ensanchamiento del sellador.

Calificación = 4 - Bueno

Calificación = 5 - Excelente.

Como se observa en la Figura 5.2, el rating o calificación 2, la cantidad de concreto deshilado o astillas de concreto en el borde de la junta es de 130 mm²/ft por cada pie de longitud de junta. En la puntuación 3 disminuye a 24 mm²/ft y en la puntuación 4 es del orden de 4.3mm²/ft, es decir, un corte bueno con irregularidad casi nula.

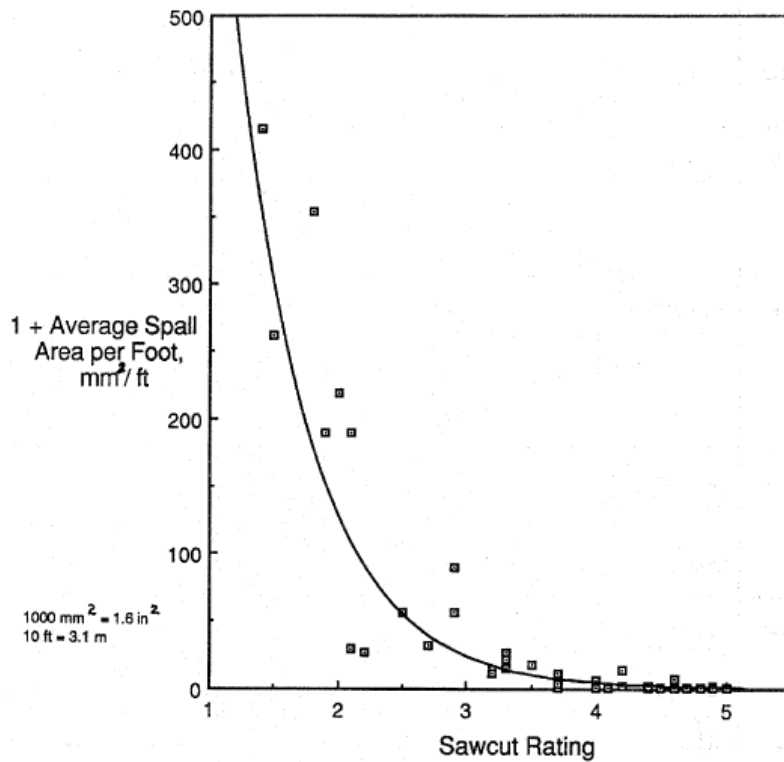


Figura 5.2: Daño del concreto a la orilla de la junta vrs calificación del corte.
 FHWA-RD-91-079: Guidelines for Timing Contraction Joint Sawing and Earliest Loading for Concrete Pavements, Volume I:Final Report. Pag 147

A continuación se proporciona el mínimo aproximado resistencia a la compresión del concreto necesario para el corte de juntas con una calificación de 3 y 4. Ver Tabla 5.1.

Como se muestra en el cuadro, mezclas de concreto con alto contenido de cemento, de geometría redondeada y de agregados suave son menos propensos a fragmentar la orilla de la junta, ya que la gran cantidad de cemento proporciona una unión fuerte entre los agregados y además la “suavidad” de los agregados permite que el corte se ejecute con la misma perpendicularidad sin que se generen momentos. A medida que la sierra

pasa a través de los agregados triturados y duros, es necesario que el concreto tenga una mayor resistencia a la compresión para mantener la conexión pasta-agregado y minimizar deshilachado indeseable.

Geometría del Agregado	Dureza del Agregado (Cualitativo)	Contenido de Cemento (kg/m ³)	Calificación del Corte (Resistencia a compresión mínima en kg/cm ²)	
			3	4
Triturado	Suave	298	34	51
		387	22	37
Triturado	Duro	298	65	89
		387	49	71
Redondeado	Suave	298	19	33
		387	11	22
Redondeado	Duro	298	44	65
		387	32	49

Tabla 5.1: Resistencia a la compresión requerida para calificaciones aceptables para diferentes mezclas.

Adaptado de: FHWA-RD-91-079: Guidelines for Timing Contraction Joint Sawing and Earliest Loading for Concrete Pavements, Volume I:Final Report. Pag 157

De lo anterior expuesto y en concordancia con la Tabla 5.1 designaremos el límite inferior de la fase de aserrado de juntas como 20 kg/cm², que refleja la geometría de agregado más utilizada en la construcción y un contenido de cemento característicos en proyectos carreteros.

5.1.1.2. Resistencia máxima para corte de juntas

Las apariciones de grietas aleatorias se producen en la superficie de la losa debido a gradientes térmicos.

Estudios de laboratorio de la FHWA indican que el agrietamiento inicia cuando la temperatura máxima de concreto durante su hidratación, desciende el orden de los 15 °F (8 °C). Para minimizar el potencial agrietamiento, la disminución de la temperatura de la superficie de la losa no debe exceder de 7 a 10 °F (4 a 6 °C)⁸. Para nuestra investigación optaremos por tomar un valor conservador de 3°C debido a la influencia de las altas temperaturas y al clima cálido tropical con baja humedad relativa existente en la zona de estudio.

Para el concreto colocado en horas de la mañana, la hidratación y los efectos de la radiación solar son más favorables para el calentamiento del concreto. La rápida velocidad de enfriamiento puede presentarse en las 8 horas, es decir, cuando el sol pierde su eficacia de calentamiento por radiación en horas de la tarde-noche. Áreas de concreto que experimenten en el día altas temperaturas y en las noches descienda significativamente, se debe optar por la colocación de concreto durante la noche.

Una eficaz cobertura de compuesto de curado sobre la superficie reducirá al mínimo el enfriamiento en la parte superior debido a la evaporación; se entiende entonces que mientras más pueda demorarse la evaporación del

⁸ Publicación N° FHWA-RD-91-079: Guidelines for Timing Contraction Joint Sawing and Earliest Loading for Concrete Pavements, Volume I:Final Report. Pag 49

agua libre, más demorará el hormigón en contraerse y más tiempo disponible se tendrá para iniciar las operaciones de corte.

Para poder establecer el límite final del corte es necesario tomar en consideración la resistencia a la tensión a la que se producen las grietas de contracción, estudios de la FHWA establecen que para una temperatura de curado de 38°C, es decir, reproduciendo un día cálido de verano, la resistencia a la tensión del concreto en su superficie es de 1.8 MPa, esto sucede cuando hay un enfriamiento de la superficie de 8°C ⁹.

El mismo estudio indica que para un gradiente término producto del enfriamiento de 3°C, la resistencia a la compresión máxima antes de que haya fisuración es de 6.9 MPa (70.4 kg/cm²), obtenida está a través de métodos no destructivos.

Por lo expuesto anteriormente se puede establecer una ventana de aserrado para que el corte no se realice prematuramente y cause astillamiento indeseable ni para que se haga posterior al límite con lo cual la superficie de concreto comienza a fisurarse descontroladamente.

⁹ Publicación Nº FHWA-RD-91-079: Guidelines for Timing Contraction Joint Sawing and Earliest Loading for Concrete Pavements, Volume I:Final Report. Pag 254

5.1.2. Lectura de madurez/resistencia para corte de junta.

En la estación 0+743 se realizó el colado a las 12:05 pm y el aserrado se produjo a las 3:30 pm (3h25min después), el concreto tenía una madurez de 124.5 °C.h y una resistencia medida con el sensor superior de 1569.5 kPa (16 kg/cm²).

En la estación 0+793 el colado se hizo a las 2:05pm, el corte de junta se realizó 3h 55min después (6:00pm), el concreto tenía una resistencia de 3,199 kPa (32.6 kg/cm²) y una madurez de 160 °C.h.

En la siguiente estación de análisis, que refleja una suma de 100 metros lineales, 0+843, la colocación del concreto se llevó a cabo en horas de la tarde, alrededor de las 4:15pm y el aserrado se hizo a las 11:20 pm (7h 5min después), precisando una lectura de madurez de 272 °C.h y una resistencia a la compresión de 67.1 kg/cm².


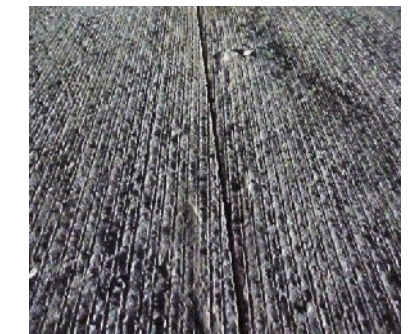
Para concluir los 150 metros de análisis en la estación 0+893 el concreto tocó los sensores a las 7:45pm y el corte se realizó a las 02:00 am (6h 15min después) con una resistencia de 42.83 kg/cm² y madurez de 188 °C.h.

En la tabla 5.2 se resume la hora de colado en cada estación y su correspondiente tiempo/resistencia a la cual se hizo el corte de junta.

Estación	Hora de Colado	Hora de Corte de Junta	Diferencia de horas	Madurez (°C.h)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)
0+743	12:05 pm	3:30 pm	3h 25min	124.5	16.0
0+793	02:05 pm	6:00 pm	3h 55min	160	32.6
0+843	4:15 pm	11:20 ap	7h 05min	272	67.1
0+893	7:45 pm	02:00 am	6h 15min	188	42.8

Tabla 5.2: Resumen de hora de colado, hora de corte de junta y madurez-resistencia.

En la tabla 5.3 se muestra un resumen de la calidad del corte y su resistencia a compresión medido con el equipo de madurez en cada estación de análisis.

Corte de Junta	Calificación del corte (según la FHWA)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
	Aceptable	16
	Buena	32.6

	<p>Excelente</p>	<p>67.1</p>
	<p>Buena</p>	<p>42.8</p>

Tabla 5.3: Calificación del corte y resistencia a la compresión en proyecto de carretera.

Como se mencionó anteriormente para definir la fase final de aserrado utilizando el criterio del gradiente térmico, para que justo antes de que se produzcan descontroladamente agrietamientos o fisuras por contracción, es necesario evitar el enfriamiento de la superficie de concreto en más de 8°C, en tal efecto y por lo expuesto en 5.1.1.2. Tomaremos un gradiente máximo de 3°C medido de la máxima temperatura generado por el calor de hidratación. Otra condición importante es que las fisuras por contracción se puede producir, además del descenso de la temperatura, por la evaporación del agua o el desecamiento de la superficie de concreto, esto sucede porque el agua de exudación es menor que la tasa de evaporación produciendo que

la superficie quede sin humedad y de color mate, al suceder esto, se producen los agrietamientos descontrolados.

En el siguiente grafico se muestra la temperatura de la losa de concreto a diferentes profundidades y a edades tempranas en la estación 0+743, el colado se realizó a las 12:05 pm. Ver figura 5.3

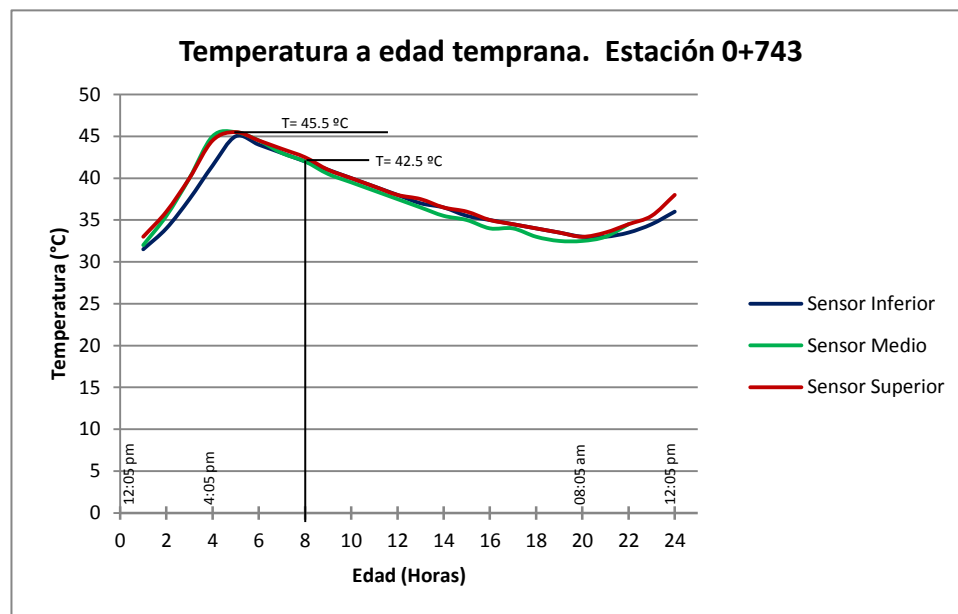


Figura 5.3: Historial de temperatura del concreto a 24 h. E 0+743.
Horas del mediodía.

Como se observa la fase final de aserrado, considerando el enfriamiento de la superficie del concreto en no más de 3°C, es de 8 horas, poseyendo una resistencia a la compresión de 81.1 kg/cm² y una madurez de 337 °C-h.

Es importante mencionar que en la metodología de construcción se utilizó un curador retardante de fraguado aplicado a la superficie de concreto durante el proceso de llanado, por lo que la temperatura de la superficie disminuye en

la misma razón que la temperatura del centro. La velocidad de evaporación disminuye drásticamente en comparación con otros concretos donde no se aplica dicho compuesto por lo que se prolonga ventana de aserrado hasta en 8 horas después del colado.

La figura 5.4 muestra el historial de temperatura a edad temprana para el concreto colocado en la estación 0+843 a las 4:20 pm.

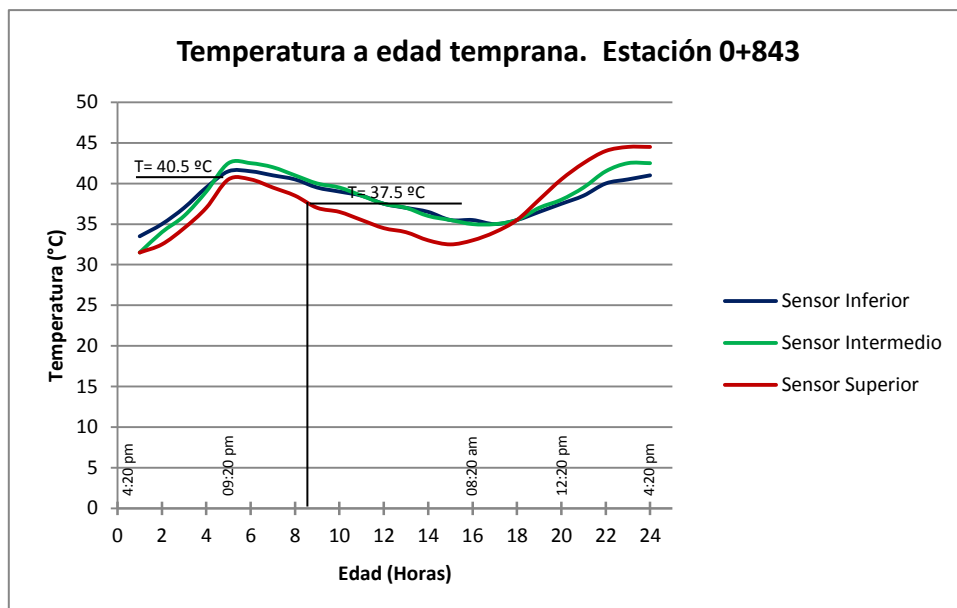


Figura 5.4: Historial de temperatura del concreto a 24 h. E 0+843. Horas de la tarde.

De acuerdo a la gráfica anterior, el limite final de la fase de aserrado corresponde a 8.5 horas después del colado, es decir, a las 1:50am, indicando una resistencia de 79.6 kg/cm^2 y una madurez de 330 °C-h .

En esta estación el corte se realizó a las 11:20 pm a una resistencia de 67.1 kg/cm² por lo que estaba dentro de la fase de aserrado. Al constatar estos valores con la inspección visual en campo no observamos ningún tipo de agrietamiento por contracción, por lo que consideramos aceptable dicho criterio.

En la siguiente figura 5.5 se muestra la ventana de corte para el proyecto de estudio, para horas diurnas y con una temperatura ambiental superior a los 35°C

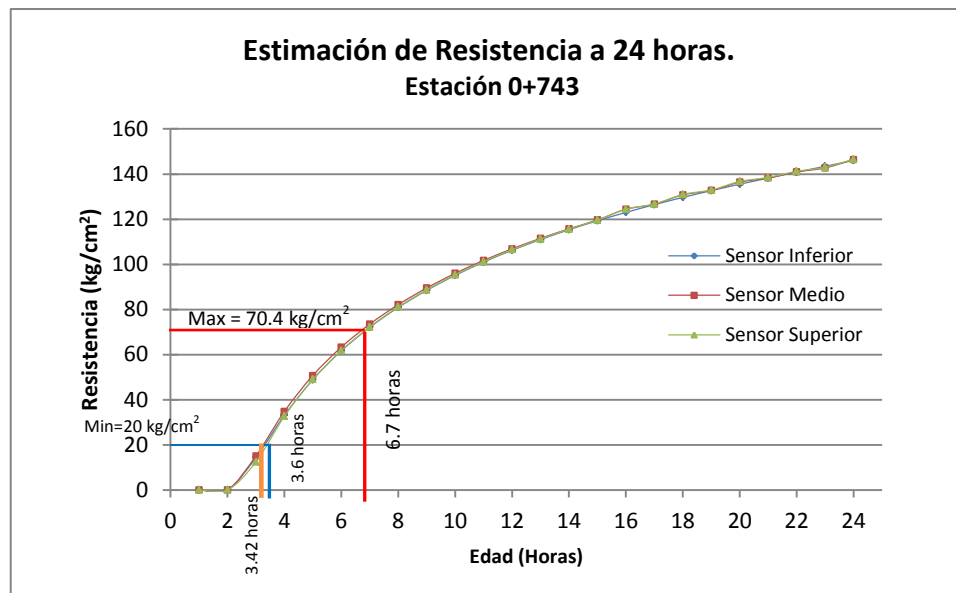


Figura 5.5: Ventana de corte en proyecto de carretera. Horas diurnas.

La anterior gráfica nos muestra que se puede realizar el corte dentro del límite inferior de 20 kg/cm², representado por la línea azul, y el límite superior de 70.4kg/cm², representado por la línea roja; el límite inferior (en tiempo) puede variar en cada proyecto por la influencia del curado acelerado por la influencia de altas temperaturas y el límite superior (en tiempo) variará de

acuerdo a la desecación y enfriamiento de la superficie del concreto al aplicar o no un curador adecuado que reduzca la tasa de evaporación; también es influenciado por la hora de colado, horas nocturnas con poco viento prolongarán esta fase final de aserrado.

La línea naranja indica el momento en el cual se realizó el corte de junta en la estación 0+743 cuando tenía una resistencia de 16.0 kg/cm^2 , a 3h 25 minutos posterior al colocado y 4 unidades de esfuerzo debajo de límite inferior, por lo que se observaron pequeños desprendimientos de mortero adyacentes a la junta, calificando el corte como aceptable, siempre y cuando se disponga de mayor cantidad de sellador.

Es de mencionar que la resistencia de 70.4 kg/cm^2 de la fase final del aserrado es considerando un enfriamiento de 3°C de la superficie del concreto, por lo que se le ha aplicado un factor de seguridad de 2.6, ya que el concreto empieza a agrietarse cuando hay un diferencial de temperatura de más de 8°C . Estudios en la Interestatal #15 en Utah (USA) indican que a una temperatura ambiental inferior a los 32°C , una temperatura interna máxima del concreto de 48°C , la fase final de aserrado puede extenderse hasta 12.1 Mpa (122.4 kg/cm^2) sin que el concreto sufra agrietamiento descontrolado¹⁰. Para temperaturas ambiente elevadas, baja humedad relativa y cuando no se aplica curador de retención de humedad el límite

¹⁰ FHWA-RD-91-079: Pg 171.

inferior puede disminuir hasta los 15 kg/cm² sin que se muestren daños en la junta.

Para las horas de la tarde el concreto se comporta diferente, debido a la baja influencia de radiación solar y al descenso paulatino de la temperatura, la figura 5.6 siguiente muestra la ventana de corte del concreto colocado a las 4:20pm.

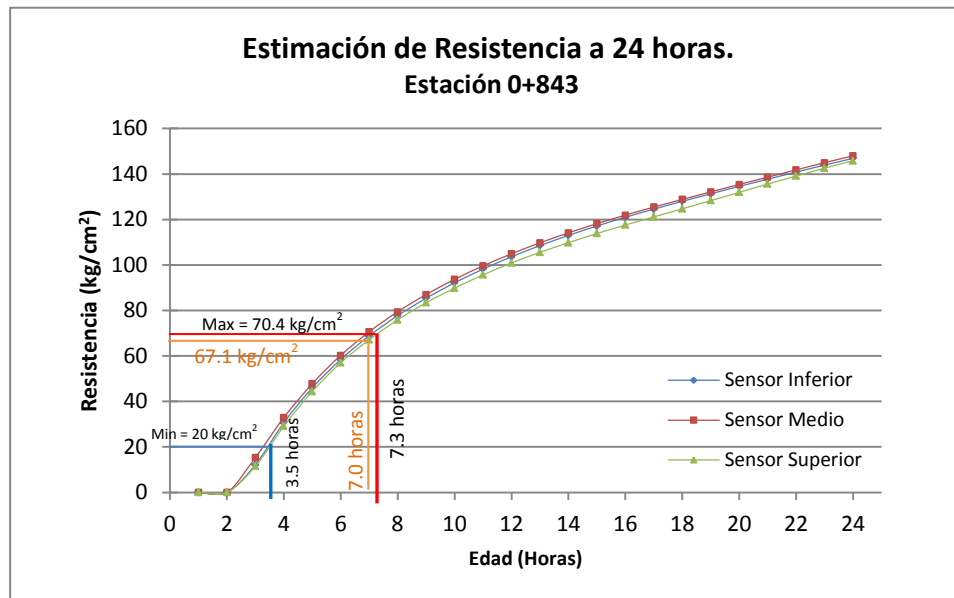


Figura 5.6: Ventana de corte en proyecto de carretera. Horas de la tarde.

La figura 5.6 nos ilustra la ventana de corte para un concreto colocado en las horas de la tarde, se observa la línea azul como el límite inferior con una resistencia a compresión de 20 kg/cm², el corte en esa estación se realizó a las 11:20 pm (7h 05 minutos después del colado) cuando el concreto poseía

una resistencia de 67.1 kg/cm^2 , este corte está dentro de la fase de aserrado y cualitativamente posee una calificación excelente, de acuerdo a la FHWA.

De las gráficas anteriores se interpreta que el concreto colocado en las horas del mediodía posee un momento óptimo para corte en las primeras 3.6 horas después del colado y un momento final de 6.7 horas, similar comportamiento refleja el historial de resistencia del concreto colocado en horas de la tarde, con una diferencia del límite final del corte de +40 minutos producto del fraguado gradual en las horas de la tarde noche. La similitud en el comportamiento del historial de resistencia a edad temprana en ambas horas del día está asociada a la influencia directa del compuesto químico utilizado como curador, este curador fue aplicado con un aspersor sobre el concreto aproximadamente 1 hora posterior al colado, o inmediatamente después de texturizar el concreto.

5.2. Estimación de Tiempo/Resistencia para apertura al tráfico.

La apertura temprana de pavimentos de concreto para el tráfico es esencialmente una tecnología que emplea materiales avanzados como aditivos minerales y químicos, para producir hormigón que puede alcanzar la resistencia necesaria a los 1 – 3 días, en comparación con los concretos convencionales que tardan aproximadamente 5 - 7 días.

Hay varios factores que deben ser considerados con el fin de abrir el pavimento recién hecho al tráfico. Estos factores son:

1. Resistencia a la flexión mínima requerida.
2. Las condiciones climáticas en el lugar, lo que afectaría significativamente a la tasa de hidratación y el desarrollo de la resistencia en el concreto.
3. La cantidad de daño por fatiga debido a la apertura temprana y sus efectos a largo plazo sobre el rendimiento.
4. Número de repeticiones de carga admisible.

El tráfico público incluye muchos vehículos diferentes, para determinar la resistencia mínima aceptable para la apertura al tráfico se requiere de una estimación de la cantidad de cargas que se aplicarán o se permitirán antes de que el concreto alcance la resistencia de diseño.

Resistencia a la flexión tan bajas como 1.0 MPa (150 psi) es aceptable si en el pavimento solo se transportaran automóviles solamente. Si el pavimento llevará camiones, una resistencia a la flexión de hasta 4.5 MPa (650 psi) puede ser necesario para losas delgadas.

Tabla 5.4 proporciona criterios para la apertura de pavimentos de baja intensidad o municipales y carreteras de alto tráfico¹¹. Para utilizar la tabla requiere estimaciones de volumen de tráfico previsto, espesor de la losa y apoyo de las fundaciones. El cuadro supone una carga desde el borde del carril de 0.6m (2.0 pies), carriles anchos o con hombros, bordillos y cunetas que sirven para reducir las tensiones de carga por tráfico a niveles equivalentes a un 0.6 m (2.0 pies). Si el diseño del pavimento no incluye estas características, el contratista puede colocar barricadas para evitar cargas laterales. Normalmente, el contratista podrá retirar la barricadas después de la resistencia a la flexión hormigón alcanza 3.0 MPa (450 psi o $f'c = 163 \text{ kg/cm}^2$).

¹¹ ACPA: Maturity Testing of Concrete Pavements: Applications and Benefits. IS7257P

		REQUIRED FLEXURAL STRENGTH FOR OPENING, MPa (psi)					
M U N I C I P A L	Slab Thickness mm (in.)	Foundation Support, k MPa/m (psi/in.)	To Support Estimated ESAL's Applied Before Achieving Specified Strength ^b				
			100	500	1000	2000	5000
			150 (6.0)	27.2 (100)	3.4 (490)	3.7 (540)	3.9 (570)
54.3 (200)	2.8 (410)	3.1 (450)		3.2 (470)	3.4 (490)	3.6 (520)	
135 (500)	2.3 (340)	2.6 (370)		2.6 (370)	2.8 (400)	3.0 (430)	
27.2 (100)	3.0 (430)	3.2 (470)		3.4 (490)	3.6 (520)	3.8 (550)	
54.3 (200)	2.4 (350)	2.7 (390)		2.8 (410)	3.0 (430)	3.1 (450)	
135 (500)	2.1 (300)	2.2 (320)		2.3 (330)	2.4 (350)	2.6 (370)	
175 (7.0)	27.2 (100)	2.6 (370)	2.8 (410)	3.0 (430)	3.1 (450)	3.3 (480)	
	54.3 (200)	2.1 (310)	2.3 (340)	2.5 (360)	2.6 (370)	2.8 (400)	
	135 (500)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.2 (320)	
190 (7.5)	27.2 (100)	2.3 (330)	2.6 (370)	2.6 (380)	2.8 (400)	3.0 (430)	
	54.3 (200)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.2 (320)	2.3 (330)	2.4 (350)	
	135 (500)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
200 (8.0)	27.2 (100)	2.1 (300)	2.3 (330)	2.3 (340)	2.5 (360)	2.6 (380)	
	54.3 (200)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.3 (330)	
	135 (500)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
H I G H W A Y	200 (8.0)	27.2 (100)	2.6 (370)	2.8 (410)	3.0 (430)	3.1 (450)	3.2 (470)
	54.3 (200)	2.1 (310)	2.3 (340)	2.4 (350)	2.6 (370)	2.7 (390)	
	135 (500)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (310)	
	215 (8.5)	27.2 (100)	2.3 (340)	2.6 (370)	2.6 (380)	2.8 (400)	3.0 (430)
	54.3 (200)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.2 (320)	2.3 (330)	2.4 (350)	
	135 (500)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
225 (9.0)	27.2 (100)	2.1 (300)	2.3 (330)	2.4 (350)	2.5 (360)	2.7 (390)	
	54.3 (200)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.2 (320)	
	135 (500)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
240 (9.5)	27.2 (100)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.2 (320)	2.3 (330)	2.4 (350)	
	54.3 (200)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
	135 (500)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
255 (10.0)	27.2 (100)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.2 (320)	
	54.3 (200)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
	135 (500)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
+265 (-10.5) (see b below)	27.2 (100)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
	54.3 (200)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	
	135 (500)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	2.1 (300)	

Tabla 5.4: Requisitos de resistencia a la flexión para la apertura al tráfico público de pavimentos de concreto.

Fuente: ACPA: Maturity Testing of Concrete Pavements: Applications and Benefits. IS7257P

Como se observa, a menor espesor de losa requiere mayor módulo de ruptura para aperturar al tránsito, para losas con baja demanda de tránsito se puede aperturar cuando la resistencia a flexión sea superior a 2.1MPa, siempre y cuando se protejan los bordes con barricadas.

Como criterio general utilizaremos el mencionado en la sección 2.7.2, proporcionado por la Administración Federal de Aviación FAA (AC-180/5370)

que establece que se podrá abrir al tráfico losas que superen los 3.8 Mpa de resistencia a flexión. Criterios mencionados por la ACPA establecen que para la apertura al tráfico de construcción para losas de 15 cm un valor aceptable es de 3.0 Mpa (30.6 kg/cm²) y un conservador es de 3.2 Mpa (32.6 kg/cm²); para losas con espesor de 17.5 cm ó más un MR de 2.3 Mpa sería suficiente, siempre y cuando la carga se aplique a 2.0 ft (60 cm) de borde exterior del pavimento.

La siguiente gráfica muestra la resistencia del concreto y el momento en el que está apto para su puesta en servicio cuando el colado se realizó en las horas del mediodía (12:05 pm)

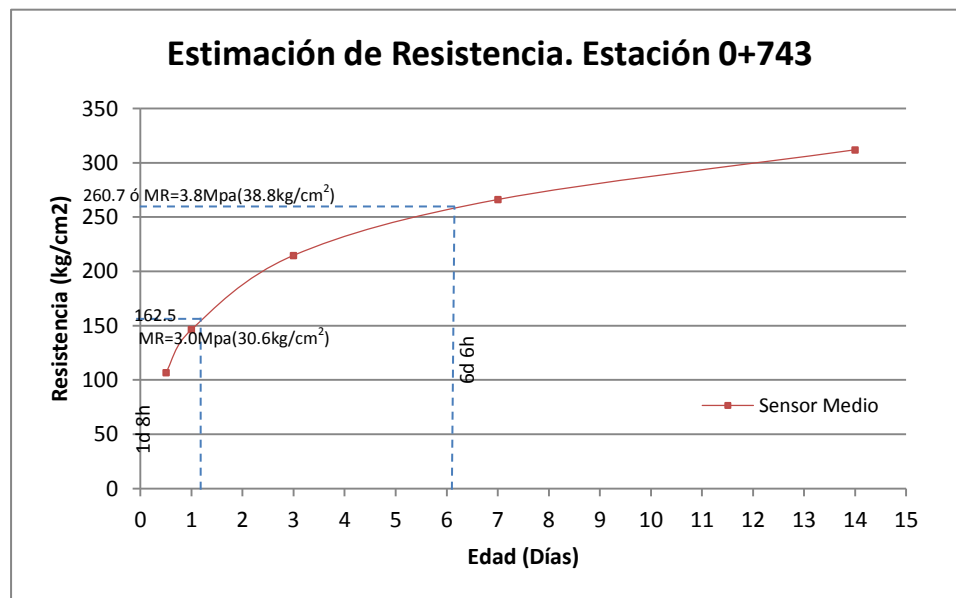


Figura 5.7: Estimación de tiempo/resistencia para apertura al tráfico. Horas del mediodía.

Cuando el módulo de ruptura MR es de 30.6 kg/cm^2 (es recomendable abrir la sección recién colada para tráfico de maquinaria y equipo de construcción, como lo son los pickup y camiones concreteros, se debe evitar el paso fluido y prolongado de tráfico público ajeno a la construcción. Esta resistencia se alcanza a los 1 día 8 horas después del colado.

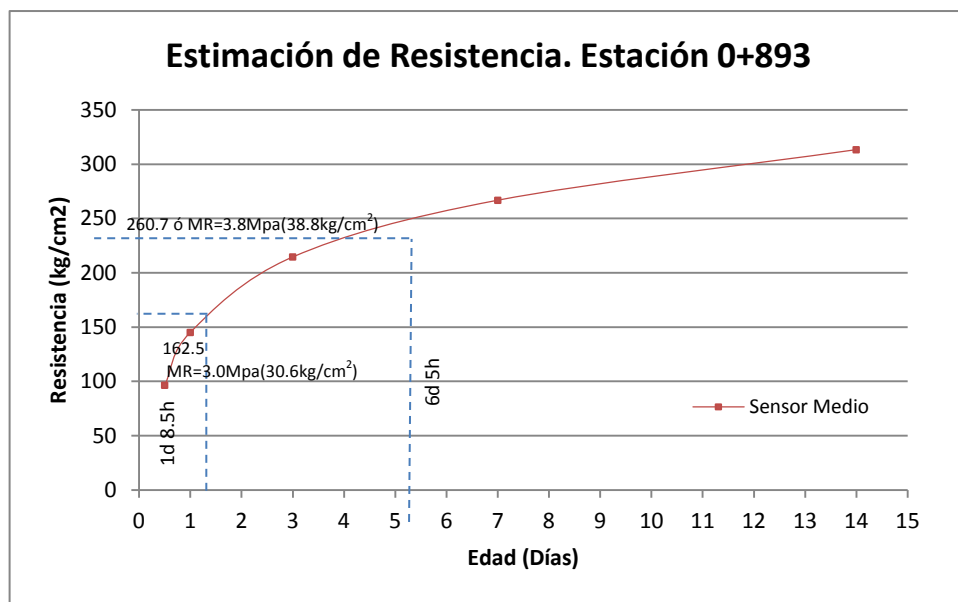


Figura 5.8: Estimación de tiempo/resistencia para apertura al tráfico.
Horas nocturnas.

Como se puede evidenciar, las variaciones de la resistencia en función del tiempo para concretos colocados en horas del mediodía y concretos colocados en horas nocturnas es de 0.5h (30 minutos) para la apertura al tráfico de construcción y es de 1 hora para la apertura al tráfico público.

5.3 Gradientes de Temperatura

5.3.1 Alabeo En Losas

El alabeo se produce cuando la parte superior de la losa trata de ocupar un volumen menor que la parte inferior; esto puede suceder por diferencias entre las porciones superiores e inferiores con respecto a la retracción, temperatura, contenido de humedad y otras variables.

Para que la losa se mantenga intacta, sus bordes deben levantarse. Estos bordes pueden estar constituidos por el término discontinuo de la losa, una junta de contracción o una grieta suficientemente ancha. Las esquinas de las losas sin restricciones verticales, deben levantarse más alto que los bordes más alejados, para que no se produzcan grietas.

Muchas losas de piso tienen bordes que realmente levantan la rasante; estas juntas alabeadas levantadas que se mueven bajo el flujo vehicular, con frecuencia, han sido mal diagnosticadas creyendo que tienen una subbase débil. A medida que los bordes de las losas tratan de alabearse hacia arriba, la gravedad y la fluencia lenta producen un efecto contrario, pero sólo pueden compensar parcialmente el alabeo. La cantidad de alabeo y el perfil de éste dependen de muchos y complejos factores. Entre ellos se encuentra el potencial de retracción del hormigón, la resistencia, el soporte de la subrasante, las condiciones de humedad y de temperatura, el espesor de la losa, la separación de la junta y otros. (Wayne et al, 2000).

¿Qué es la retracción?

Es la variación de volumen debido a la hidratación del cemento y a las variaciones de humedad. Se puede presentar mientras el hormigón está plástico o endurecido, siendo esta última más importante.

Los movimientos de hormigón endurecido están restringidos por el suelo de fundación, las armaduras de refuerzo y por el hormigón adyacente que ya no está plástico, generándose esfuerzos de tracción que si el hormigón no puede soportar se agrieta.

Para controlar, las dosis de agua deben ser compatibles con la compactación; las dosis de cemento deben ser reducidas y compatibles a la resistencia; evitar al máximo la exudación; e impedir secados prematuros por medio del curado.

Un alabeo importante constituye un problema.

En la superficie de la losa se producen tensiones de tracción considerables, desde los bordes que tienden a alabearse hacia arriba, debido al peso propio y cualquier carga o restricción vertical que intenta empujarlos hacia abajo; esto, además de la retracción, puede producir agrietamiento.

Al deslizarse las ruedas a través de los bordes de las juntas alabeadas (sin barras de traspaso de carga adecuadas) pueden hacer que un borde baje primero, luego el otro, contribuyendo al desconchado de la junta, falla en el

relleno o sello de la junta y otros problemas más. Las juntas muy alabeadas o grietas pueden reducir la fluidez del tránsito vehicular de un piso o pavimento, provocando desagrado en el conductor problemas en el vehículo y reducción de la productividad.

El alabeo y la retracción constituyen un gran problema, las resistencias a la compresión del hormigón para pisos han aumentado. Los hormigones con resistencias mayores generalmente (no siempre) se retraen más y siempre poseen un módulo de elasticidad mayor. El módulo de elasticidad es un factor muy importante porque mientras mayor sea el módulo, más alabeo se producirá y los bordes alabeados con el tiempo cederán menos hacia abajo debido a la fluencia lenta.

5.3.2 Gradientes térmicos

Los cambios en la temperatura ambiente originan variaciones en la temperatura a distintas profundidades de la losa.

El gradiente de temperatura varía con las oscilaciones de las temperaturas diarias y estacionales, provocando una desigual dilatación o contracción de la masa de hormigón según su distancia a la superficie de la misma, dando como resultado el alabeo de la losa. Este movimiento está parcialmente impedido por el peso propio, fricción de apoyo y reacciones en los dispositivos de transmisión de cargas entre losas, lo cual provoca “tensiones”; el alabeo altera el régimen de contacto de la losa con la subrasante, pudiendo

aumentar, por esta razón, las tensiones producidas por la acción de las cargas.

En verano, durante el día, se produce el máximo gradiente positivo. La losa se deforma arqueando los bordes hacia abajo. Es decir, tienden a una forma convexa cuando por efecto de insolación la temperatura en la superficie se eleva por sobre la de su base. Durante la noche, especialmente de madrugada, ocurre lo contrario y la losa se deforma arqueando los bordes hacia arriba. Es decir, cuando el sol declina y la temperatura superficial desciende, las losas tienden a una forma cóncava por levantamiento relativo de los bordes respecto al centro que permanece apoyado.

La temperatura media de la losa también cambia y provoca dilatación o contracción; al estar su movimiento restringido por el rozamiento con la subrasante o subbase y la resistencia de las juntas, se producen tensiones en el pavimento. Las tensiones originadas por los cambios de temperatura, normalmente han sido incorporadas en los métodos de diseño.

Alabeo Diurno

Se consideran los Δt positivos entre la fibra superior e inferior de la losa, que producen Tracción en la fibra inferior de la Losa

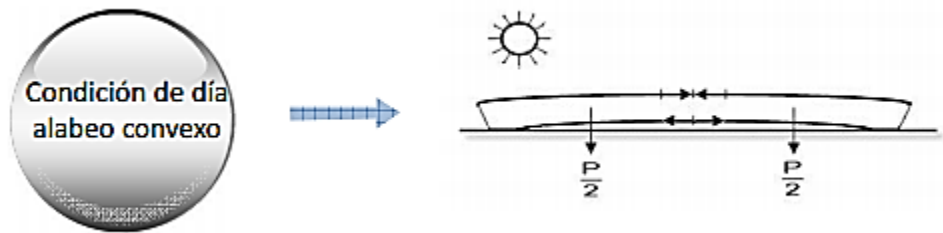


Figura 5.9: Condición de día en Losa

Alabeo Nocturno

Se consideran los Δt negativos entre la fibra superior e inferior de la losa, que producen Tracción en la fibra Superior de la Losa.

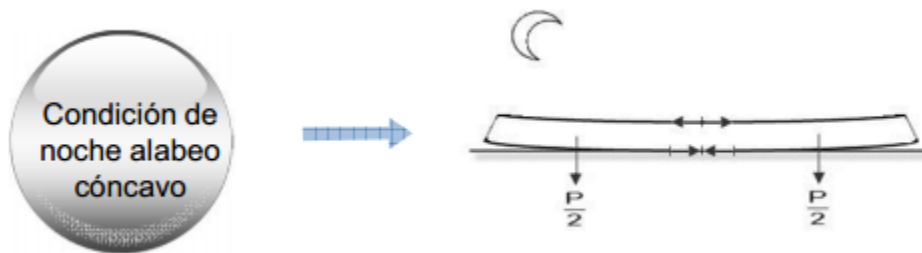


Figura 5.10: condición de noche para losa

5.3.3 Efecto de un Diferencial de Temperatura.

El efecto de un diferencial de temperatura fue estudiado por Salsilli e Ioannides (Ioannides y Salsilli, 1987). La combinación de alabeo y carga de borde fue analizada con la restricción de que se supuso una losa infinita ($L/l \approx 16$ bajo diferencial de temperatura) y peso unitario del hormigón $\gamma = 2.4$

ton/m². En este estudio se logró determinar que la variable independiente para este problema es el producto adimensional de $\alpha\Delta T$ (donde α es coeficiente de expansión térmico y ΔT es el diferencial de temperatura a través del espesor de la losa).

El fin de este estudio fue evaluar la tensión combinada de carga de borde y alabeo por temperatura. La simple superposición de ambas situaciones no es posible pues las condiciones de borde son distintas en ambos problemas. En el caso de la carga borde la modelación exige pleno contacto entre la losa y la base, no ocurriendo así en el caso del alabeo de losas.

La máxima tensión de flexión combinada para una carga de borde cuando la losa está con alabeo convexo (condición de día) se produce en la fibra inferior de la losa en la posición de la carga. Para el caso que la losa está con alabeo cóncavo (condición de noche), se tiene una tensión de borde combinada pequeña en la fibra inferior de la losa debajo de la carga. Cuando la carga está en la esquina, la tensión crítica está en la fibra superior de la losa, pero depende de la transferencia de carga de la junta.

5.3.4 Ecuaciones de Alabeo según Westergaard

Para estimar la tensión combinada, se analiza por separado las tensiones debido a las cargas y al alabeo por temperatura. Esas dos tensiones son combinadas utilizando factores de ajuste. Así, una modificación por alabeo debe realizarse como:

$$\sigma_{combinada} = a_1 \sigma_{Wrd} + a_2 \sigma_{alabeo} \quad \text{Ecuacion 5.1}$$

Dónde:

$\sigma_{combinada}$ = tensión de borde combinada, kgf/cm².

σ_{Wrd} = tensión de Westergaard para carga de borde, kgf/cm².

a_1, a_2 = factores de ajuste.

σ_{alabeo} = tensión de alabeo, kgf/cm², dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_{alabeo} = \frac{CE\alpha\Delta T}{2} \quad \text{Ecuacion 5.2}$$

C = coeficiente de alabeo, que depende de la razón (L/l).

E = módulo de elasticidad del hormigón, kgf/cm².

α = coeficiente de expansión térmico del hormigón, (1.1 x 10⁻⁵ ε/ °C).

ΔT = diferencial de temperatura a través de la losa, °C.

La ecuación para determinar la tensión de alabeo fue desarrollada por Westergaard (Westergaard,1927). El coeficiente de alabeo se logra determinar con la siguiente expresión:

$$C = 1 - \frac{2 \cos \lambda \cosh \lambda}{\operatorname{sen}(2\lambda) + \operatorname{senh}(2\lambda)} (\operatorname{tg} \lambda + \operatorname{tgh} \lambda) \quad \text{Ecuacion 5.3}$$

DONDE:

$$\lambda = \frac{L}{l\sqrt{8}}$$

Ecuación 5.4

L = longitud de la losa, cm.

l = radio de rigidez relativo, cm.

Radio De Rigidez Relativo:

Mide la rigidez de la losa de concreto respecto del suelo de soporte

$$l = \sqrt[4]{\frac{E * h^3}{12(1-\mu^2)k}}$$

Ecuación 5.5

h = Espesor de la losa

k = Modulo de reacción de la base

μ = Relación de Poisson del concreto (0.15)

Correlación entre k y cbr

$$k = 46 + 9,08 * [\log(CBR)]^{4,34} \left[\frac{MPa}{m} \right] \text{ si } CBR \geq 10$$

Ecuación 5.6

5.3.5 Ecuaciones De Alabeo Según Bradbury

Borde de la losa
$$\sigma_t = \frac{C * E * \alpha * \Delta t}{2}$$
 Ecuacion 5.7

Interior de la losa
$$\sigma_t = \frac{E * \alpha * \Delta t}{2} \left[\frac{(C1 + \mu C2)}{1 - \mu^2} \right]$$
 Ecuacion 5.8

Esquina de la losa
$$\sigma_t = \frac{E * \alpha * \Delta t}{3(1 - \mu)} \left[\sqrt{\frac{a}{l}} \right]$$
 Ecuacion 5.9

Debido a que Ci es inversamente proporcional al módulo de reacción del soporte (k), los esfuerzos por alabeo se incrementan cuando el soporte es muy rígido, ya que éste no puede asumir el contorno del pavimento.

Como Ci es directamente proporcional a la longitud de la losa, el aumento de ésta incrementa los esfuerzos por alabeo térmico.

Variables de las ecuaciones anteriores.

σ_t	Esfuerzo en el sitio considerado
E	Módulo elástico del concreto
α	Coefficiente de dilatación térmica del concreto (0.000005/°F)
Δt	Diferencia de temperatura entre las dos caras de la losa (gradiente)
C	Coefficiente que depende de la longitud de la losa y del radio de rigidez relativa
C_1	Coefficiente en la direccion en la cual se calcula el esfuerzo
c_2	Coefficiente en la direccion perpendicular a C1
H	Relación de Poisson del concreto
a	Radio del area cargada en el borde de la losa
l	Radio de rigidez relativa

Tabla 5.5: Variables de las ecuaciones de Bradbury

CARTA DE BRADBURY PARA LA DETERMINACIÓN DE C

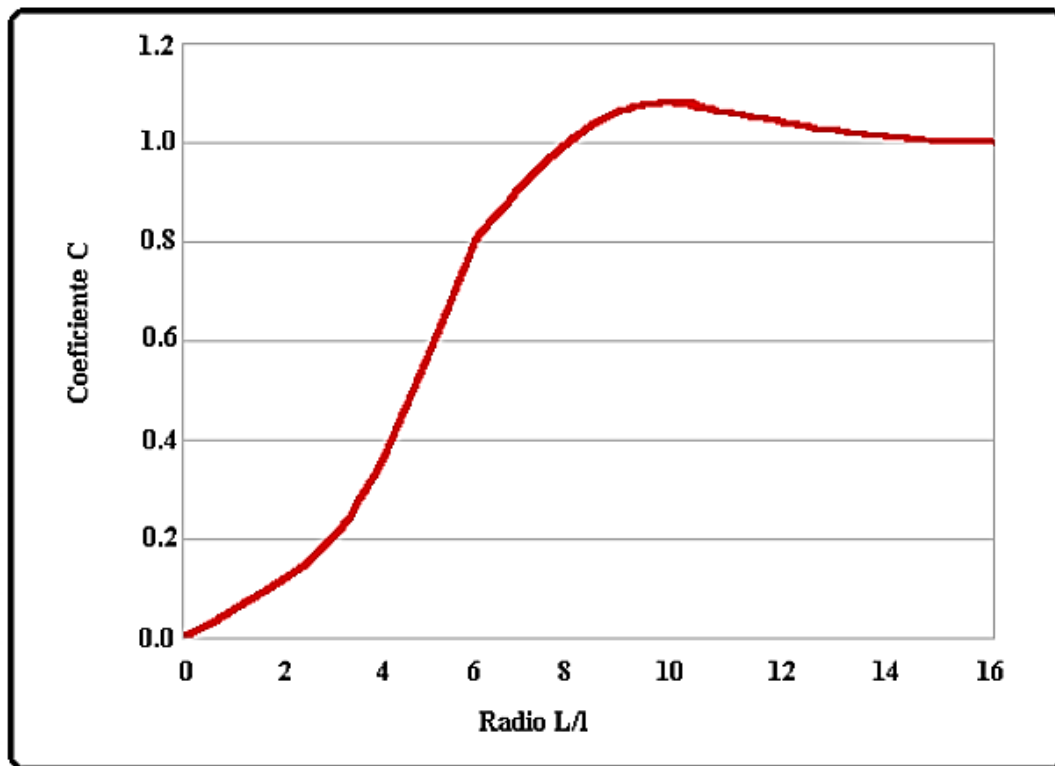


Figura 5.11: Carta para la determinación del coeficiente de alabeo

5.3.6 Gradientes del Concreto en Campo

Para el cálculo de alabeo por temperatura se toman en cuenta los diferenciales de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa, con este fin en el pavimento se colocaron sensores a 3.0cm y 11.25cm medidos desde la superficie de la losa.

De los sensores superior (3.0cm) e inferior (11.25cm) se analizaron las lecturas de temperatura durante un periodo de 28 días, sumando así para cada estación más de 4,096 valores de temperatura registrados entre los dos sensores.

Para encontrar los valores de gradiente térmico es necesario realizar la diferencia entre las temperaturas de la superior e inferior de la losa en el mismo instante y luego graficarlos durante el periodo de estudio deseado, tomando en cuenta que por definición cuando las mayores temperaturas se dan en la superficie del pavimento los gradientes son positivos de manera inversa si las mayores temperaturas se dan en la parte inferior entonces se toman como gradiente negativos.

En la figura 5.12 se presentan las temperaturas de la parte superior e inferior de la losa para la estación 0+893 en la cual se aprecia el comportamiento de estas para las primeras 24 horas y las marcadas diferencias entre dichos registros.

A partir de la figura 5.12, se generan los diferenciales de temperatura, tomando como base la temperatura en la superficie y restando las temperaturas inferiores obteniendo a la vez el signo del gradiente.

En la gráfica 5.3 se presentan los datos de gradientes y su variación en un periodo de 24 horas en la misma estación que la figura 5.12.

Es de esta manera como se elabora el ΔT necesario para encontrar los esfuerzos generados, es decir el alabeo por temperatura.

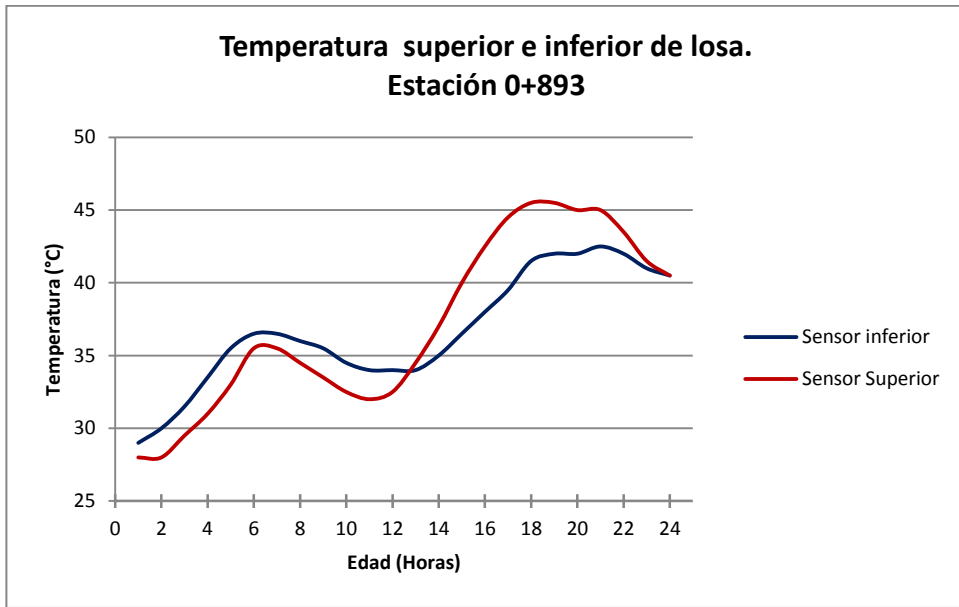


Figura 5.12: Variaciones de temperaturas para la parte superior e inferior del pavimento en la estación 0+893.

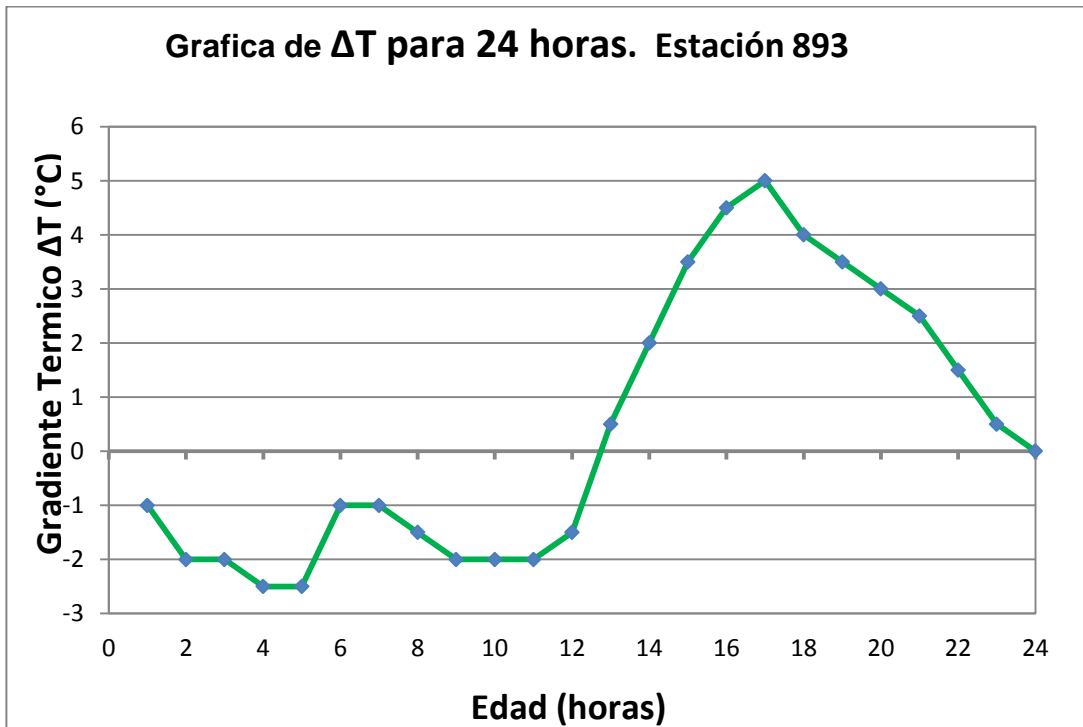


Figura 5.13: Variaciones de Gradiente térmico (ΔT) para las primera 24 horas en la estación 0+893.

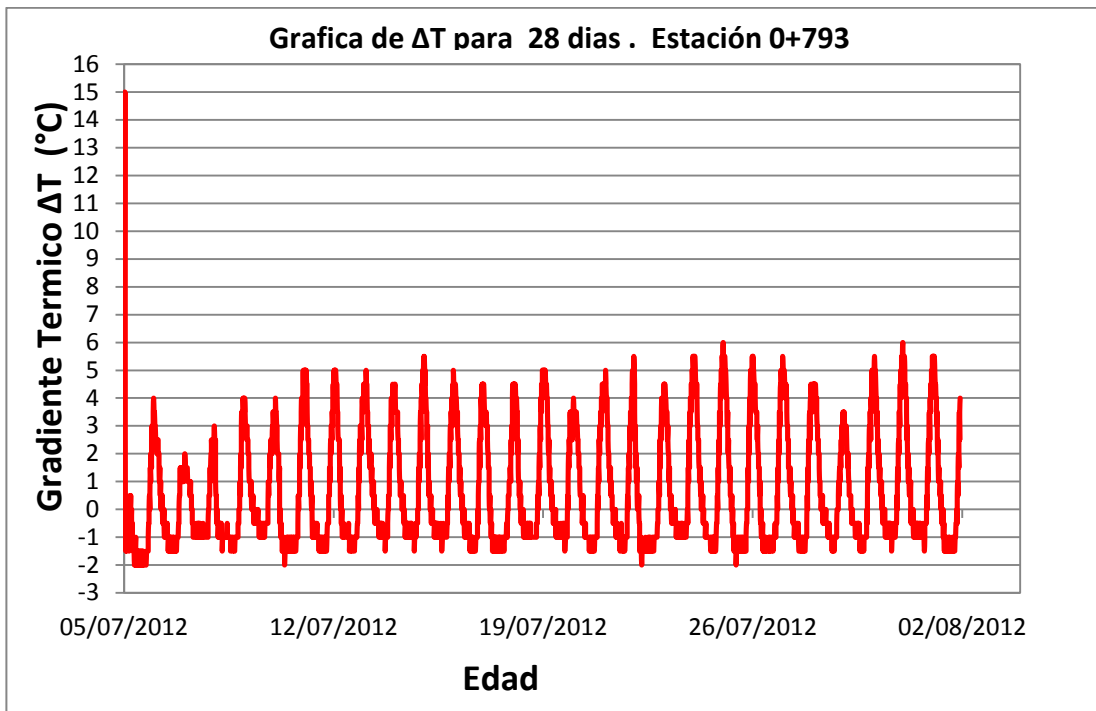


Figura 5.14 Gradientes de temperatura durante 28 días en la estación 0+793

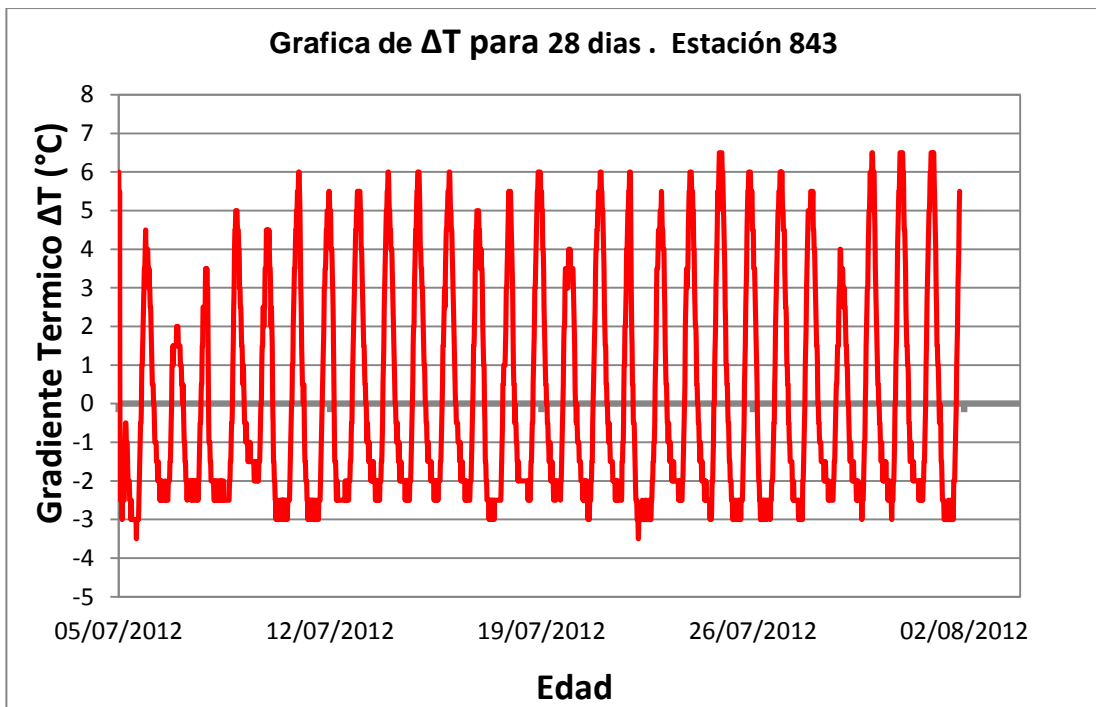


Figura 5.15: Gradientes de temperatura durante 28 días en la estación 0+843

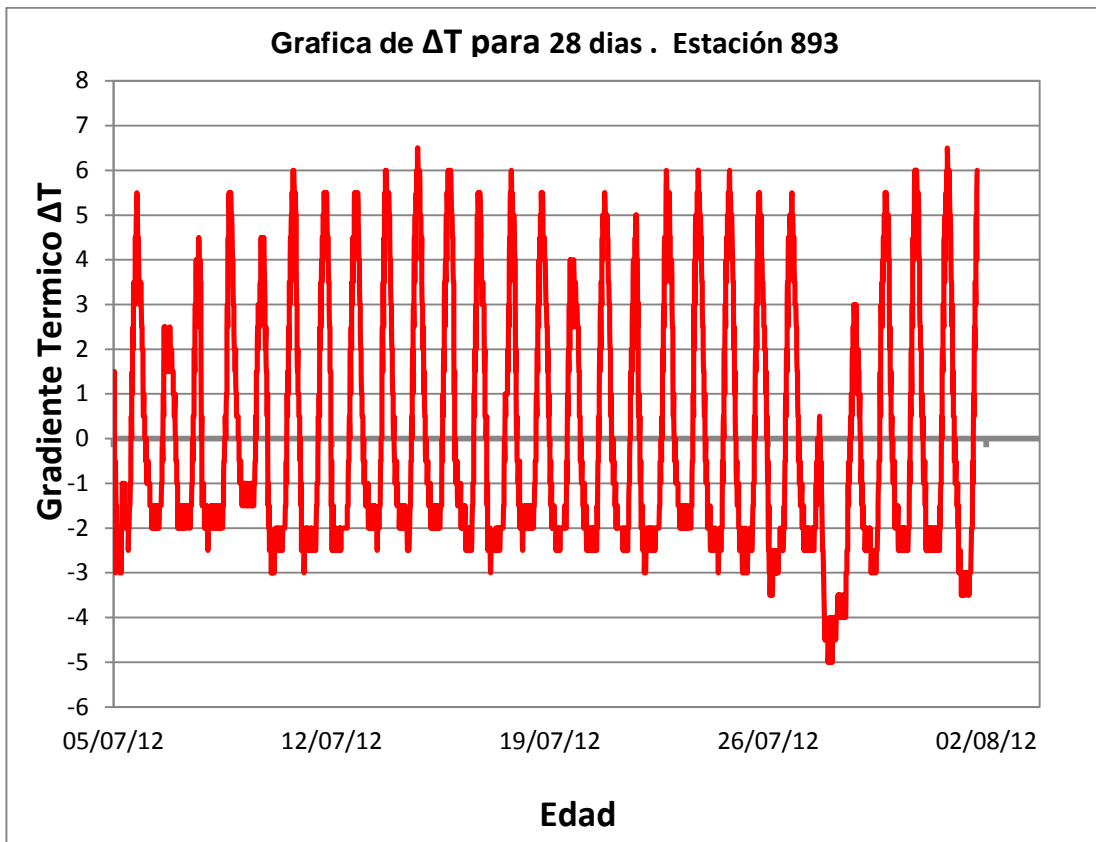


Figura 5.15: Gradientes de temperatura durante 28 días en la estación 0+893

CAPITULO 6

6.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

En esta investigación se propusieron diversos alcances para incursionar en las aplicaciones del método de madurez en pavimentos de concreto, en este capítulo se enfatizan los puntos importantes para fundamentar los resultados obtenidos.

Los parámetros y recomendaciones que se presentan a continuación combinan fundamentos teóricos y experimentales que permitirán una mejor aplicación al momento de implementar el método de madurez.

- La ecuación obtenida en la fase de calibración mediante la correlación de resistencia a compresión y madurez **Resistencia (Kpa)=6400.8 ln(Madurez °C-h) - 29301**, puede ser utilizada para determinar resistencias/madurez en campo, siempre y cuando se mantengas las proporciones y volúmenes de todos los componentes que integran este diseño de mezcla; caso contrario se deberá establecer una nueva relación resistencia-madurez.
- En la fase de laboratorio, al instrumentalizar los 2 cilindros requeridos por la norma ASTM C1074 y curarlo bajos condiciones estandarizadas, se obtuvo una diferencia de madurez máxima porcentual de 1.6% entre cada cilindro con un promedio de 0.1%; lo que indica que no hay variaciones

significativas de madurez entre cada cilindro y la calibración se considera satisfactoria.

- Para la colocación lateral de sensores se tomaron las consideraciones expuestas por la ACPA que establecen que el sensor se tiene que instalar a 2ft (60 cm) del borde exterior de la losa para que la influencia de la temperatura exterior no afecte el resultado y la madurez evaluada represente la resistencia real.
- En un diseño de mezcla, el único material que genera liberación de calor de manera directa y espontánea es el cemento, debido a las reacciones químicas generadas en el proceso de hidratación. Por lo que las temperaturas máximas que se obtienen dependen directamente del tipo de cemento. Para la estación 0+743 observamos valores máximos de temperatura interna del concreto, colado a las 12:05 pm, de 45.5°C ocurriendo está a 5 horas después del colado; y una mínima de 33°C 21 horas después del colado. Al observar la figura 4.13 se distingue que la diferencia entre temperaturas del sensor inferior con respecto al superior es de 3°C en las primeras 5 horas, luego de que el concreto alcanza su máxima temperatura por calor de hidratación las temperaturas de los sensores superior, medio e inferior permanece casi constante. Esto se debe a que la influencia de la radiación solar es más significativa en las primeras horas del día y por la tarde la intensidad de la luz solar decrece significativamente afectando la temperatura del concreto.

- En las temperaturas a edad temprana en la estación 0+893 colado en las horas de la noche (7:45 pm); se concluye que por la nula influencia del sol en los registros térmicos se reporta un diferencial de temperatura de -1.5°C del sensor superior con el medio ocurriendo esto 6 horas después del colado (2:45 am). Cuando el sol comienza a calentar en horas de la mañana el sensor superior comienza a registrar mayores temperaturas que el medio llegando a una diferencia máxima de 2.5°C a las 1:45 pm (18 horas después del colado) lo que indica que la ganancia de resistencia en el concreto (que es función de la madurez, y ésta a su vez, es función de la temperatura) no es uniforme y varía por profundidades en un elemento de concreto.
- La resistencia obtenida a edades tempranas varía en cada profundidad de la losa, sin embargo esta variación no excede de 2.6 kg/cm² para la estación 0+743, 1.5 kg/cm² en la estación 0+793, 4.3 kg/cm² en la 0+843 y 4.4 en la 0+893, esto se debe a que los sensores se encuentran expuestos en mayor o menor grado a las condiciones ambientales, lo cual afecta el desarrollo de la madurez del concreto. En todos los casos el sensor medio registra mayores valores de resistencia que el sensor superior.
- Los valores de resistencia a la compresión medidas con el sensor ubicado a media profundidad indican que en cada estación de análisis no difieren en más de 1.8 kg/cm² a la edad de 3 días, 1.4 kg/cm² a edad de 7 días, 1.5 kg/cm² a la edad de 14 días y 0.5 kg/cm² a edad de 28 días;

obteniéndose mayor resistencia a 3 días en el concreto colocado a las 12:05 pm y mayor resistencia a 28 días en el concreto colado a las 4:20 pm. Variaciones que son despreciables para el control de calidad y aceptación del concreto.

- El protocolo de validación de la relación resistencia-madurez que se siguió en esta investigación es el de hacer especímenes cilíndricos curados en campo mediante la ASTM C31 y compararlos con los valores de resistencia que arroja la curva. Los resultados obtenidos por estos ensayos a edad de 7 días están 20.44% encima de la relación resistencia-madurez original, a la edad de 28 días esta diferencia se reduce a 4.12%. De acuerdo a fundamentos expuestos por la ASTM C1074, para el dato de 7 días, se debe desarrollar una nueva relación de resistencia-madurez ya que la diferencia excede del 10% permitido.
- Los cilindros curados en laboratorio y ensayados a 7 días para la calibración de la mezcla (Fase I) tienen una resistencia promedio de 309.0 kg/cm², y los curados en campo para el proceso de validación tienen 329.8 kg/cm² por lo que hay una leve diferencia de sólo 20.8 kg/cm² que representa un porcentaje de variación de 6.7%, por consiguiente al utilizar la relación resistencia-madurez original se está subestimando la resistencia real en campo y se tendrán datos conservadores. Desde el punto de vista de seguridad estructural es aceptable y se puede seguir utilizando la curva con confianza, pero desde el punto de vista de

economía y representatividad es inaceptable y se tendrá que realizar una nueva calibración de la mezcla.

- Determinando la resistencia real del concreto en el lugar por medio del método de madurez, es posible conocer el tiempo más apropiado para iniciar el corte de juntas. Utilizando el criterio del gradiente térmico (que establece que para que no hallan agrietamientos descontrolados la superficie de la losa no debe enfriarse en más de 3°C), obtuvimos resistencias para finalizar el corte de juntas similares a los **70.4 kg/cm²** expuesta por la FHWA, por lo que se tomo dicho valor como el límite de la fase final de aserrado.
- En concordancia y similitud con el reporte FHWA-RB-91-079 establecimos un valor mínimo de resistencia a corte de juntas para que no produzcan daños en el concreto ni juntas astilladas o despostilladas de **20 kg/cm²**, este valor nos permitió conocer el inicio de la fase de aserrado para nuestra investigación. Para concretos colados en horas del mediodía la fase de aserrado inició a las 3 horas 36 minutos y finalizó a las 6 horas 40 minutos después del colado, en dicha estación el corte se realizó 11 minutos antes del inicio de la fase de aserrado y los resultados obtenidos fueron aceptables.

Para el concreto colocado en horas de la tarde el inicio de la fase de aserrado se dio 3 horas 30 minutos después del colado y la finalización se dio a las 7 horas 20 minutos extendiendose 40 minutos más que el

concreto colado al mediodía producto del fraguado gradual y poca influencia solar en horas de la tarde-noche.

- La similitud en el comportamiento del historial de resistencia a edad temprana y tiempos de resistencia para corte de juntas en ambas horas del día está asociado a la influencia directa del compuesto químico utilizado como curador, este curador fue aplicado con un aspersor sobre el concreto aproximadamente 1 hora posterior al colado, o inmediatamente después de texturizar el concreto.
- La apertura de tráfico al público se puede realizar cuando el concreto tenga una resistencia a compresión de 260.7 kg/cm^2 (3.8 Mpa), esta resistencia se alcanzó cuando el concreto tenía una edad de 6 días 6 horas para concreto colado en horas del mediodía y 6 días 5 horas para concreto colocado en horas de la tarde, notándose una diferencia de 1 hora debido al incremento de la resistencia a edades tempranas, por ende un decrecimiento en resistencia a edades prolongadas en concordancia con el efecto crossover .

La apertura al tráfico de construcción específicamente ($MR=3.0 \text{ Mpa}$)se alcanzó 1 días 8.0 horas posterior al colado para el concreto colado en horas del mediodía y de 1 días 8.5 horas para concreto colados en horas de la noche. Con el método de madurez se disminuyen los tiempos de apertura debido a que monitorea directamente el concreto en el sitio y se agilizan los trabajos de construcción.

- Es posible, implementar el método de madurez para el aseguramiento de la calidad de las obras que se realizan en el país, debido a que puede disponerse del equipo y sus accesorios en el mercado local, además de proveer ventajas que otros métodos no proporcionan, como la determinación de la resistencia real del concreto colocado en las estructuras.
- En base a la investigación realizada, podemos afirmar que el método de madurez puede ser aplicado con mucha confiabilidad en pavimentos de concreto, puentes, edificaciones y viviendas de dos o más niveles. Estas obras pueden ser prefabricadas o coladas en el sitio.

Recomendaciones

- El método de madurez, no debe ser considerado como un sustituto de los métodos tradicionales para determinar la resistencia del concreto, los cuales involucran el ensayo de especímenes cilíndricos y vigas, si no, como un método para el aseguramiento de la calidad, sobre todo, para el contratista, dado que aún falta por conocer del método para ser implementado como criterio de supervisión.
- Es importante mantener un control periódico de las dosificaciones y componentes que se utilizan en el diseño mezcla, estos son tipo de cemento, agregado y aditivo, ya que una leve alteración de los mismos involucrará fallas en precisión de la curva de calibración.
- Para obtener una mayor precisión en lecturas de madurez es recomendable determinar, en la medida de lo posible, el datum de temperatura o temperatura de referencia para el diseño de mezcla a usar; un valor de 5°C es aplicado para reproducir resultados confiables en climas cálidos.
- La profundidad de cada sensor en el pavimento dependerá de los resultados que deseemos obtener. Para implementar el método en pavimentos de concreto es necesario colocar un sensor en la parte

superior (a 3cm de la superficie de la losa) que servirá para brindar información de tiempo-resistencia de corte de juntas y uno a medio espesor de la losa que ofrecerá valores de resistencia.

- Se recomienda proteger los cables de los sensores que salen al exterior del pavimento con poliducto para evitar daños en los mismos por las condiciones ambientales o por personas.
- Debe ser adoptado el método que mejor se ajuste a las necesidades del proyecto para validar la curva de calibración, considerando las variaciones que presentan, debido a su naturaleza, que pueden ser destructivos o no destructivos.
- 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

BIBLIOGRAFÍA

Fuentes de consulta

- ❖ STANDARD PRACTICE FOR ESTIMATING CONCRETE STRENGTH BY THE MATURITY METHOD. ASTM Designation C 1074 — Philadelphia, Pa. (2004).
American Society for Testing and Materials.

- ❖ USING MATURITY TESTING FOR AIRFIELD CONCRETE PAVEMENT CONSTRUCTION AND REPAIR
Steve Trost, Gary Fick, Jim Hunt and Joseph Pruitt
Strategic Solutions International, LLC. March 2006

- ❖ STRENGTH MEASUREMENTS USING MATURITY FOR PORTLAND CEMENT CONCRETE PAVEMENT CONSTRUCTION AT AIRFIELDS
Robert O. Rasmussen, James K. Cable, Dennins J. Turner - The Transtec Group, Inc. April 2003

- ❖ APLICACIÓN DEL ENSAYO DE MADUREZ A PAVIMENTOS DE HORMIGÓN.
Mechura, Verónica
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata - CENTRO DE INVESTIGACIONES VIALES

- ❖ METHOD OF TESTING THE STRENGTH OF PORTLAND CEMENT CONCRETE USING THE MATURITY METHOD
Iowa Department of Transportation – Office of Materials
April 19, 205 – Martls. IM 383

- ❖ HORMIGÓN AL DÍA.
Año 2005. Número 34
Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile - ICH

- ❖ THE USE OF THE CONCRETE MATURITY METHOD IN THE CONSTRUCTION OF INDUSTRIAL FACILITIES: A CASE STUDY.
Paul M. Goodrum, Jiukun Dai (Junio 2004),
University of Kentucky

- ❖ DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO. PCA
Steven H. Komatka y William C. Panarece México primera edición, 2004

- ❖ EL CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD EN LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO.
IMCYC. Revista N° 167, año 1985.

- ❖ MATURITY TESTING OF CONCRETE PAVEMENT: APLICATION AND BENEFITS ACPA (American Concrete Pavement Association 2002)

- ❖ THE MATURITY METHOD: FROM THEORY TO APPLICATION.
Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD 20899-8611 USA
N.J. Carino. H.S. Lew.

- ❖ ADECUADA APLICACIÓN DEL CONTROL TÉRMICO Y DE MADUREZ DEL CONCRETO (CALORIMETRÍAS DEL CONCRETO) EN LA DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE DESMOLDE Y DESCIMBRE EN VIVIENDA
Rodrigo N. Quimbay herrera- Colombia

- ❖ IMPLEMENTATION OF CONCRETE MATURITY METERS.
Allyn Luke C.T. Thomas Hsu Sun Punurai (December 2002).
Institute of Technology Civil & Environmental Engineering. NewJersey
- ❖ UTILIZATION OF MATURITY METERS FOR CONCRETE QUALITY ASSURANCE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (FDOT).
Irtishad ahmad.
- ❖ CIP 39 – EL MÉTODO DE MADUREZ
NRMCA. www.nrmca.com. 2012.
- ❖ MADUREZ DEL CONCRETO Y DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA IN SITU.
Germán Hermida; 360° en Concreto – www.argos.com.co

Tesis:

- ❖ “DETERMINACION DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO A EDADES TEMPRANAS BAJO LA NORMA ASTM C 1074, EN VIVIENDAS DE CONCRETO COLADAS EN EL SITIO”
Oscar Ernesto Aguilar Beltrán, Edwin Adiel Rodríguez Mejía, Martín José Leonel Sermeño Monge. UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA, JULIO 2009.
- ❖ APLICACIÓN DEL METODO DE MADUREZ EN PAVIMENTOS DE CONCRETO - Edilmar Vicente Avalos Rodríguez, María Irene Beltrán Valle Heidi Yolanda Durán Velasco. UNIVERSIDAD POLITECNICA DE EL SALVADOR 2008.

ANEXOS

ANEXO A.1 - ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL MÉTODO DE MADUREZ EN PAVIMENTOS DE CONCRETO

Para realizar un análisis que nos permita contemplar los costos económicos de la implementación del método, es necesario también hacer una comparación de los costos que tienen los métodos para determinación de resistencia usados en la actualidad en nuestro medio.

Existen muchos ángulos de percepción, es decir que el análisis puede ser orientado a una empresa prestadora de servicios para determinación de resistencia y módulo de ruptura de un concreto, también puede ser orientado a una empresa constructora que requiera los servicios de pruebas o ensayos que le permitan conocer la resistencia y el módulo de ruptura de un concreto; estas 2 maneras de visualizar los costos son los de mayor interés, pues son las situaciones más comunes en nuestro medio.

El costo del método se puede afrontar como una empresa prestadora de servicios o como una empresa o persona natural solicitante del servicio de ensayos; para quien presta servicios el análisis debe ser efectuado a largo plazo y para quien solicita a corto plazo.

Una de las consideraciones para el presente análisis es que el método de madurez depende de los métodos convencionales en su primera fase, en la cual se elaboran cilindros o vigas, entonces la diferencia económica entre un

método y el otro se da en el momento de la etapa de campo, así que se realizará el análisis con ese énfasis.

Para la aplicación del método en su segunda fase la cual es en el campo, es necesario la introducción de los sensores, la norma ASTM C-1074 no establece una frecuencia de introducción de sensores, mas sin embargo usaremos uno de los siguientes criterios manejados en EEUU un país en el cual el método ya es aplicado en el control de calidad:

(a) IOWA departamento de transporte establece que se usen 2 sensores por día de pavimentación.

(b) TX departamento de transporte establece que se usen 2 sensores por cada 2510m² de pavimento colocado.

Usando el criterio A se estarían utilizando 2 sensores por día de pavimentación. Sabiendo que en promedio se colocan 120m³ por día, entonces se estarían colocando 2 sensores por cada 120m³, el costo de esto equivaldría a \$80.

A continuación se detallan algunos precios relacionados a la implementación del método de madurez

EQUIPO





PRODUCTO	DESCRIPCION	PRECIO	IMAGEN
Pocket COMMAND Center (lector de bolsillo)	Pocket PC y software Pocket COMMAND Center pre-instalado; accesorios para leer sensores (NO INCLUYE SENSORES)	\$950	
Sensor COMMAND Center con cable de 8' de largo	1 sensor COMMAND Center con cable de 8' (2.4 m.)	\$35	
Sensor COMMAND Center Sensor con cable de 15' de largo	1 sensor COMMAND Center con cable de 15' (4.9 m.)	\$40	
Cable de extensión para sensore	Este paquete permite extender el cable del sensor hasta 100'(30.5 m) Precio varia	\$50	

Tabla 5.6: Precios y descripción de equipo de madurez

MANO DE OBRA

SERVICIO	DESCRIPCIÓN	PRECIO	PERSONAL
Día de entrenamiento	Incluye un día de visita para la instrucción de la teoría de madurez, desarrollo de curvas de resistencia-madurez, estimación de resistencia in-situ, y validación de curvas de madurez	\$900	Ingeniero o técnico en ingeniería civil
Lecturas en campo e interpretación de resultados	Introducción de sensores en el momento del colado y toma de lecturas in situ durante 8 horas	\$50	Ingeniero o técnico en ingeniería civil

Tabla 5.6: Precios y descripción de equipo de madurez

MUESTREO CON CILINDROS Y VIGAS

El muestreo con cilindros debe tener una frecuencia de acuerdo a como lo establece el ACI 318-08 sección 5.6.2;

Los siguientes tres criterios establecen la mínima frecuencia de muestreo requerida para cada clase de concreto:

- (a) Una vez cada día que se coloque determinada clase, pero no menos que
- (b) Una vez por cada 120 m³ de cada clase colocada cada día, ni menor que

(c) Una vez por cada 500 m² de superficie de losa o muro construida cada día.

Sólo debe considerarse una cara de la losa o muro al calcular su superficie. Si el espesor promedio de la losa o del muro es menor que 250 mm, el criterio (c) requerirá de un muestreo mayor a una vez por cada 120 m³ colocados.

Se debe elegir un método de entre cilindros y vigas para la obtención de la resistencia y módulo de ruptura, pues se puede correlacionar para obtener la resistencia a compresión o el módulo de ruptura.

Basándonos en esta frecuencia para realizar los ensayos podemos establecer un costo aproximado de acuerdo con el mercado local.

El precio por ensayo de viga o cilindro tiene un costo de \$10 por espécimen, por cada muestreo se elaboran 4 vigas o 4 cilindros entonces para ser ensayados al día 7 y 28 respectivamente, usaremos el criterio B establecido por el ACI 318-08, es decir se tomará una muestra de 4 vigas o 4 cilindros por cada 120m³, haciendo un total de \$40 por cada 120m³ en concepto de ensayos (someter los espécimen a una carga provocando su falla para la obtención de resistencias y módulos de ruptura máximos de acuerdo con la ASTM C-39 y C79 respectivamente) para determinación de resistencia y módulo de ruptura. Antes de ser sometidos a esos ensayos tienen que pasar por una etapa de curado para lo cual se establece un costo de \$10 en

concepto de transporte, y \$10 en concepto de curado, haciendo un total de \$60; este es el costo sin tomar en cuenta equipo y mano de obra.

Comparación de los métodos para determinación de resistencia

Para cada 120m³ de concreto colocados deben de realizarse 4 vigas o 4 cilindros con los métodos convencionales, esto equivale a un valor monetario de \$60, con el método de madurez se deben colocar 2 sensores, esto equivale a un valor monetario de \$80, es decir que implementar el método de madurez genera un costo mayor, \$20 más que usando métodos tradicionales; pero si tomamos en cuenta el concreto que se utiliza para elaborar las vigas y cilindros, el cual es extraído del concreto que se coloca en la pista, entonces los costos de los métodos tradicionales ascienden a un aproximado de \$100. Tomando esta consideración el método de madurez resulta económicamente más viable.

En el aspecto técnico los métodos de determinación de resistencia se limitan a presentar información justa y precisa sobre resistencia, entonces las aplicaciones resultantes de estos ensayos son muy escasas; el método de madurez no solo proporciona información de resistencia sino también que presenta información sobre la temperatura, y tiempos exactos e instantáneos de resistencia para poder utilizar la información para muchas aplicaciones, como lo es el aserrado, la apertura al tráfico, el alabeo, etc.

Anexo A.2 –GUÍA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ EN PAVIMENTOS DE CONCRETO

1.0 ALCANCE

- 1.1 Esta es una guía práctica en la cual se detalla paso a paso como se emplea el método de madurez del concreto (norma astm c-1074) aplicado a pavimentos de concreto, con el propósito de facilitar y potenciar el empleo de la teoría de madurez. La práctica se incluye una etapa previa y una etapa de campo, que conforman el proceso para llegar a tomar lecturas de resistencia en tiempo real cuando el proyecto esté en ejecución.
- 1.2 Los valores indicados en unidades **SI** se consideran como el estándar. Los valores mostrados en paréntesis son únicamente para fines de aclaración, con excepción de la unidades de temperatura en °C

2.0 DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA

- 2.1 Estándares ASTM C-1074

3.0 CONSIDERACIONES PREVIAS

- 3.1 Antes de iniciar con la etapa de laboratorio se debe tener establecido el diseño de mezcla a utilizar en el proyecto, debe estar debidamente autorizado para así proceder al empleo del método de madurez en dicho concreto.
- 3.2 Se debe tener toda la información de las características del concreto tales como, características de los agregados, tipo de cemento, si se utilizaran aditivos especificar bien el tipo y función de los mismos.
- 3.3 Se debe tener noción de un rango de temperaturas a las cuales estará expuesto el concreto en el lugar del proyecto.
- 3.4 El concreto utilizado en la etapa de laboratorio debe ser el mismo que se utilizara en el proyecto para que la curva de calibración tenga validez y tal curva será utilizada solo para ese diseño de concreto.

NOTA-1: El diseño del concreto que se empleara en el proyecto y al que se le aplicara el método de madurez no debe ser modificado en ninguna circunstancia pues perdería validez los avances hechos con el método de madurez, si fuese el caso para resolver la situación se debe empezar de nuevo la aplicación del método desde su fase de laboratorio para generar

una nueva curva de calibración que sea confiable y aplicable al nuevo concreto que se estaría usando en campo.

4.0 CALIBRACIÓN DE LA MEZCLA (ETAPA DE LABORATORIO)

En esta etapa se expondrá la metodología para la obtención de la curva de calibración siendo esta la etapa previa a la etapa de campo y consiste en determinar la relación Resistencia-Madurez y su ecuación respectiva.

4.1 FUNCIÓN DE MADUREZ

En esta práctica utilizaremos la función de Nurse-Saúl que puntualiza que el concreto con la misma madurez tendrá la misma resistencia, no importando las combinaciones de temperaturas, siempre y cuando sea la misma mezcla.

Cuya ecuación es:

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad \text{Ecuacion 1}$$

Donde:

M:	Índice de madurez, en °C-horas ó °C-días
T:	Temperatura promedio del concreto, en °C, durante el intervalo de tiempo Δt .
T ₀ :	datum de temperatura
t:	tiempo transcurrido

NOTA-2: Esta ecuación la resuelve automáticamente el equipo de madurez y el único dato que le introduciremos al equipo es la de datum de temperatura (T₀).

4.2 ELECCIÓN DEL DATUM DE TEMPERATURA (T₀)

La explicación teórica de la temperatura Datum o temperatura de referencia es "la temperatura de una mezcla de concreto por debajo del cual todas las reacciones de hidratación cesan". Es decir la temperatura de referencia a la cual el concreto no gana resistencia.

4.2.1 RECOMENDACIONES SEGÚN TIPO DE CONCRETO

La temperatura de referencia (T_0) 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.

Para elegir el T_0 tome en cuenta uno de estos parámetros:

- a) Para cemento Tipo I sin adiciones y un rango de temperatura de curado de 0° a 40°C , la temperatura de referencia recomendada es de **$T_0 = 0^\circ\text{C}$** .
- b) Para concretos retardante, aquellos que adquieren resistencia muy lentamente debido a las temperaturas muy bajas, aditivos o materiales puzolánicos, la temperatura de referencia recomendada es de **$T_0 = -10^\circ\text{C}$** .
- c) Para concretos con alta resistencia inicial se debe usar una la temperatura de referencia de **$T_0 = +6.5^\circ\text{C}$** .¹² según datos obtenidos de estudios realizados en New Jersey.
- d) Si el concreto que se utiliza no coincide con los parámetros anteriores el proceso para obtener el Datum de temperatura adecuado para un concreto en particular se detalla en el anexo A1 de la norma ASTM C-1074.

4.3 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS

En esta parte se harán 17 especímenes cilíndricos con el procedimiento que indica la astm C-192, 15 servirán para ser ensayados por el método de compresión simple (proceso de la astm C-39) y 2 para ser instrumentalizados con sensores térmicos y registrar la temperatura y la madurez de estos durante 28 días.

4.3.1 Se debe preparar la mezcla de concreto con el tipo de mezclador que se utilizara para el proyecto y con la mismas dosificaciones que el concreto de diseño es decir debemos asegurarnos que el el concreto que estamos analizando es el concreto que se usara en campo bajo los mismos procesos de producción para una buena representación de la curva de calibración.

4.3.2 Tomamos una una cantidad de concreto considerable para hacer varios cilindros a la cual le medimos la temperatura según la astm C-1064 para

¹² FHWA-NJ-2002-003 "Implementation of concrete maturity meters" December 2002.

constatar que no sobrepasa los 32 °C, a la misma vez medimos el revenimiento según la ASTM C-143, si el revenimiento anda en el rango definido por el diseño del concreto entonces podremos proceder a la realización de cilindros de lo contrario se tiene que volver a generar otra bachada de concreto.

4.3.3 Si el concreto no nos permite realizar los 15 cilindros de una sola bachada por la pérdida de humedad y fluidez, se recomienda hacer dos bachadas para tener una mejor representación del concreto y de cada bachada fabricar igual número de especímenes . Los moldes deberán ser moldes metálicos estandarizados debidamente lubricados.

Algo que se debe tomar en cuenta es que se deben rotular los cilindros adecuadamente, diferenciando los de la primera bachada con los de la segunda, así a la hora de el ensayo según la ASTM C-39 se escogerá fácilmente un cilindro de cada bachada para ser reventado a la edad de 1,3,7,14 y 18 días.

4.3.4 De manera simultánea se seleccionan 2 cilindros a los cuales se les debe insertar los sensores térmicos, para que estos cilindros representen todo el lote de especímenes, instrumentalizaremos un cilindro de cada bachada que generemos para el llenado de los 15 cilindros anteriores.

Los sensores deben quedar en el centro del cilindro, con una tolerancia de ± 15 mm desde su centro, la metodología empleada para introducirlo consiste en llenar el cilindro hasta su segunda capa debidamente varillada, luego con una varilla delgada se empuja el sensor con el cuidado de proporcionarle la posición correcta en altura y en el centro del espesor, luego se colocó la tercera capa de concreto para llenar el cilindro y se enraso la superficie, teniendo el cuidado de no hallar el cable del sensor para evitar que este se mueva de su centro. De esta manera los sensores quedan embebidos correctamente en los cilindros.



Figura 1: Introducción de sensores en el centro del cilindro

NOTA-3: Es importante anotar la hora exacta en que los sensores de cada bachada fueron introducidos en los cilindros.

4.4 ACTIVACIÓN DE LOS SENSORES

Los sensores térmicos registran temperaturas desde el momento de su fabricación un dato cada 20 minutos por defecto con capacidad de 2048 datos de temperatura, pero en pedidos especiales se pueden obtener sensores que registren temperaturas para periodos más cortos o más largos desde 5 minutos hasta una hora.

Lo que no se puede hacer es leer datos de madurez si los sensores no están debidamente configurados.

4.4.1 CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO

Antes de conectar cualquier sensor al equipo de madurez y realizar lecturas de temperatura y madurez, se deben de introducir parámetros importantes como lo son fecha y hora de colado, datum, descripción del sensor, estacionamiento, sistema de unidades a utilizar, referencia del tiempo o clima.

NOTA 4: En esta guía se utiliza un equipo Pocket PC y el software COMMAND CENTER para el estudio de madurez.



Figura-2 Equipo de madurez: Pocket PC, Software COMMAND CERTER, sensor Térmico o termocupla.

I) MENÚ MATURITY

Figura 5: Configuración del submenú “Maturity” del menú “Input” (marcados en rojo las casillas a llenar)

En la Pocket PC abrimos el software COMMAND CENTER, en el menú “input” seleccionamos la opción “maturity” esta nos desplegará una pantalla donde nos pide ingresar datos, en esta pantalla nos limitaremos a

seleccionar la primera casilla “Maturity/Strength Calculations Enabled?”, el recuadro llamado “maturity curve parameters” se deja intacto, luego en llenamos la casilla “Datum Temperature” (la elección del datum basado en el apartado 4.2.1 de esta guía) Una vez terminado presionamos “ok” para que se guarden los cambios realizados.

II) MENÚ PLACEMENT

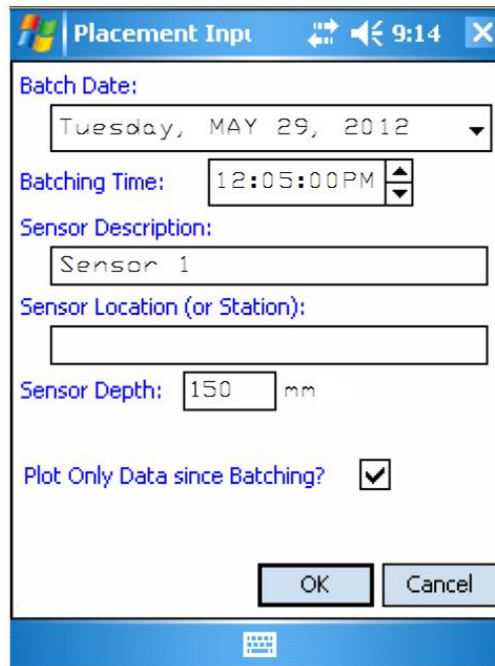


Figura 6: Ejemplo de cómo llenar datos en el menú “Placement input”

En el submenú “Placement” se despliega una pantalla anterior donde nos pide fecha y hora de bachada es decir el momento en que el sensor toco el concreto, nos pide descripción o nombre para el sensor (acompañar siempre el nombre con el número de bachada, eje: sensor 1 y sensor 2), luego nos pide estación del sensor (opcional) ya que se usa cuando estamos en el pavimentos y se ponen varios sensores a distintas distancias, pero en este caso es en cilindros y no hay estacionamientos.

En la siguiente casilla nos pide la profundidad del sensor para este caso sería la mitad de la altura total del cilindros, es decir si utilizamos un cilindros

de 30cm de altura el punto de profundidad del sensor seria 150 mm ya que el sensor quedo colocado a la mitad del cilindro. La siguiente casilla nos pregunta si deseamos graficar datos a partir de la fecha de bachada ahí llena esa casilla para que estos sean los únicos datos que nos arroje ya que son los que nos interesan.

III) MENU PREFERENCES

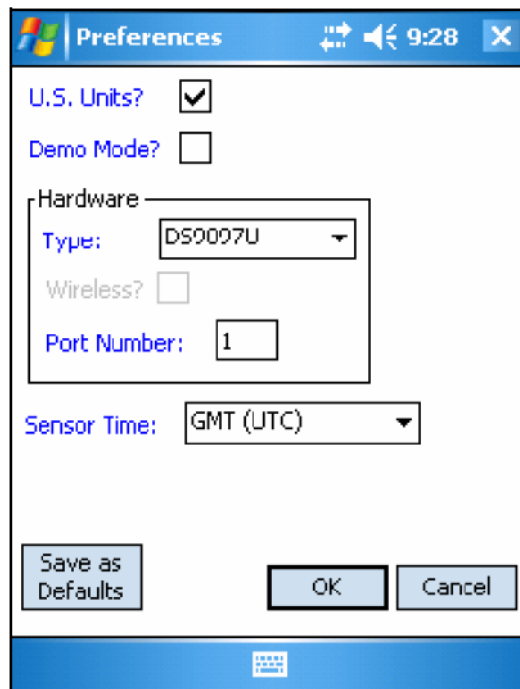


Imagen 5: Submenú preferences del menú input.

En pantalla anterior del submenú "Preferences", en la primera casilla se definen las unidades con las que vamos a trabajar ya sea en sistemas inglés y métrico, si selecciona la casilla los datos ser darán en unidades inglesas sino se obtendrán datos en unidades métricas.

La siguiente casilla permanece como se muestra y no se selecciona

El cuadro "Hardware" no se modifican ya que tienen que ver con el código del sensor y numero de puertos de la PocketPC y no se les hace ningún cambio.

La última casilla está relacionada con el huso 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. Al final dar ok para guardar cambios

NOTA-5: Este proceso de configuración se hace previamente a la conexión de cada sensor por primera vez.

4.5 CURADO DE CILINDROS

Luego de transcurridas 24 horas de su fabricación, los especímenes cilíndricos deben ser desmoldados y luego se proceder a ser curados por inmersión en un tanque de agua a una temperatura promedio de 23 ± 2 °C tal como lo establece la ASTM C192. El almacenaje durante las primeras 48 h de curado será en un ambiente libre de vibración.

4.6 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS ESPECIMENES

A menos que se especifique de otra manera, efectúe ensayos de compresión a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, Ensaye dos especímenes en cada edad y calcule la resistencia promedio, Esto debe hacerse siguiendo el procedimiento de ensayo que establece la ASTM C39 “Resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto” 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.

4.7 LECTURA DE LOS SENSORES

En cada edad de ensayo de los cilindros 1,3,7,14 y 28, con el equipo registre el índice de madurez para los especímenes instrumentados, este valor debe ser tomado en el mismo momento en que se realiza el ensayo a compresión de los cilindros. La acción necesaria es conectar el sensor al Pocket Pc y en el software Command Center, entrar al menú “Sensor” y dar “READ” en ese momento se deben generar todos los datos de temperatura y madurez de cada uno de los sensores, este archivo debe ser guardado la primera vez con el nombre del cilindro y el número de bachada al cual pertenece.

NOTA-6: Para los siguientes días a la hora de hacer las lecturas de cada sensor se abre el archivo que fue guardado anteriormente, en el menú, "File" opción "Open", luego se lee el sensor normalmente desde el menú, "Sensor" opción "Read" y a la hora de guardar los datos le damos sobrescribir en el nombre que cada sensor tenía con los nuevos datos.

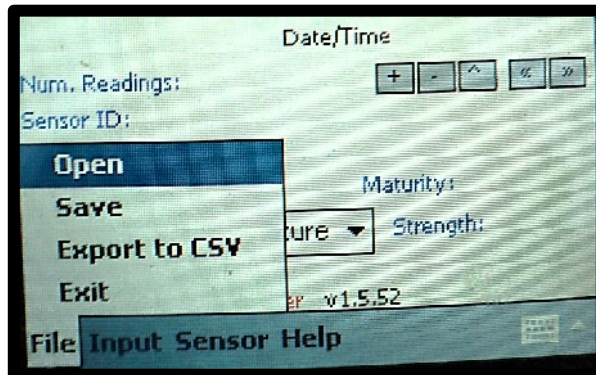


Imagen 6: Menú para abrir un archivo previamente guardado de un sensor.

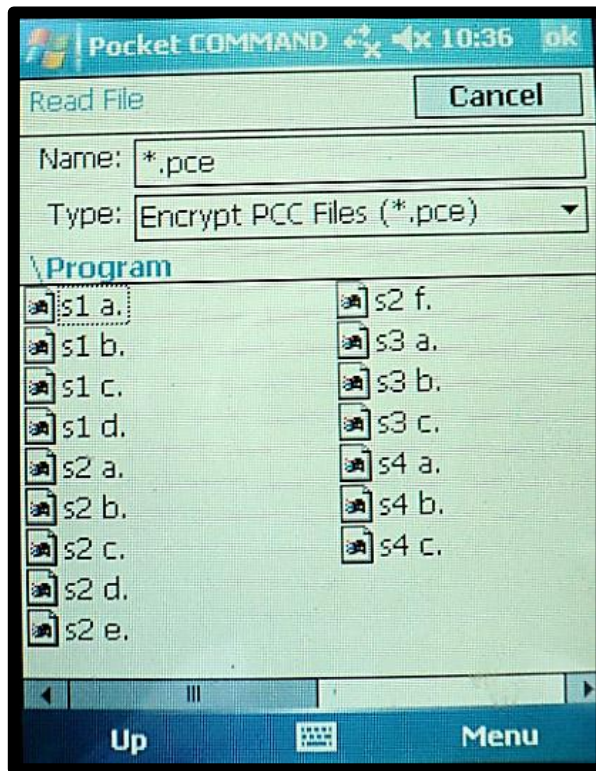


Imagen 7: opciones de archivos guardados con anterioridad. En este caso es vital identificar bien los sensores por nombre y numero de bachada.

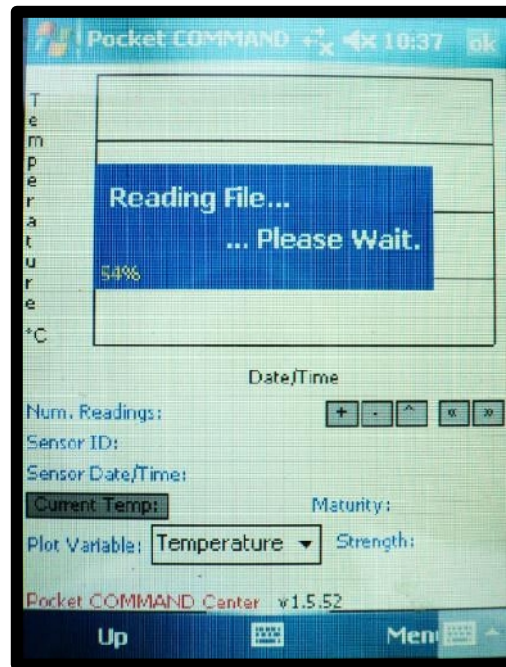


Imagen 8: En esta imagen se muestra el momento justo en que inicia la lectura de un archivo donde estan guardados los registros de un sensor.

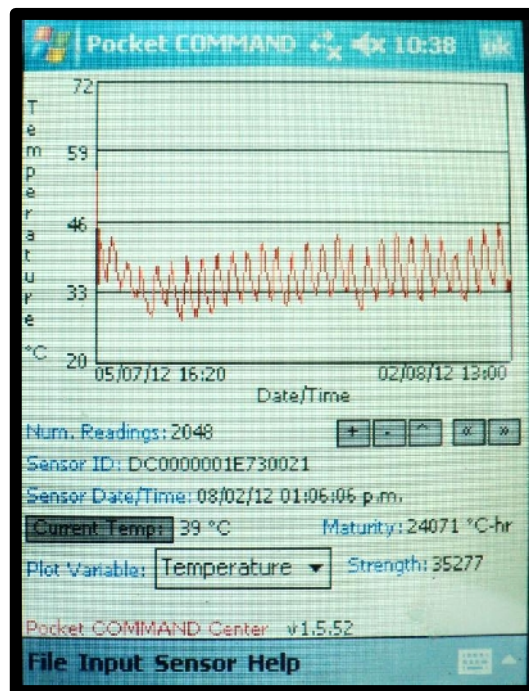


Imagen 9: Esta pantalla es la generada por el equipo de madurez en donde se muestra una gráfica con todos los datos de temperatura durante 28 días.

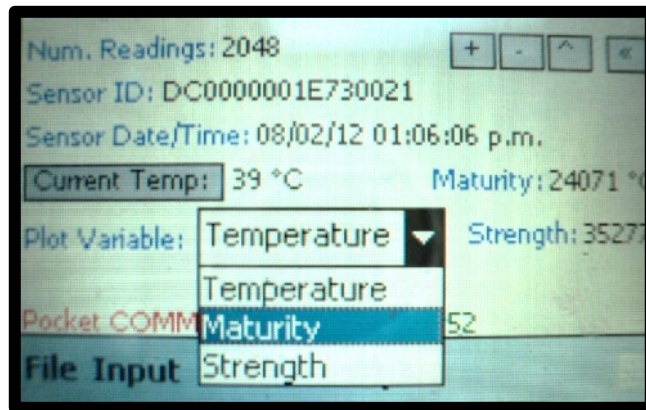


Imagen 10: Aquí se observa cómo cambiar de la opción de Temperatura a Madurez, para que el equipo nos detalle datos de madurez propiamente.

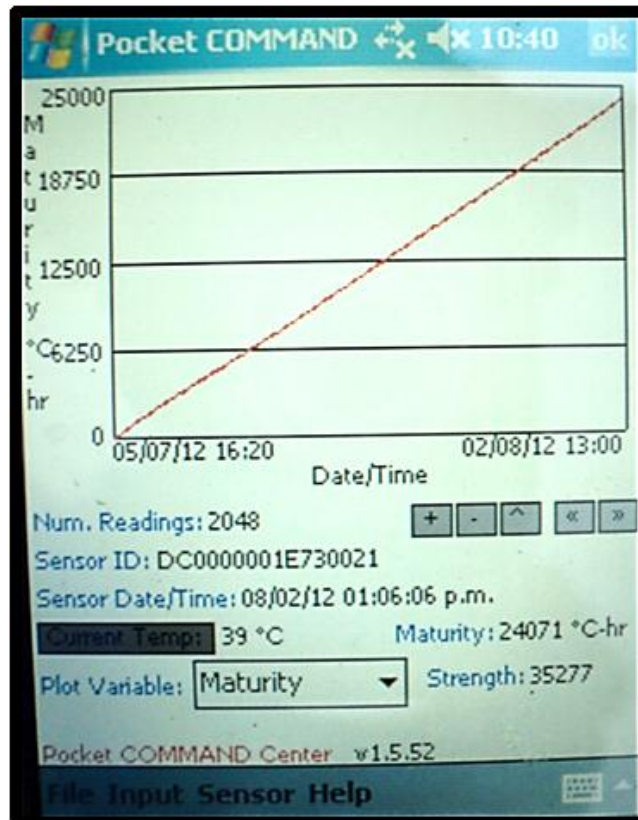


Imagen 11: Grafica de Madurez que muestra el equipo para cada sensor.

4.8 CURVA DE CORRELACIÓN RESISTENCIA-ÍNDICE DE MADUREZ (TTF)

Luego de obtener los datos de laboratorio de los ensayos a compresión cilindros junto con las lecturas de madurez arrojadas por los sensores a los días 1, 3, 7, 14 y 28; estas se promedia por día y se procede a vincular ambos parámetros mediante una gráfica semi-logarítmica en Microsoft Excel, en donde en el eje de las ordenadas (Y) se grafican valores de resistencia obtenidas en laboratorio y en el eje de las abscisas (X) se grafica el índice de madurez de los sensores.

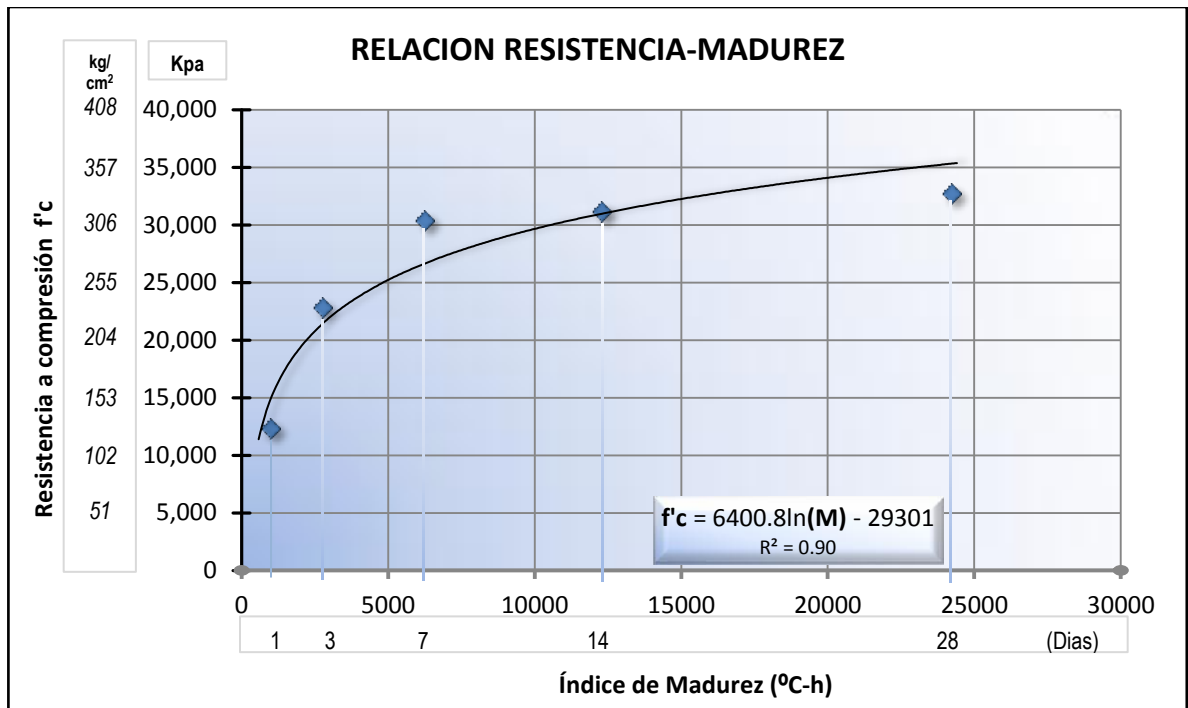


Imagen 12: Ejemplo de una Gráfica de Resistencia VS Índice de Madurez.

Luego de crear la gráfica es necesario emplear una línea de tendencia central y se genera la **ecuación logarítmica natural** y el valor de R^2 que correlaciona la resistencia y la madurez para el diseño de mezcla específico del proyecto.

Para la imagen 12, la ecuación obtenida a partir de esa grafica es:

$$f'c = 6,400.8 \ln(M) - 29,301$$

Donde

$f'c$ representa la abscisa y la resistencia

M representa la Madurez del concreto para un punto dado

Prácticamente con la ecuación de madurez se tiene el instrumento necesario para que cuando midamos en campo un valor de resistencia al introducirlo a la ecuación sepamos que resistencia tiene en ese momento. La curva de madurez que se genere debe tener las mismas características que la curva que se presenta de ejemplo donde los números deben cambiar lógicamente pero el tipo de ecuación se debe mantener.

Nota-7: Los números variaran en gran manera de un concreto a otro y esta ecuación se pone con fines de explicación solamente, en ningún caso se tomen los números anteriores para algún tipo de concreto.

5.0 PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA DEL CONCRETO IN SITU.

Esta etapa es donde se logra el fin de la teoría de madurez que es obtener resistencias del concreto en tiempo real llevando de esta manera un mejor control de calidad del concreto en comparación con los métodos convencionales, simplemente por el hecho de que se lleva un registro muy detallado de la evolución de la resistencia durante el tiempo necesario y de hasta 2048 puntos en un mes superando x miles los 5 puntos por mes de un método de ensayo de cilindros convencional.

Además que a la vez se lleva un registro detallado de las temperaturas que influyen en el concreto cada 20 minutos así como la acumulación de la madurez desde el primer momento que se inserta el cilindro en el pavimento.

5.1 COLOCACIÓN DE SENSORES

Según el fin del sensor así será la colocación que este tenga en el pavimento:

En altura

- Los sensores destinados para estimar resistencia del concreto deben ser colocados a $h/2$ es decir exactamente a la mitad de la altura de la losa de pavimento.
- Los sensores destinados a estimar el momento adecuado para el corte de juntas se deben colocar en un rango de 1'' a 1.5'' medidas desde la parte superior de la losa.

En distancia:

- Los sensores destinados para estimar resistencia del concreto se deben colocar mínimo uno por cada 200 metros de pavimento

realizados o uno por cada día de trabajo, sin embargo entre más sensores se utilizan se lleva un mejor registro del desarrollo de la resistencia del concreto

- Para los sensores destinados a estimar el momento adecuado para el corte de juntas se debe colocar uno al inicio de día de trabajo es decir donde se empieza el colado así este servirá como referencia para empezar el corte de juntas en el momento adecuado al inicio del pavimento.

5.1.1 FIJACIÓN DE SENSORES

En un pavimento real los sensores no se pueden introducir en el momento como se hace en los cilindros, sino los sensores se deben prepara y empotrar previamente a la base del concreto para que estos no se muevan a la hora del colado y los cables queden libres y puedan ser sacados por un costado del pavimento.

Para la colocación se deben generar unas grapas de acero de $\Phi \frac{1}{2}$ " doblado en forma de U, con sus puntas redondeadas, así con esta pieza se puede fijar el sensor y también controlar su altura.

Una vez fijada la grapa en el lugar, amárrese el sensor a la grapa colocándolo en forma horizontal y que la punta del sensor quede libre de contactos con el acero.

NOTA 8: los sensores deben dejarse orientados paralelos al flujo del concreto para que el concreto no genere movimientos significantes en la posición de empotramiento de los sensores.

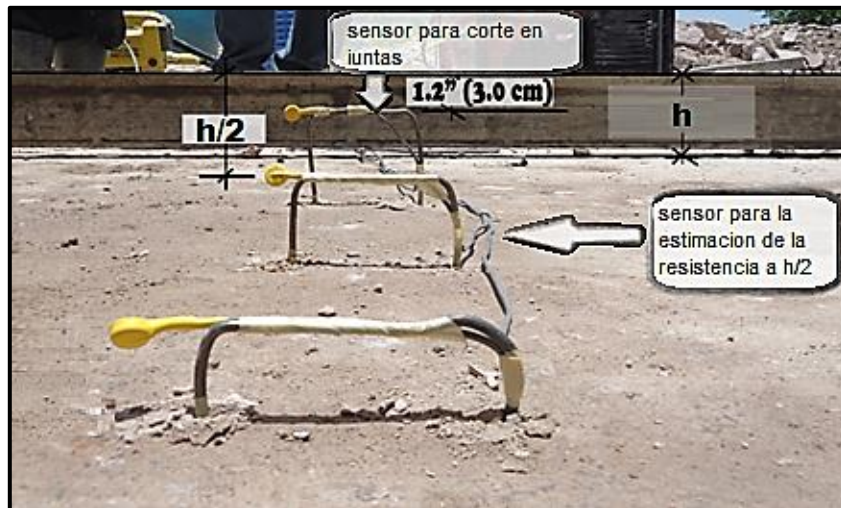


Imagen 13: colocación correcta adecuada de señores en la base.

5.2 Medicion de la madurez en campo

En esta fase es donde podremos estimar la resistencia del concreto en campo por medio del equipo de madurez en cualquier momento despues de colado del concreto pero para ese efecto se requiere previamente introducir al Pocket Pc en el Programa la ecuacion resultante del proceso de laboratorio donde se hizo la calibracion de la mezcla.

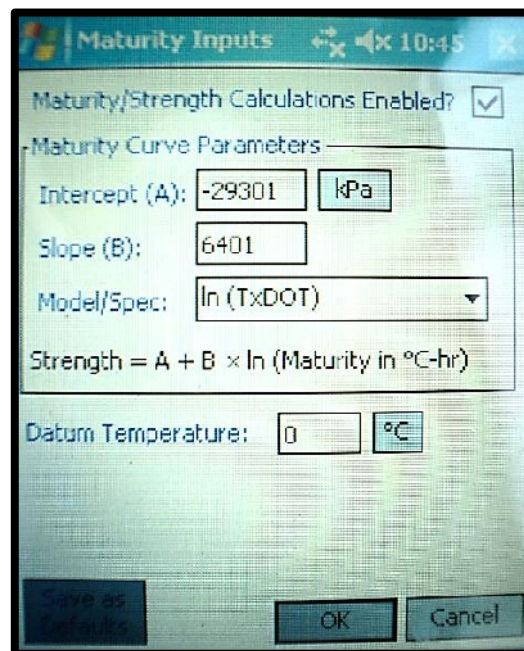


Imagen 14: Introducción de la ecuación de la curva de calibración al en el software "command center"

Los sensores se configuran de la misma manera que en la etapa de laboratorio con la variante que en el menú "Maturity" se introducirá la ecuación de la curva de calibración obtenida anteriormente.

Según la ecuación $F'c = A + B \cdot \ln(\text{Madurez})$ que nos pide el software, tenemos que los Valores que el equipo de madurez pide son los números A y B estos son obtenidos de la curva ecuación obtenida en la fase de laboratorio donde A es el número independiente de la ecuación y B es el número que acompaña al logaritmo Natural.

Una vez hecho este proceso se está listo para la obtención de los tres tipos de registros: Temperatura, Madurez, y Resistencia simultáneamente.

Se conecta el sensor al pocket pc y entramos al Menu "Sensor" Opción "Read" en ese momento empezará a plotear los datos desde el momento de la bajada.

Se cambia del modo de "Temperature" a "Strength" y el equipo nos dibujará una gráfica con la resistencia vs tiempo.

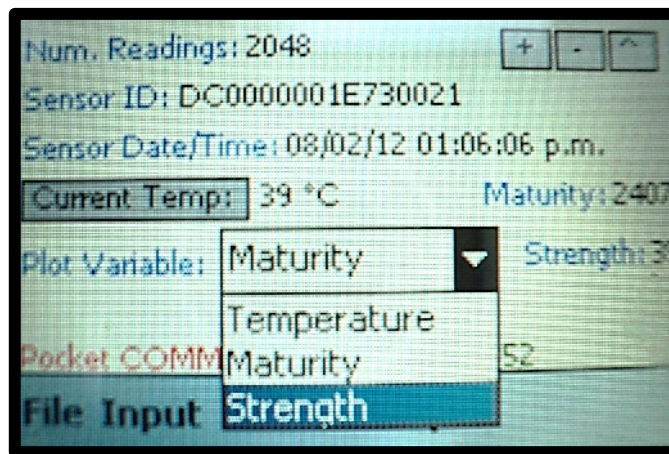


Imagen 14: Cambiando opción de lectura de Madurez a Resistencia de un sensor medida en campo.

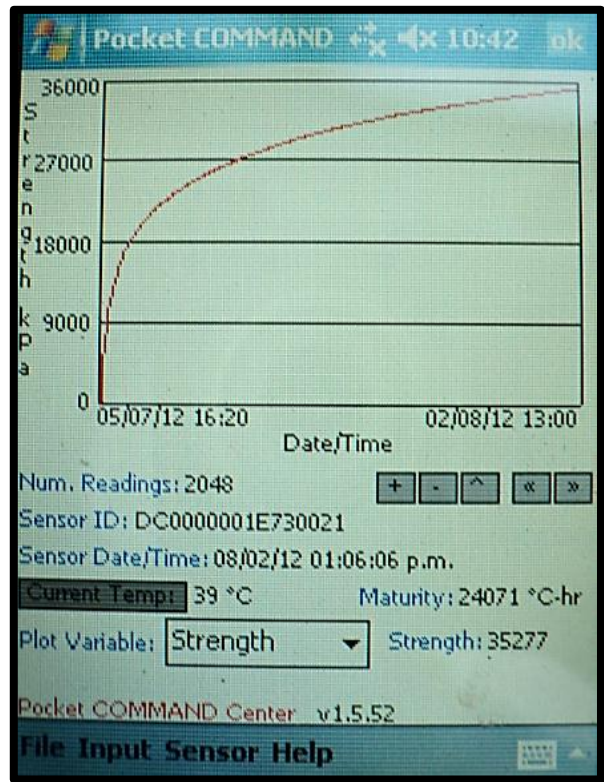


Imagen 15: Grafica de Resistencia Vs Tiempo generada por el equipo de madurez para una edad de 28 días.

Anexo A.3 – ASTM C-1074-98 Traducida al español

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:

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

Dónde:

$M(t)$ = factor temperatura-tiempo a la edad t (grados-día, grados-hora)

Δt = un intervalo de tiempo, días, horas

T_a = temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo Δt , ° C

T_o = temperatura de referencia, ° C

La otra función de madurez es usada para calcular la edad equivalente a una temperatura especificada como sigue:

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

Dónde:

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 Δt , K

T_s = temperatura especificada, K

Δt = 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_0 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 $\frac{1}{2}$ 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 ± 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 (Δt) 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 utilizó 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. Precisión 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 Mandataria)

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:

$$S = S_u \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (A1.1)$$

Donde:

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

S_u = resistencia limitada

t₀ = edad cuando la resistencia desarrollada es asumida a empezar

k = la razón constante.

El programa de computadora calculará la mejor tendencia de los valores

S_u, t₀, 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, S_u. 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 S_u para calcular el valor de A para cada resistencia, donde A es dada por la siguiente ecuación.

$$A = \frac{S}{(A1.2) (S_u - S)}$$

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, T₀ (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.

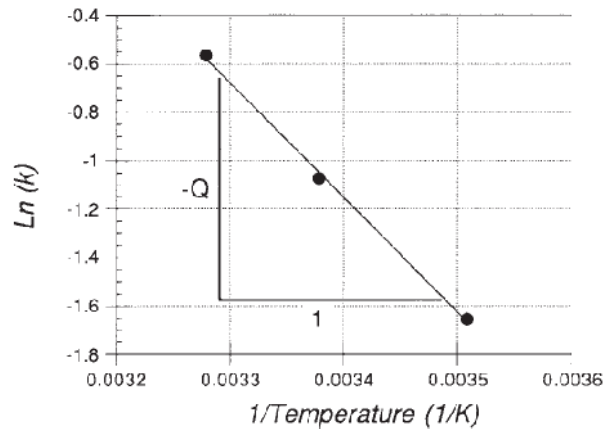


FIG. A1.3 Example of Plot of the Natural Logarithm of K -Values Versus the Inverse Absolute Temperature for Determining the Value of Q used in Calculating Equivalent Age

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:

$$M_c = M_d - (T_o - T_d) t \quad (X1.1)$$

Dónde:

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°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°C-horas .

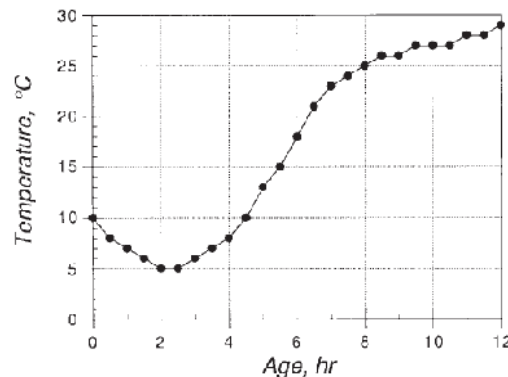


FIG. X2.1 Hypothetical Temperature History used to Illustrate Computations of Temperature-Time Factor and Equivalent Age

X2.3 Cálculo de la Edad Equivalente

X2.3.1 El valor de Q y el valor de la temperatura especificada, T_s , 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.

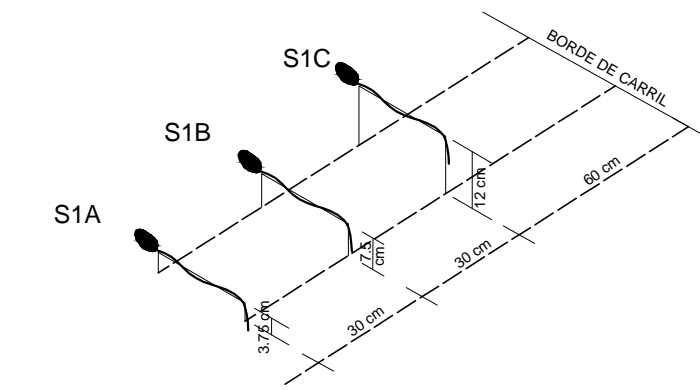
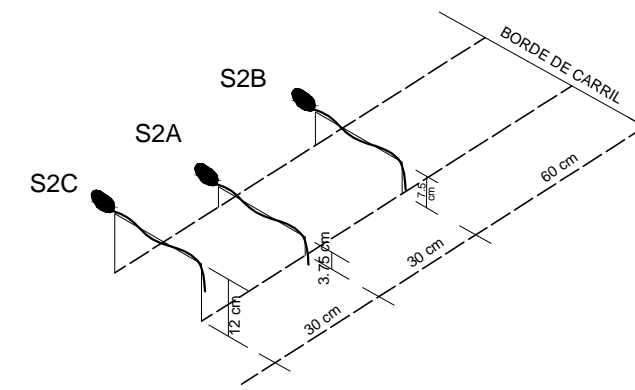
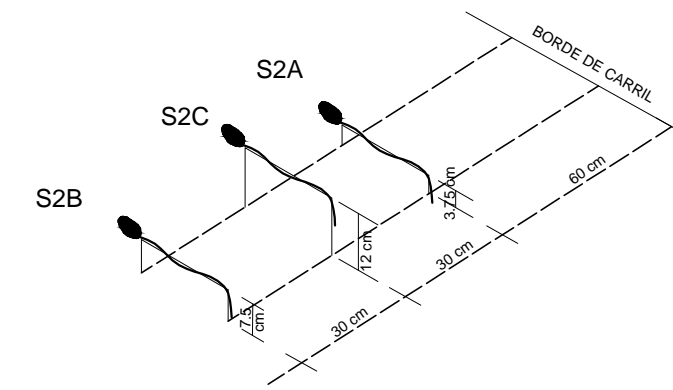
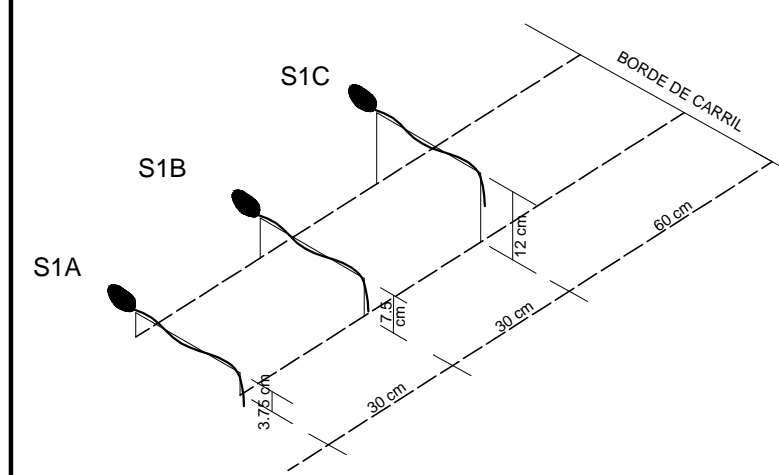
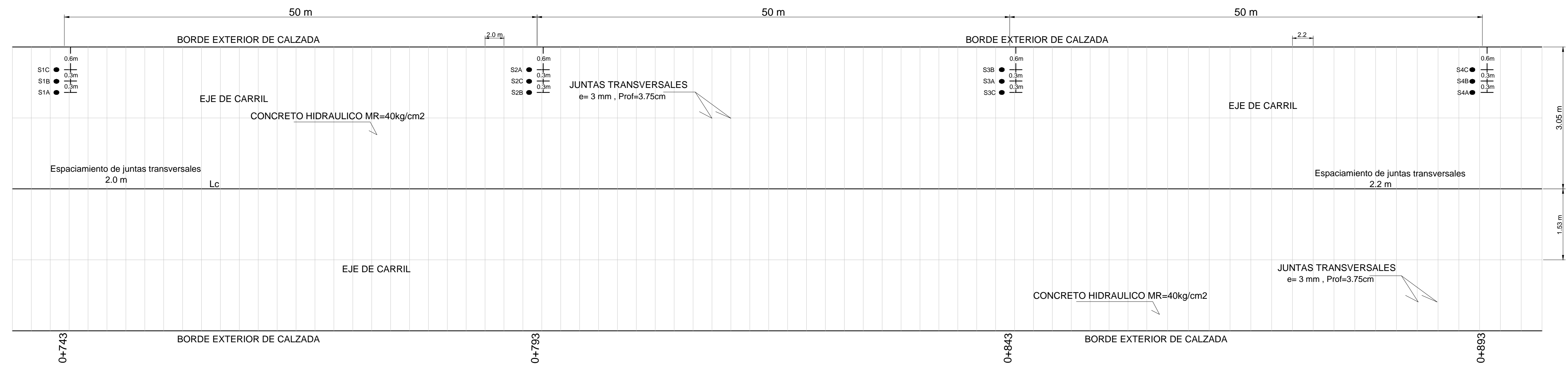
X2.3.3 La sumatoria de las edades equivalentes incrementales da la edad equivalente acumulada a 20°C (columna 9 de la Tabla X2.1). Por ejemplo en una edad de 12 h, la edad equivalente a 20°C es 11.3 h.

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	16	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	56	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

ESQUEMA DE UBICACION DE SENSORES



DESCRIPCION :

ESQUEMA DE UBICACION DE SENSORES TERMICOS

UBICACION :

ESTACION 0+743 - 0+893 TRAMO 7B LISLIQUE-ANAMOROS CARRETERA LONGITUDINAL DEL NORTE.

ESCALA:

H 1:250
V=1:50

FECHA:

AGOSTO 2012

PRESENTA:

ARTEAGA MARTINEZ GABRIEL
CASTILLO B. JOSUE ALFREDO
VELASQUEZ G. JULIO BLADIMIR

HOJA:

1/1

