Nº inv. 66621

T
T224s
2014

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD DE VALPARAISO
JEFE
BIBLIOTECA
FACULTAD DE INGENIERIA

Seguimiento y Evaluación del Control de Resistencia en Pavimentos de Hormigón Mediante la Aplicación de la Metodología de Madurez

Por

Amaro Javier Taucán Burgos

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Guillermo Brante Lara

Agosto, 2014

Pavimentos
Resistencia
obras viales

R. 16077

A mis Padres,
Por todo el esfuerzo, apoyo y entrega puesto en mí...

Agradecimientos

Quiero agradecer profundamente a mis padres, por todo el apoyo y amor incondicional a lo largo de toda mi vida, a mi madre Pamela Burgos por dedicar cada instante de su vida en mi educación y formación, gracias por tu amor, entrega y perseverancia, sin ti no sería la persona que soy ahora. A mi padre Mario Taucán por creer y confiar plenamente en mí, gracias por todo tu esfuerzo viejito y por demostrarme lo que es ser un buen padre. Gracias por todo padres ya que sin ustedes ésta meta no hubiera sido posible, éste gran logro es nuestro, los amo.

A mis hermanos Alem y Balter, por toda la buena onda y bromas que me hicieron en todo este proceso, han sido mi mejor distracción en los momentos precisos, gracias por su apoyo y ánimo.

A toda mi familia, por la constante preocupación y apoyarme en todo lo que en su momento necesite, gracias por el cariño permanente.

A ti Tatiana, por la comprensión, fortaleza y consejos que me diste cuando más lo necesité, gracias por formar parte de mi vida y estar siempre junto a mí.

A mi profesor guía Guillermo Brante Lara, por la confianza y buena disposición en la realización de éste trabajo de tesis, sobre todo por su orientación y constante motivación. También agradecer a toda la Unidad de Laboratorio y Gestión de Calidad de la Dirección de Vialidad, Región de Valparaíso, Daniel, José, Cinthya, Doris y todo el personal de trabajo, por la colaboración permanente y herramientas otorgadas para efectuar este estudio, estoy muy agradecido por la buena predisposición y el conocimiento entregado.

A todos mis amigos, por su gran amistad y por estar siempre alegrando mi vida, gracias por el apoyo en los buenos y malos momentos. Agradecer también a Iván, por su ayuda y dedicación en una parte fundamental de este trabajo.

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

Gracias.

Índice

Glosario 7
Lista de Abreviaturas 10
Lista de Figuras 11
Lista de Tablas 13
Resumen Memoria 14

CAPITULO 1.
Generalidades 15
1.1 Introducción 15
1.2 Planteamiento del Problema 16
1.3 Objetivos 19
1.3.1 Objetivo General 19
1.3.2 Objetivos Específicos 19
1.4 Alcances 20
1.5 Metodología de Trabajo 21

CAPITULO 2.
Marco Teórico 23
2.1 Red Vial de Chile 23
2.2 Pavimentos Rígidos 24
2.2.1 Introducción a los Pavimentos Rígidos 24
2.2.2 Pavimentos Rígidos 25
2.2.2.1 Ventajas de los Pavimentos Rígidos 27
2.2.2.2 Tipos de Pavimento Rígido 28
2.2.3 Elementos de un Pavimento Rígido 29
2.2.3.1 Sub-rasante 29
2.2.3.2 Sub-base 30
2.2.3.3 Losa de Hormigón 30
2.2.3.4 Juntas 31
2.2.4 Pavimentos Rígidos en el Manual de Carreteras 32
2.3 Método de Madurez 33
2.3.1 Introducción 33
2.3.1.1 Conceptos Relacionados con la Madurez 34

2.3.2 Concepto de Madurez 37
2.3.3 Ecuaciones de Madurez 39
2.3.3.1 Teoría de Nurse-Saúl 39
2.3.3.2 Teoría de Arrhenius 41
2.3.4 Equipo para medición de madurez en el hormigón 43
2.3.4.1 Ubicación de Sensores 45
2.4 Aplicación de la Metodología de Madurez a Pavimentos de Hormigón 46
2.4.1 Normativa para la Determinación de la Madurez 46
2.4.2 Aplicaciones del Método de Madurez en Obras Viales 48
2.4.2.1 Aplicación de madurez en la apertura al transito 49
2.4.2.2 Aplicación de madurez en juntas de pavimentos de hormigón 49
2.4.2.3 Aplicación de madurez en control de calidad 50
2.5 Características Generales Contrato Reposición Ruta 60-CH Sector Juncal-Portillo 51
2.5.1 Antecedentes 51
2.5.2 Ubicación 52
2.5.3 Descripción del Proyecto 53
2.5.4 Trazado y Relieve 56
2.5.5 Clima 57

CAPITULO 3.

Metodología de Control de Resistencias en Pavimentos de Hormigón mediante el Método de Madurez 58

3.1 Determinación de la curva de calibración de madurez 58
3.2 Control de resistencia del pavimento de hormigón en terreno 63
3.3 Verificación de la curva de calibración de madurez 65

CAPITULO 4.

Estudio del Control de Resistencia en Pavimentos de Hormigón Desarrollando la Relación Resistencia-Madurez 66

4.1 Generalidades 66
4.2 Características y Diseño de la Mezcla de Hormigón 67
4.2.1 Dosificación de la mezcla de hormigón 69
4.2.2 Validación de Dosificación 72
4.2.2.1 Primera validación hormigón HF 5.0 (80) 40/06 72
4.2.2.2 Segunda validación hormigón HF 5.0 (80) 40/06 74
4.2.3 Aditivos en el diseño de la mezcla de hormigón 77

4.3 Desarrollo de la curva de calibración de madurez 78
4.3.1 Confección curva de calibración de madurez 79
4.3.1.1 Temporada 1 81
4.3.1.2 Temporada 2 84
4.4 Medición de Índice de Madurez y control de resistencia en Terreno 87
4.4.1 Lectura de sensores de madurez en terreno 88
4.4.2 Control de resistencia en terreno mediante madurez 91

CAPITULO 5.
Análisis de Resultados 95
5.1 Dosificación y diseño de la mezcla de hormigón 95
5.2 Curva de calibración de madurez 97
5.3 Análisis de factores y variables en el control de resistencia mediante el método de madurez 102
5.3.1 Efecto de la temperatura en el desarrollo de la madurez 109
5.3.2 Efecto de la humedad en el desarrollo de la madurez 112
5.3.3 Análisis de las variables involucradas en el desarrollo de la madurez 114
5.4 Análisis de factores propios del proyecto estudiado 115
5.5 Control de calidad del hormigón en obra mediante la madurez. 116

CAPITULO 6.
Conclusiones 119

CAPITULO 7.
Comentarios y Recomendaciones 122

Referencias Bibliográficas 124

ANEXOS 127
ANEXO A - Ensayes y datos de estudio 128
ANEXO A.1 – Dosificación del diseño de mezcla de hormigón 129
ANEXO A.2 – Verificación de dosificación de hormigón 135
ANEXO A.3 – Resultados de residencia metodología tradicional 141
ANEXO A.4 – Resultados implementación metodología de madurez 142
ANEXO B - ASTM C 1074 - 04 Traducida al español. 143
ANEXO C - Análisis de varianza de dos factores 157

Glosario

Aditivo: Sustancia que se incorpora en pequeñas cantidades a la mezcla de hormigón, antes de hacer la mezcla, para conferirle ciertas características.

Agregado: Arena, grava, piedra o cualquier otro material inerte, que se mezcla con cal o cemento para la confección de morteros y hormigones.

Ahuellamiento: Defecto o falla que se produce en pavimentos, consiste en una depresión canalizada de la huella de circulación de los vehículos.

Amasada: Mezcla de todos los componentes de una muestra de hormigón de forma homogénea, se puede realizar de forma manual o mecánica.

Asfalto: Material proveniente de la refinación del petróleo, resultado de los elementos más pesados en este proceso el cual se utiliza como cementante en las mezclas asfálticas.

Berma: Faja lateral, pavimentada o no, adyacente a la calzada de un camino.

Bombeo: Fenómeno que produce la eyección forzada por las juntas y bordes del pavimento, una suspensión en agua de los suelos finos de la sub rasante, debido al paso frecuente de cargas pesadas.

Capa de Rodadura: Capa superior del pavimento por la cual transitan los vehículos, la función es proteger a la estructura del pavimento en general.

Compactación: Aplastamiento de las moléculas de un suelo mediante una operación mecanizada, para obtener una densidad requerida.

Cuneta: Canal o zanja que se abre en los costados de una vía, su función es recibir las aguas pluviales y conducirlas fuera del camino.

Curado: Método que permite asegurar la temperatura y humedad requerida para cumplir el fraguado y endurecimiento óptimo del hormigón.

Densificación: Proceso lento y gradual de reducción del índice de vacíos de un suelo por expulsión del fluido intersticial y transferencia de la presión del fluido (agua) para el esqueleto sólido, debido a las cargas aplicadas o al peso propio de otras capas.

Edad Equivalente: Número de horas o días a una temperatura específica requerida para producir una madurez igual a la madurez lograda por un periodo de curado diferente de la temperatura requerida.

Energía de activación: Energía necesaria para que se produzca la reacción entre el cemento y el agua en una mezcla de hormigón, es medida por medio de ensayos a compresión y los tiempos de fraguado.

Estabilización: Tratamiento en un suelo con el fin de aumentar su capacidad para soportar un pavimento, bajo la acción de determinadas cargas:

Exudación: Forma de segregación, donde el agua tiende a migrar a la superficie y crea una capa delgada, débil, porosa, sin resistencia y deficiente durabilidad.

Factor Tiempo-Temperatura: Madurez calculada para un rango de tiempo, el cual se acumula con los datos obtenidos a edades anteriores para conocer la madurez del hormigón a una edad determinada.

Falla: Movimientos diferenciales en sentido vertical de las losas rígidas, en las juntas o grietas de pavimentos de hormigón.

Función de madurez: Expresión matemática que utiliza el historial de temperatura de una muestra de hormigón durante el periodo de curado para calcular un índice de madurez.

Fraguado: Condición del hormigón cuando ha perdido la plasticidad en algún grado, esta condición es medida en términos de la resistencia a la deformación del hormigón.

Geotextil: Tela permeable y flexible de fibras sintéticas tejidas, principalmente poliéster y polipropileno.

Hidratación: Calor producido en el endurecimiento del hormigón durante el proceso de fraguado.

Hidroplaneo: Fenómeno que se produce cuando los neumáticos de un vehículo pierden contacto con el pavimento por una película de agua y por consiguiente disminuye o se elimina el poder de adherencia de las ruedas.

Índice de madurez: Indicador de madurez que es calculado del historial de temperatura de la mezcla de hormigón usando una función de madurez.

Junta: Discontinuidades presentes en la superficie del pavimento, la orientación de las juntas puede ser en sentido transversal y longitudinal.

Madurez: Grado del desarrollo de una propiedad o característica de una mezcla de hormigón. Se utiliza para describir el desarrollo de la resistencia relativa del hormigón, pero también está asociada a la evolución de otras propiedades que dependen de las reacciones químicas que afectan a una mezcla de hormigón. La madurez depende del historial de curado de una mezcla.

Método de Madurez: Técnica para estimar la resistencia del hormigón.

Nivelación: Emparejamiento de una superficie a un nivel determinado.

Obras de Arte: Obras en un proyecto vial que permiten un saneamiento y drenaje adecuado de las aguas lluvias fuera del camino.

Pavimento: Superestructura vial construida sobre la superficie natural (sub-rasante), compuesta normalmente por diferentes capas las cuales se denominan, sub base, base y la capa de rodadura; cuya función es soportar las cargas de tránsito y transmitir los esfuerzos al terreno.

Pavimento Flexible: Estructura de pavimento compactada en caliente cuya capa superior está conformada por materiales granulares y asfalto, la cual se deforma en conjunto con la base y los otros elementos del pavimento.

Pavimento Rígido: Estructura vial cuya capa superior está constituida por una losa de hormigón, los otros elementos del pavimento son similares a otro tipo de pavimentos.

Red Vial: Conjunto de vías o caminos debidamente clasificados.

Relación Agua/Cemento (A/C): Razón de la cantidad de agua en peso, donde se excluye aquella que absorben los agregados del hormigón.

Relación Resistencia-Madurez: Relación matemática obtenida entre la resistencia a la compresión y el índice de madurez del hormigón.

Rodadura: Ancho útil de una vía.

Rugosidad: Conjunto de irregularidades que posee la superficie de un pavimento rígido o flexible que proporcionan mayor roce entre el neumático y pavimento.

Segregación: Separación involuntaria de los constituyentes del concreto o las partículas de agregado, provocando una falta de uniformidad en su distribución.

Temperatura Dato: Temperatura que es extraída de una medición directa en el hormigón para calcular el factor tiempo-temperatura.

Tráfico: Todo tipo de Vehículos con sus respectivas cargas, los cuales utilizan una determinada vía.

Lista de Abreviaturas

A/C	Razón agua cemento.
ACI	American Concrete Institute.
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
ASTM	American Society for Testing Materials (USA).
Den.	Densidad.
DM	Especificación de ubicación.
Ecu.	Ecuación.
F	Factor de distribución F de Fisher.
HF	Hormigón con resistencia a la flexotracción, denominación para pavimentos.
K	Coeficiente de permeabilidad (m/día).
LNV	Laboratorio Nacional de Vialidad.
LRV	Laboratorio Regional de Vialidad.
M	Madurez (°C-Hs).
MC	Manual de Carreteras.
MC-V N°	Manual de Carreteras Volumen N° 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 o 9, según corresponda.
MOP	Ministerio de Obras Públicas.
MR	Módulo de resilencia.
Msnm	metros sobre el nivel medio del mar.
Prom.	Promedio.
PSSS	Peso saturado superficialmente seco.
NCh	Normas Chilenas del Instituto Nacional de Normalización.
R	Resistencia (Mpa).
Resist.	Resistencia.
T1	Temporada 1 del contrato Reposición Ruta 60-CH, Juncal-Portillo.
T2	Temporada 2 del contrato Reposición Ruta 60-CH, Juncal-Portillo.
W	Humedad (%).

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Función de Madurez. 17
Figura 2.1 - Distribución según carpeta de rodadura. 23
Figura 2.2 - Tipos de pavimentos. 24
Figura 2.3 - Capas de un pavimento rígido. 25
Figura 2.4 - Componentes principales de un pavimento rígido. 29
Figura 2.5 - Efecto de la temperatura de fraguado en la resistencia del hormigón. 34
Figura 2.6 - Las cuatro fases en el fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland. 35
Figura 2.7 - Función método de madurez. 37
Figura 2.8 - Concepto de madurez. 38
Figura 2.9 - Unidades de ensaye de probetas de hormigón. 43
Figura 2.10 - Sensores de medición de madurez. 44
Figura 2.11 - Dispositivo de lectura de madurez Intellirock II. 44
Figura 2.12 - Curva de madurez según ASTM C1074. 46
Figura 2.13 - Esquema de una junta de contracción ejecutada por aserrado. 49
Figura 2.14 - Trazado Ruta 60-CH en la Región de Valparaíso. 51
Figura 2.15 - Tramo en estudio sector Juncal-Portillo. 52
Figura 2.16 - Relieve contrato Reposición Ruta 60-CH. 52
Figura 2.17 - Barras de traspaso de cargas pavimento de hormigón. 53
Figura 2.18 - Pavimento con mantas de aislación térmica. 54
Figura 2.19 - Relieve de la cuesta Juncalillo. 56
Figura 2.20 - Cuesta Juncalillo en estación de verano. 57
Figura 3.1 - Curva de calibración de madurez. 60
Figura 3.2 - Esquema de confección de una curva de calibración de madurez. 62
Figura 3.3 - Esquema de metodología de control de resistencia en pavimentos de hormigón mediante madurez. 64
Figura 4.1 - Gráfico de granulometría según banda de trabajo. 71
Figura 4.2 - Gráfico de granulometría segunda verificación de dosificación. 75
Figura 4.3 - Preparación de moldes vigas para la confección de muestras para la curva de madurez. 78
Figura 4.4 - Confección de probetas de viga para la curva de madurez. 79
Figura 4.5 - Activación de sensores de madurez en probeta modelo. 79
Figura 4.6 - Curva de calibración de madurez constructora T1. 81
Figura 4.7 - Curva de calibración de madurez LRV T1. 83
Figura 4.8 - Curva de calibración de madurez constructora T2. 84
Figura 4.9 - Curva de calibración de madurez LRV T2. 86
Figura 4.10 - Sensor de madurez incorporado en el pavimento. 87
Figura 4.11 - Lectura de sensor de madurez en terreno. 88
Figura 4.12 - Desarrollo de temperaturas Sensor A. 89
Figura 4.13 - Desarrollo de temperaturas Sensor B. 89

Figura 4.14 - Evolución de índice de madurez sensor Ay B. 90
Figura 4.15 - Progreso de renitencia en terreno de diferentes muestras. 94
Figura 4.16 - Muestra de sensor de madurez luego de lectura en terreno. 94
Figura 5.1 - Granulometría de dosificaciones analizadas. 95
Figura 5.2 - Preparación de muestras frescas en terreno 96
Figura 5.3 - Comparación de curva de madurez constructora vs LRV temporada 1. 98
Figura 5.4 - Comparación de curva de madurez constructora vs LRV temporada 2. 99
Figura 5.5 - Comparación por temporadas de las curvas de madurez constructora. 100
Figura 5.6 - Comparación por temporadas de las curvas de madurez LRV. 100
Figura 5.7 - Comparación general de las curvas de madurez estudiadas. 101
Figura 5.8 - Manta térmica en tramo de pavimento del proyecto en estudio. 102
Figura 5.9 - Cumplimiento de apertura a tránsito según metodología de madurez. 106
Figura 5.10 - Cumplimiento apertura al tránsito según metodología tradicional. 107
Figura 5.11 - Cumplimiento al tránsito según muestras totales de metodología tradicional. 108
Figura 5.12 - Modelo general de un proceso o sistema. 109
Figura 5.13 - Distribución del desarrollo de la madurez según el nivel de temperatura. 110
Figura 5.14 - Distribución del desarrollo de madurez según la temperatura en intervalos. 111
Figura 5.15 - Diagrama de cajas según distribución del desarrollo de madurez según el nivel de temperatura. 111
Figura 5.16 - Distribución del desarrollo de la madurez según el nivel de humedad. 112
Figura 5.17 - Distribución del desarrollo de madurez según la humedad en intervalos. 113
Figura 5.18 - Diagrama de cajas según distribución del desarrollo de madurez según el nivel de humedad. 113
Figura 5.19 - Control de calidad pavimentos en estudio. 117

Lista de Tablas

Tabla 2.1 - Características generales del proyecto en estudio. 55
Tabla 4.1 - Características de Material de dosificación. 67
Tabla 4.2 - Granulometría de materiales empleados en la dosificación. 68
Tabla 4.3 - Constantes físicas. 68
Tabla 4.4 - Razón agua/cemento según características de aire incorporado. 69
Tabla 4.5 - Parámetros de dosificación de diseño de mezcla de hormigón. 70
Tabla 4.6 - Mezcla de áridos final para mezcla de hormigón. 71
Tabla 4.7 - Granulometría primera visación de dosificación. 72
Tabla 4.8 - Constantes físicas primera visación de dosificación. 73
Tabla 4.9 - Mezcla de áridos para la primera verificación. 73
Tabla 4.10 - Dosificación final primera visación. 73
Tabla 4.11 - Granulometría segunda visación de dosificación. 74
Tabla 4.12 - Constantes físicas obtenidas para la segunda verificación. 74
Tabla 4.13 - Mezcla de áridos final para la segunda visación. 75
Tabla 4.14 - Dosificación final segunda verificación. 76
Tabla 4.15 - Muestras de hormigón de prueba confeccionadas a partir de la dosificación propuesta. 76
Tabla 4.16 - Resultados en probetas de curva de calibración de madurez. 80
Tabla 4.17 - Resultados ensaye probetas para curva de madurez constructora T1. 81
Tabla 4.18 - Resultado ensaye de probetas para curva de madurez LRV T1. 82
Tabla 4.19 - Resultados ensaye de probetas de curva de madurez constructora T2. 84
Tabla 4.20 - Resultados ensaye probetas de curva de madurez LRV T2. 85
Tabla 4.21 - Registro de índice de madurez tomado en terreno. 92
Tabla 4.22 - Resultados de resistencia en terreno de muestras en estudio. 93
Tabla 5.1 - Resistencias obtenidas según ± 10% curva de madurez LRV-T1. 97
Tabla 5.2 - Resistencias obtenidas según ± 10% curva de madurez LRV-T2. 99
Tabla 5.3 - Resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de madurez. 104
Tabla 5.4 - Variables estadísticas de los resultados obtenidos mediante la metodología de madurez. 105
Tabla 5.5 - Cumplimiento a la apertura a tránsito según días. 105
Tabla 5.6 - Cumplimiento apertura a tránsito metodología tradicional según días. 106
Tabla 5.7 - Cumplimiento apertura a tránsito de muestras totales según metodología tradicional en días. 107
Tabla 5.8 - Análisis de varianza en el desarrollo de madurez según los niveles de temperatura y humedad. 114
Tabla 5.9 - Control de calidad del hormigón de muestras de pavimento. 116

Resumen Memoria

El presente trabajo de título tiene por objetivo determinar si la implementación de la metodología de madurez es válida para el correcto control de resistencia en pavimentos de hormigón; de esta forma poder habilitar la apertura a tránsito en edades tempranas (3 a 5 días). Los métodos actuales de control de resistencia en pavimentos de hormigón no consideran las condiciones reales a las que son expuestos en terreno después de su elaboración, como consecuencia, las resistencias obtenidas en condiciones ideales en laboratorio no replican el desarrollo real de resistencia de los pavimentos en terreno. En Chile no existe norma o procedimiento que regularice la implementación de esta metodología en el control de resistencia en pavimentos de hormigón, como resultado, en este trabajo se realizó un seguimiento al contrato de Reposición Ruta 60-CH, ubicado en la Región de Valparaíso, para evaluar la implementación de la metodología propuesta y su desarrollo en terreno.

El estudio realizado se enfocó en tramos de pavimentos del contrato en estudio, en los cuales se determinó la resistencia en terreno, mediante la aplicación de la metodología de madurez; para efectuar el correcto control en terreno de la resistencia en pavimentos, se elaboró una curva de calibración de madurez según el sistema presentado en este trabajo. La curva de madurez obtenida permite realizar mediciones directas de resistencia en el hormigón. A partir de la curva de madurez desarrollada en este trabajo se analizaron las curvas obtenidas por la empresa constructora del proyecto, para así, determinar la validez de las curvas obtenidas.

Para evaluar esta metodología, los resultados de resistencias obtenidos mediante la aplicación del método de madurez, se analizaron con las resistencias obtenidas de las muestras en estudio según el método actual. Se determinó la edad de apertura a tránsito a partir de las resistencias obtenidas en terreno según el método de madurez. También se analizaron los factores más importantes presentes en el desarrollo de la madurez, para determinar en qué grado afectan la confiabilidad del control por madurez en la estimación de la resistencia de un pavimento.

Los resultados obtenidos, indican que la aplicación de la metodología de madurez en el control de resistencia en pavimentos de hormigón es altamente recomendable. Al evaluar las muestras en estudio el 88% de ellas cumple con la apertura a tránsito a edades tempranas (3 a 5 días). Al analizar estos resultados con el método actual de control de resistencia, sólo 26% de las muestras en estudio cumplió con los requerimientos de apertura a tránsito al séptimo día. Al comparar los factores involucrados en el desarrollo de la madurez, se determinó, que la temperatura y humedad, afectan considerablemente en la variabilidad del desarrollo de la madurez de las muestras estudiadas. Finalmente se establecieron parámetros generales, los cuales facilitarán la aplicación al momento de implementar el método de madurez, en cualquier proyecto de pavimentación en hormigón

Palabras Claves: Control de resistencia, pavimento de hormigón, índice de madurez, curva de calibración de madurez, apertura a tránsito, desarrollo de la madurez.

CAPÍTULO 1

Generalidades

1.1 Introducción

El desarrollo socio-económico que brinda la conectividad terrestre en un país es fundamental para la adecuada planificación de la distribución de los recursos, otorgar carreteras seguras y de calidad, beneficia la satisfacción de los habitantes y su calidad de vida. El desarrollo de proyectos de obras viales es importante dentro del estudio de la ingeniería civil, ya que es un apoyo del desarrollo integral del país, contribuyendo en el diseño, planificación y mantenimiento de los caminos y carreteras que permiten la conectividad terrestre.

Debido a la demanda de construcción de nuevos caminos y la reparación en rutas ya existentes que cumplen con su vida útil, es que actualmente existe la necesidad de optimizar los tiempos de trabajo en los proyectos de obras viales en general, es por esto, que el MOP está implementando nuevas metodologías que garanticen de manera apropiada, una correcta planificación de los proyectos de obras viales, logrando de esta forma, mejoras en los costos de construcción y reparación de rutas nacionales, como también, una planificación adecuada que permita disminuir los tiempos de realización de proyectos viales.

Los métodos actuales de control de resistencia en pavimentos de hormigón no permiten controlar y habilitar el tránsito a edades tempranas, esto se debe, que la práctica actual no replica las condiciones reales de los pavimentos en terreno. Los controles se realizan mediante condiciones ideales en laboratorio, por lo que las resistencias varían considerablemente, con el desarrollo real que presentan los pavimentos de hormigón confeccionados en la obra.

El contrato Reposición ruta 60-CH, sector Juncal – Portillo (Tramo 4, DM. 95.000,00 – DM. 104.980,49), ubicado en la Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso; es el primer contrato en la región en el cual se estipula en sus bases de contrato, que el control de resistencias de los pavimentos de hormigón sea a través del método de madurez, el cual deberá ser supervisado por la Dirección de Vialidad de la Región de Valparaíso.

Se desconoce si la utilización de esta metodología en el control de resistencias en pavimentos de hormigón es más efectiva que el control tradicional que se efectúa actualmente en los proyectos de obras viales. Se ignora por qué existiendo esta metodología hace varias décadas, no se utiliza actualmente en el control de resistencia en pavimentos de hormigón en Chile.

Actualmente no existe norma en Chile que regularice en la implementación de este método, debido a esto, no existe experiencia en este sistema, por lo que no se ha logrado determinar la correcta aplicación en terreno en los pocos proyectos que se ha requerido. Con el objetivo de determinar si la implementación de esta metodología en el control de resistencia en pavimentos de hormigón es un método efectivo, se realizará un seguimiento y evaluación general al contrato Reposición ruta 60-CH, sector Juncal – Portillo (Tramo 4, DM. 95.000,00 – DM. 104.980,49), ubicado en la Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso.

1.2 Planteamiento del Problema

Desde su hallazgo en el siglo XIX el hormigón se ha convertido en el material estructural más utilizado, esto se debe a que es un material de fácil fabricación, altamente resistente y durable; la evolución que ha tenido este material es el resultado de las investigaciones constantes llevadas a cabo en los planos químicos, físicos y mecánicos [Roy, 1982]. Algunas de las propiedades que hacen del hormigón un material único son su consistencia, docilidad, densidad, resistencia y dureza. El hormigón posee una gran variedad de usos, entre los cuales destaca su utilización en pavimentos de hormigón.

En Chile, los materiales que se usan principalmente para pavimentar son el hormigón y el asfalto; actualmente los pavimentos de hormigón corresponden a un 3% de la Red Vial Nacional de caminos pavimentados (Departamento de Gestión Vial, 2012). En estos últimos años el hormigón ha ganado terreno en comparación con el asfalto, debido que en su conjunto ofrece mayores ventajas en cuanto a su ciclo de vida, sustentabilidad y costos directos. Hoy en día los pavimentos de hormigón pueden competir en el precio directo inicial con otro tipo de pavimentos, tanto así que en ocasiones resultan más baratos, manteniendo las ventajas que ofrece el pavimentar con hormigón. Dentro de los beneficios que se destacan en los pavimentos de hormigón esta su ciclo de vida útil (duración), el mayor soporte a cargas pesadas y bajos costos de mantención [Pineda, 1987].

Una de las desventajas en los pavimentos de hormigón, es que necesitan de mayor tiempo para su utilización desde su confección hasta su puesta en servicio, esto se debe a que es necesario un correcto curado para que el pavimento alcance la resistencia requerida y así poder soportar las cargas de tránsito al cual será expuesto; debido a esto, es poco funcional trabajar con pavimentos de hormigón, sobre todo en obras de conservación y reparación. Es evidente que los procesos constructivos hoy en día exigen un menor tiempo, lo que conlleva a una rápida puesta en servicio de elementos de hormigón, es por esto que actualmente existe la necesidad de acelerar los procesos de construcción en obras viales, para así, habilitar el tránsito en un corto periodo de tiempo (3 a 5 días), de manera segura y confiable.

En la actualidad, los métodos existentes de control de resistencia en pavimentos de hormigón, no son tan confiables y en su mayoría, son métodos destructivos que no se pueden utilizar a edades tempranas. La práctica tradicional, utiliza métodos no destructivos en los cuales se toman muestras por un laboratorio especializado, el cual somete las muestras de hormigón a condiciones ideales con humedad al 100% y temperaturas que oscilan entre los 20 y 25 °C, luego estas muestras se ensayan entre los 7 y 14 días y si tienen el 75% de la resistencia requerida, el pavimento de hormigón es capaz de resistir la apertura del tránsito sin tener daños (Manual de Carreteras Vol. N° 5). El problema con esta metodología es que los valores obtenidos no son en su totalidad representativos, ya que las resistencias en terreno varían en comparación con las resistencias obtenidas en un laboratorio con condiciones ideales de curado, como resultado, las empresas constructoras de obras viales, en general no dan a tránsito los pavimentos de hormigón antes de los 14 días de curado.

Es necesario disponer de un método predictivo más eficiente y exacto que permita obtener resultados de acuerdo a las situaciones reales en las que se encuentran expuestos los pavimentos de hormigón, es decir, temperatura, cambios climáticos y ambientales, evolución del curado (endurecimiento) y cualquier otra condición a la que se encuentre expuesto el elemento. Es conocido que hay una relación directa entre la madurez que adquiere el hormigón y su resistencia [Carino, 1992], es por esto, que la metodología de madurez podría ser el procedimiento de control de resistencia a utilizar en los pavimentos de hormigón en Chile.

El método de madurez es una metodología que permite estimar la resistencia del hormigón basado en el historial de temperaturas de una muestra, la resistencia del hormigón aumenta con la hidratación, por lo tanto, la cantidad de cemento hidratado depende del tiempo de curado del hormigón (edad) y el desarrollo de las temperaturas (Figura 1.1). La madurez se puede expresar como un indicador del progreso de hidratación del hormigón considerando que la temperatura es un

factor crítico en el desarrollo de la resistencia, especialmente a edades tempranas. Este concepto permite correlacionar la madurez del hormigón con la resistencia, al considerar los efectos combinados de tiempo y temperatura que afectan al desarrollo de la resistencia en el hormigón, de tal manera, que es posible determinar la resistencia del hormigón a edades tempranas. Se afirma que muestras de una misma mezcla de hormigón tendrán iguales resistencias si es que tienen iguales valores de madurez, aunque el historial de temperaturas varíe en el transcurso del tiempo [Saúl, 1951; Nurse y McIntosh, 1949].

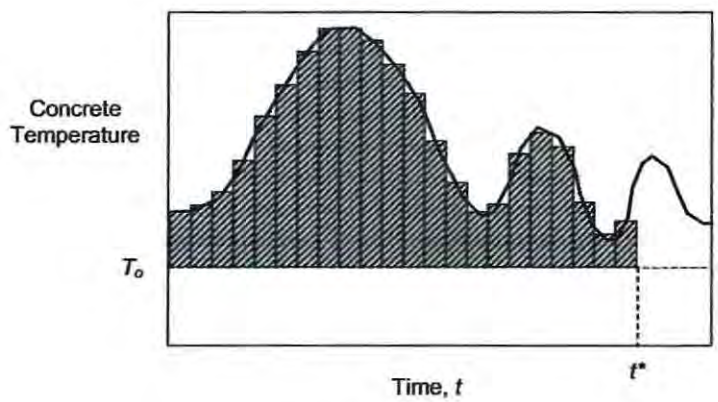

Figura 1.1 - Función de Madurez.

Fuente: "The maturity method: from theory to application", N.J. Carino and H.S. Lew Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8611 USA, 2001.

La principal ventaja de la metodología de madurez es que utiliza el perfil de temperatura real del pavimento de hormigón para estimar su resistencia in-situ, es por esto, que es un buen indicador para determinar el desarrollo de la resistencia en terreno desde que el pavimento de hormigón se encuentra en estado fresco, hasta que se endurece y alcanza su resistencia máxima. Otro de los factores importantes al utilizar esta metodología, es que la información de resistencia es suministrada en tiempo real, dado que las mediciones de madurez son realizadas en cualquier momento en la obra, como resultado, se puede optimizar el flujo de trabajo para obtener una apertura al tránsito en menor tiempo. La programación de las actividades de construcción se puede basar en una información de resistencia más precisa y confiable, en comparación con las prácticas de control de resistencia utilizadas actualmente.

La práctica tradicional de usar muestras curadas en condiciones ideales en laboratorios, para luego estimar la resistencia de un pavimento de hormigón, no replica el mismo perfil de temperatura del hormigón utilizado en la obra y no estima con precisión la resistencia del pavimento de hormigón. Con la metodología de madurez, se estima que sea posible controlar la resistencia en el pavimento de hormigón, de tal manera, que de una forma relativamente simple, efectiva y confiable, se pueda habilitar el tránsito en pocos días (3 a 5 días). Esto significaría a las empresas constructoras mejorar considerablemente los tiempos de entrega a tránsito de los pavimentos de hormigón, disminuyendo gastos generales y optimizando sus maquinarias, obteniendo así mejoras en la planificación y tiempos de puesta en servicio de la obra en general.

Actualmente el contrato de Reposición Ruta 60-CH sector Juncal – Portillo, ubicado en la provincia de Los Andes, Región de Valparaíso, es el primer contrato en la región donde se indica en sus bases, que el control de resistencias en los pavimentos de hormigón, debe ser por el método de madurez. Se trata de un mejoramiento integral de la Ruta 60-CH, donde se estipula la rehabilitación de los pavimentos existentes mediante reconstrucción en hormigón. Se desconoce la efectividad de la aplicación de esta metodología, debido que no existe conocimiento y experiencia en la utilización de este método para el control de resistencias de pavimentos de hormigón; a esto se suma el lugar geográfico y las condiciones climáticas y ambientales a las cuales estará expuesto este proyecto.

A pesar que la metodología de madurez ha sido utilizada con éxito en obras estructurales en Chile, no ha sido utilizada en pavimentos de hormigón; producto que las condiciones de trabajo, terreno y exigencias, son distintas a las obras de edificación. Debido que no existe el conocimiento o alguna norma que regularice la implementación de esta metodología en Chile, es importante realizar un seguimiento y evaluar si el control por madurez, es una metodología aplicable y efectiva para controlar las resistencias en los pavimentos de hormigón. Algunas de sus características como la medición en tiempo real, que es un método no destructivo y que permite verificar en obra que el hormigón utilizado es el correcto, hacen atractiva la implementación de esta metodología en obras viales. Teniendo en cuenta un proyecto de las características mencionadas (geografía, clima y temperatura), es necesario evaluar la implementación del control de resistencias a través de la metodología de madurez y compararlo con el método actual de control de resistencias en pavimentos de hormigón; así determinar si es representativo la obtención de resultados los cuales permitirían entregar de manera totalmente confiable y segura, tramos de pavimentos de hormigón a edades tempranas (3 a 5 días), de esta manera obtener una planificación adecuada de los tiempos generales de construcción, en proyectos viales de pavimentación en hormigón.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Realizar un seguimiento al control de resistencias en pavimentos de hormigón mediante la aplicación de la metodología de madurez, para validar y evaluar si es un método efectivo para controlar resistencias en pavimentos de hormigón.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer una metodología única de evaluación de resistencia a través del control por madurez en pavimentos de hormigón, usando como base el contrato de Reposición Ruta 60-CH sector Juncal – Portillo (Tramo 4, DM. 95.000,00 – DM. 104.980,49).

- Identificar factores que puedan alterar la confiabilidad del control de madurez, como método para determinar la resistencia en pavimentos de hormigón.

- Verificar los resultados obtenidos de ensayes de probetas frescas en los pavimentos constituidos del contrato Reposición Ruta 60-CH sector Juncal – Portillo, respecto a los valores entregados por la curva de madurez confeccionada (ASTM C-1074).

- Establecer factores a considerar, de manera de corregir las condiciones de terreno particulares de esta obra, para la correcta utilización de la curva de madurez como control de resistencia de pavimentos de hormigón.

- Determinar la edad de apertura al tránsito mediante la obtención de resultados según la aplicación del método de madurez en el control de resistencia.

1.4 Alcances

- El estudio se limita a pavimentos de hormigón donde se implementará el control de resistencia en pavimentos basado en la metodología de madurez. Se centrará en el contrato de Reposición Ruta 60-CH, sector Juncal – Portillo (Tramo 4, DM. 95.000,00 – DM. 104.980,49) de 9,98049 Km de longitud, ubicado en la Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso. El periodo de seguimiento y control a la obra, está sujeto al tiempo de ejecución del proyecto.

- La confección de los hormigones de la obra, serán hechos en plantas mezcladoras móviles de la misma empresa, las cuales estarán dispuestas en el mismo lugar de la obra.

- Las obras de reconstitución de los pavimentos de hormigón se ajustarán a lo estipulado en las especificaciones generales de construcción contenidas en el Volumen 5 del Manual de Carreteras y las especificaciones técnicas especiales del contrato Reposición ruta 60-CH, sector Juncal – Portillo.

- La curva de calibración de madurez utilizada en este trabajo para el control de resistencia en pavimento de hormigón, no puede ser aplicada a otro proyecto debido que la madurez y resistencia del hormigón estudiado, dependen solamente de las condiciones particulares de este proyecto. La metodología de madurez puede ser aplicada en forma generalizada, siempre y cuando, se determinen y evalúen tanto las propiedades del hormigón, como las condiciones particulares del proyecto.

- No existe regulación o norma en Chile para la implementación de esta metodología en el control de resistencia, por lo tanto se utilizará a modo de consulta la norma ASTM C-1074, para así establecer una metodología única para el control de resistencias en pavimentos de hormigón.

- No se cuenta en el proyecto con una estación meteorológica propia, por lo tanto los datos de temperatura, intensidad del viento y humedad, serán registradas de forma directa o de la estación meteorológica más cercana.

1.5 Metodología de Trabajo

1) Verificación de la dosificación propuesta por la empresa constructora, para esto se determinan las características físicas y mecánicas de los materiales empleados.

2) Se realizan los ensayes estipulados en el Manual de Carreteras Volumen 8, para la visación de dosificaciones de mezclas de hormigón.

   - Análisis de áridos.
   - Densidades de partículas sólidas.
   - Cubicidad de partículas.
   - Determinación de densidades y absorción.
   - Material fino menor que 0,008 mm

3) Determinación de dosis para probetas de hormigón fresco. Se ensayan a los 7 y 14 días, luego se proyectan a los 90 días para así visar la dosificación propuesta.

4) Con la primera amasada de hormigón en planta de la empresa constructora previo a la pavimentación, se confeccionan 19 probetas de hormigón (vigas) para la realización de la curva de madurez, insertando en una probeta modelo, un sensor que mide la madurez en el hormigón (ASTM C1074).

5) Se ensaya cada una de las probetas de hormigón de acuerdo a las edades estimativas para la correcta confección de la curva de madurez, se ensayan dos probetas en los días estipulados y se obtiene el promedio de las resistencias registradas (2, 3, 5, 7, 10, 14, 21 y 28 días).

6) Confección de la curva de madurez, con los datos obtenidos del ensaye de las probetas y la madurez registrada en la probeta modelo según los días estipulados.

7) Control de forma permanente a la obra de tal manera de verificar la adecuada colocación y determinación de valores en los sensores de madurez utilizados en terreno, este control se realiza cada vez que se concluyen tramos de pavimentos (control diario).

8) Verificación de los parámetros exigidos en el tópico 5.410 del Manual de Carreteras Volumen 5, para así realizar el correcto control a los pavimentos de hormigón en terreno.

   - Asentamiento de cono.
   - Porcentaje de aire incorporado.
   - Compactación del hormigón.
   - Textura superficial.

9) Confección de muestras frescas al momento de hormigonar tramos de pavimentos en terreno, así verificar posteriormente la resistencia con la curva de madurez obtenida.

10) Ensayes destructivos a las muestras tomadas para controlar resistencia según la metodología tradicional, para luego comparar los resultados de las mediciones en terreno de resistencia mediante la metodología de madurez.

11) Verificar la resistencia del hormigón de acuerdo a la curva de madurez utilizando correlaciones por hendimiento a flexotracción recomendadas en el manual de carreteras volumen 8.

12) Análisis de resultados y discrepancias existentes entre los valores obtenidos a través del control de resistencias por el método de madurez y el control tradicional de resistencias utilizado actualmente, para luego evaluar el uso de este método.

13) Identificación de los factores que influyen en el control de resistencias en pavimentos de hormigón mediante la aplicación de la metodología de madurez, para así, determinar cuáles de ellos es más susceptibles a cambios en el uso de este método en el control de resistencias.

14) Evaluación de la metodología de control de resistencia establecida en este trabajo, para luego, determinar su adecuada aplicación, así establecer parámetros para el proceso de control de resistencia en pavimentos de hormigón que mejoren la aplicación de esta metodología en obras viales.

15) Conclusiones y recomendaciones finales de acuerdo a la implementación de este método en el control de resistencias en pavimentos de hormigón.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1 Red Vial de Chile

Es fundamental para el desarrollo de un país contar con una buena red vial, el aporte a una mejor calidad de vida y al crecimiento económico del país, hacen que la inversión constante en materia de vialidad sea necesaria para un buen funcionamiento y progreso dentro de un país. La sociedad actualmente requiere vialidades de calidad que puedan garantizar seguridad, conformidad y que sean económicas, es por esto que se busca construir vías con un mayor estándar, donde se logre una mayor vida útil del pavimento, mayor resistencia y menor mantenimiento.

Hoy en día la red vial de Chile comprende con un total 77571,28 km, de los cuales 16278,03 km corresponden a pavimentos de asfalto y 1820,99 km corresponden a pavimentos de hormigón (Departamento de Gestión Vial, 2012). Estos datos hacen referencia al tipo de carpeta de rodadura presente en la longitud total de caminos de la red vial nacional como se muestran en la siguiente figura.

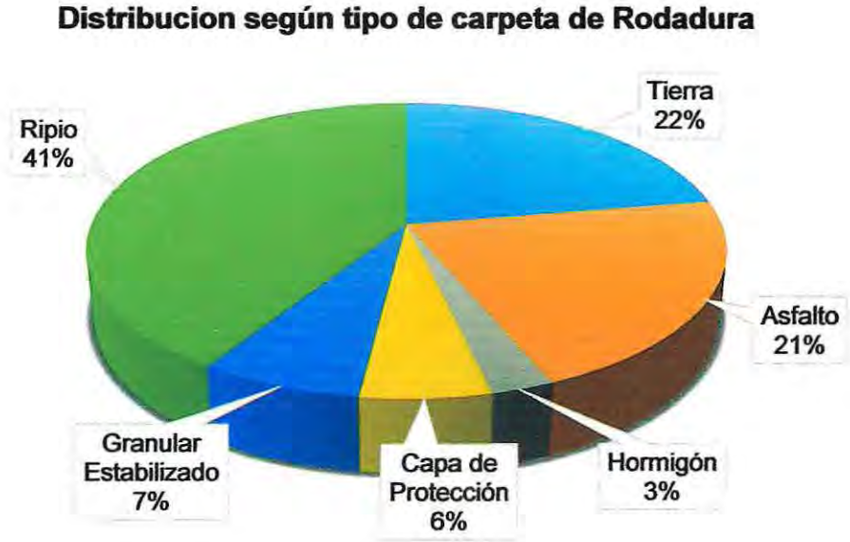

Figura 2.1 - Distribución según carpeta de rodadura.

Los pavimentos asfálticos han sido los más utilizados en el último tiempo en nuestro país, esto se debe a su rápida puesta en servicio y calidad; actualmente las investigaciones y nuevas tecnologías, han permitido a los pavimentos de hormigón competir en muchos aspectos con los pavimentos flexibles, como consecuencia, los pavimentos rígidos actualmente se consideran una buena alternativa de pavimentación debido a su gran desarrollo. Teniendo en cuenta los antecedentes anteriormente mencionados, todos los estudios orientados a esclarecer que tipo de pavimento tiene un mejor comportamiento en las rutas nacionales, son de gran aporte para optimizar los recursos invertidos en el desarrollo de la red vial de Chile.

2.2 Pavimentos Rígidos

2.2.1 Introducción a los Pavimentos Rígidos

Se llama pavimento al conjuntos de elementos (capas) estructurales que de forma directa reciben las cargas del tránsito y la distribuyen en todo su sistema de manera uniforme, es decir, son todas las capas que lo conforman [Haas, R., et ál., 1993]; de esta manera se proporciona una superficie de rodamiento adecuada, la cual debe funcionar eficientemente.

El principal objetivo del pavimento es brindar una superficie confortable, segura y resistente que pueda soportar el tránsito de todo tipo de vehículos para el cual fue diseñado. Para lograr el objetivo para el cual es proyectado un pavimento, este debe cumplir con algunas funciones básicas:

- Proteger a los estratos inferiores a la carpeta de rodadura de los factores climáticos (hielo, agua, erosión, heladas), para así asegurar un correcto tránsito del pavimento en cualquier momento.
- Resistir los esfuerzos de cargas estáticas o dinámicas que se producen por el tránsito de vehículos.
- Brindar seguridad y confort, como también reducir los costos de operación de los vehículos.

Los pavimentos se dividen en flexibles y rígidos, el comportamiento de cada uno de estos tipos de pavimento es muy distinto al aplicar una carga de tránsito como se muestra en la Figura 2.2. En un pavimento rígido, debido a la resistencia de la capa de rodado, se produce una buena distribución de los esfuerzos, dando como resultado tensiones muy bajas en las capas inferiores, por otro lado, en un pavimento flexible, la capa de rodadura tiene menor resistencia, hay una mayor deformación lo que produce mayores tensiones en la sub-rasante [Miranda, R., 2010].

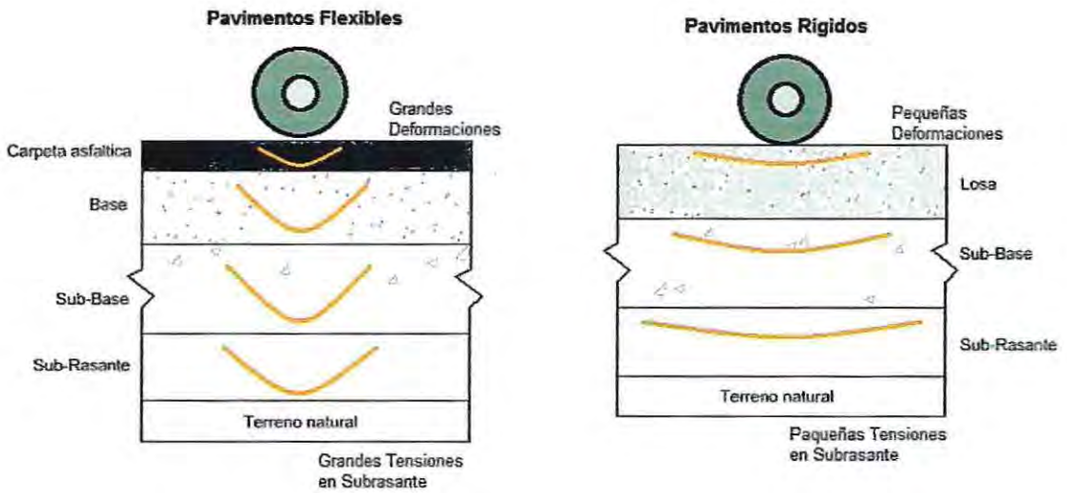

Figura 2.2 - Tipos de pavimentos.

Los pavimentos rígidos son mayormente conocidos como pavimentos de hormigón, el tiempo de utilización de estos pavimentos esta entre los 20 a 40 años, requieren de un mantenimiento casi mínimo y sólo debe efectuarse en la juntas de unión en las losas de hormigón.

2.2.2 Pavimentos Rígidos

Los pavimentos rígidos son los conformados por una losa de hormigón en la capa de rodadura, esta capa tiene una gran rigidez y su función es distribuir los esfuerzos producidos por el tránsito de manera uniforme en una mayor área y con presiones reducidas, para luego traspasar estos esfuerzos a las capas inferiores; el sistema completo trabaja en conjunto con la capa que recibe las cargas verticales (losa de hormigón). Dependiendo cómo es proyectado el pavimento y las solicitaciones a las cuales va estar expuesto, el pavimento se estructura por la capa de sub-base y sub-rasante; las dimensiones de cada capa son variables al igual que la losa de hormigón, aunque por normativa se exige la colocación de la capa de sub-base para evitar fallas generales de la losa (Figura 2.3).

Este tipo de pavimentos de hormigón posee una resistencia considerable a flexión, con presiones bajas, salvo en los bordes de la losa, como también en las juntas cuando no existen barras de traspaso de cargas, las deflexiones o deformaciones elásticas son casi inapreciables. No se permite que el pavimento deforme a las capas inferiores sin antes provocar una fractura de la losa de hormigón (falla estructural), esto es lo que influye en los sistemas de cálculos de pavimentos rígidos, sistemas que combinan el espesor y la resistencia del hormigón de las losas, para un tipo de carga y suelo dado [Miranda, R., 2010].

Figura 2.3 - Capas de un pavimento rígido.

Fuente: Instituto Mexicano del cemento y del concreto,
Gerencia Técnica IMCYC, 2009

Los esfuerzos producidos en la losa de hormigón por las cargas de solicitación transferidas por el tránsito vehicular, tiene directa incidencia en el comportamiento de la losa y el sistema completo; a continuación se detallan los tipos de esfuerzos presente en los pavimentos rígidos:

- Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos.
- Esfuerzos directos de compresión, causados por las cargas de las ruedas.
- Esfuerzos de compresión y tensión causados por la expansión y contracción del concreto.

- Esfuerzos de compresión y tensión que resultan de la deflexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.

- Esfuerzos de compresión y tensión debidos a la combadura del pavimento por efectos de los cambios de temperatura.

Debido a la relación directa que existe entre los esfuerzos anteriormente detallados y un pavimento rígido, es necesario considerar algunos factores básicos para que un pavimento rígido cumpla con la vida útil para el cual es diseñado, además sea óptimo y económico, estos factores son:

- Clima de la región.
- Resistencia y calidad del hormigón a emplear.
- Valor relativo de soporte y características de la sub rasante.
- Volumen, tipo y peso del tránsito a servir en la actualidad y en un futuro previsible (proyección del tránsito).

Se ha logrado determinar que los esfuerzos más relevantes en una losa de hormigón, son los de flexión. Mediante estudios teóricos y ensayos en losas de hormigón, se ha comprobado que el punto crítico de una losa de espesor uniforme, es el correspondiente a la esquina de la misma, es decir, el ángulo formado por un borde exterior y una junta transversal [Torres, R., 2007].

2.2.2.1 Ventajas de los Pavimentos Rígidos

Los propiedades que brinda un pavimento rígido son de gran consideración, sus características se deben evaluar al momento de proyectar una vía, así obtener el diseño adecuado para el tipo de tránsito y la demanda del camino.

Las principales ventajas de un pavimento rígido son:

- El hormigón reflecta la luz, lo que aumenta la visibilidad y puede disminuir los costos de iluminación en las calles hasta un 30%, en cantidad de luminarias y consumo de energía.

- El hormigón no se ahuella, por lo tanto no hay acumulación de agua y, por ende, tampoco se produce hidroplaneo. Por otra parte, se disminuye el efecto "spray", que es el agua que despide el vehículo que va adelante sobre el parabrisas del de atrás, impidiendo la visibilidad.

- Es fácil darles rugosidad a los pavimentos de hormigón durante su construcción, para generar una superficie que brinde mayor adherencia.

- La superficie de rodado es uno de los factores más importante para los usuarios, actualmente los pavimentos de hormigón brindan una superficie de gran calidad y seguridad.

- A diferencia del asfalto, el hormigón puede soportar cargas de tráfico pesadas sin que se produzca ahuellamiento, deformaciones o lavado de áridos.

- La superficie dura del hormigón hace más fácil el rodado de los neumáticos. Estudios han demostrado que aumenta la eficiencia de combustible de los vehículos.

- El hormigón se endurece a medida que pasa el tiempo. Después del primer mes, el hormigón continúa lentamente ganando resistencia.

- Las técnicas de restauración de pavimentos pueden extender su vida hasta tres veces la de diseño.

- Los pavimentos de hormigón tienen un menor costo a largo plazo debido a su mayor expectativa de vida con los mínimos requerimientos de mantención.

- La durabilidad del hormigón disminuye la necesidad de reparación y/o mantenciones anuales, en comparación con pavimentos asfálticos.

Alguna de sus desventajas son que tiene un costo inicial mucho más elevado que los pavimentos flexibles; también se debe tener cuidado en el diseño del pavimento, para que quede bien constituido y no falle producto de un mal diseño, lo que puede afectar los costos directos de la elaboración del pavimento de hormigón.

2.2.2.2 Tipos de Pavimento Rígido

Existe una variedad de pavimentos rígidos, estos se clasifican según los componentes del pavimento y los costos asociados a este; los pavimentos rígidos básicos existentes se clasifican como:

- Pavimento de hormigón simple.
- Pavimento de hormigón simple con barras de transferencia de cargas.
- Pavimento de hormigón reforzado.
- Pavimento de hormigón con refuerzo continuo.
- Pavimento de hormigón presforzado.

Es importante mencionar que en estos tipos de pavimentos rígidos, existen técnicas aplicadas donde se les otorgan soluciones idóneas, de esta manera se pueda lograr una óptima calidad de las obras. Esto es válido en obras nuevas, pero son de vital importancia en proyectos de reparación y rehabilitación.

Estas técnicas son las conocidas como fast track (hormigón para rápida habilitación al tránsito) y whitetopping, que consiste en la construcción de un pavimento de hormigón sobre un pavimento asfáltico existente.

El sistema whitetopping permite la recuperación de pavimentos flexibles mediante la construcción de losas de hormigón (mayores a 10 cm de espesor) sobre el pavimento flexible. El pavimento flexible se asume como un suelo con muy buena capacidad de soporte.

Como complemento a la técnica whitetopping, son los hormigones fast track o de habilitación temprana, que permiten una apertura al tránsito al poco tiempo de aplicada la capa de hormigón. De esta manera la interrupción de tráfico se reduce al mínimo, pudiendo incluso realizar la rehabilitación de alguna vía en pocos días [Dalimier, M., et ál., 1999].

Hay ocasiones en donde se debe usar hormigón con aire incorporado, se aplica donde sea necesario proporcionar resistencia al deterioro superficial debido al hielo-deshielo, a las sales o para mejorar la trabajabilidad de la mezcla de hormigón.

2.2.3 Elementos de un Pavimento Rígido

Los elementos estructurales que conforman un pavimento rígido son, sub-rasante, sub-base y la losa de hormigón (capa de rodadura), esto se aprecia de mejor manera en la Figura 2.4. El principal aporte de las capas granulares de un pavimento, es su capacidad estructural para resistir los esfuerzos, a continuación se describirá cada uno de los elementos que conforman un pavimento rígido.

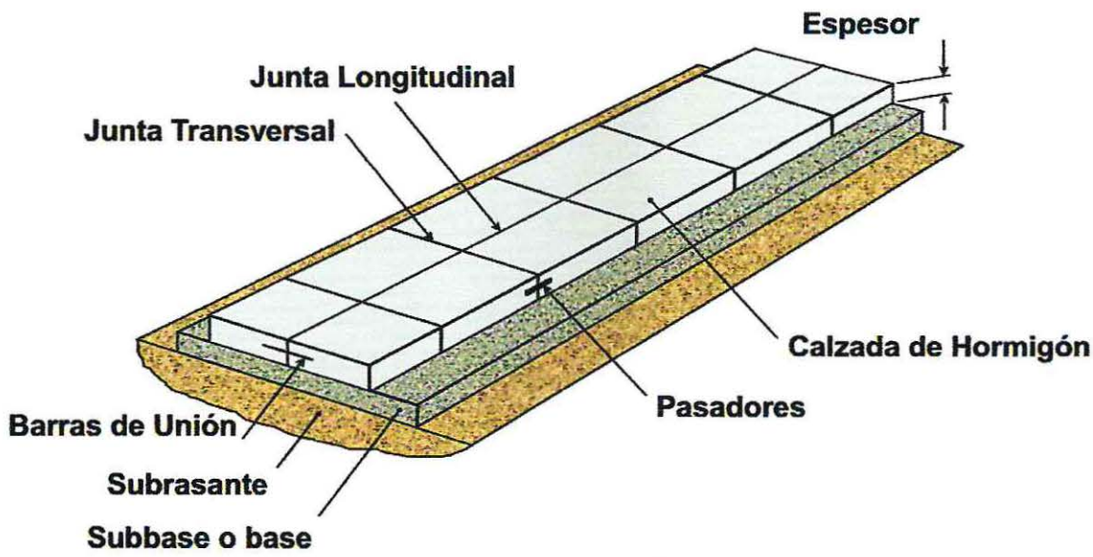

Figura 2.4 - Componentes principales de un pavimento rígido.

Fuente: "Jornadas de actualización técnica diseño y construcción de pavimentos de hormigón diseño de pavimentos rígidos", ICPA, Diego h. Calo, marzo del 2012.

2.2.3.1 Sub-rasante

Se conoce a esta capa como el soporte natural, previamente mejorado y compactado, en la cual se puede construir un pavimento. La función de la sub-rasante es brindar un apoyo uniforme, sin cambios en las características de soporte de las cargas. En general se debe tener cuidado con la expansión y contracción por humedad, ya que los materiales utilizados para constituir esta capa, son de menor calidad y no suelen cumplir con altas exigencias para ser utilizados.

Las principales funciones de esta capa son las siguientes:

- Proporcionar una superficie más uniforme a la losa de hormigón.
- Hacer mínimos los efectos de cambio de volumen en los suelos.

2.2.3.2 Sub-base

La capa de sub-base es el elemento estructural del pavimento rígido, que está bajo la losa de hormigón y sobre la sub-rasante. Consiste en una o varias capas de material granular o estabilizado, está puede contener materiales granulares como grava, arena, grava triturada, mezcla o estabilizaciones de suelos y agregados, o bien suelo–cemento, e inclusive productos bituminosos y agregados pétreos [Torres, R., 2007].

Las principales funciones que otorga esta capa al pavimento rígido se describen a continuación:

- Ayudar a controlar los cambios de volumen (hinchamiento y contracción), en suelos susceptibles a sufrir este tipo de cambios.
- Proporcionar una superficie uniforme para el soporte de las losas de hormigón.
- Aumentar la capacidad estructural del pavimento.
- Proporcionar uniformidad, estabilidad y soporte uniforme.
- Incrementar el módulo (K) de reacción de la sub-rasante.
- Proveer drenaje cuando sea necesario.

2.2.3.3 Losa de Hormigón

Es la capa superficial del pavimento rígido constituida por la mezcla de cemento, áridos y agua de amasado, también conocido como hormigón. Se denomina también como la capa de rodadura del pavimento rígido, tiene gran rigidez y alto módulo de elasticidad, lo que permite distribuir las cargas de mejor forma a las capas inferiores del pavimento. Esta capa es la más importante en un pavimento rígido y debe estar correctamente diseña y proyectada para que cumpla con su función; las principales funciones de la losa de hormigón se describen a continuación:

- Proteger la superficie sobre la cual está construido el pavimento, de los efectos destructivos del tránsito.
- Prevenir a la superficie de la penetración del agua.
- Otorgar un soporte elevado, para que resista bien las cargas concentradas que provienen del tránsito pesado, trabajando a flexión, y distribuyendo de buena manera al material existente debajo.

El espesor de diseño de la losa de hormigón es determinado en base a los siguientes parámetros de diseño:

- Resistencia a la flexión del hormigón.
- Resistencia de la sub-rasante, o combinación de la sub-rasante y la sub-base.
- Los pesos, frecuencia y tipo de carga de eje de vehículos, que el pavimento tiene que soportar.
- Período de diseño, usualmente tomado de 20 años, pero puede ser mayor o menor dependiendo de la proyección del pavimento.

2.2.3.4 Juntas

Las juntas en un pavimento rígido son proyectadas para poder mantener las tensiones en la losa, estas son provocadas por la contracción y expansión del pavimento dentro de los valores admisibles del hormigón; también se considera disipar las tensiones producidas bajo la losa de hormigón.

Las juntas son pequeños canales que están situados en las uniones de cada losa, la función principal es asegurar la correcta duración para la estructura de pavimento, deben ser rellenadas de manera apropiada para que cumplan su correcta función y no produzcan otro tipo de daños al pavimento. En consecuencia, la conservación y oportuna reparación de las fallas en las juntas son decisivas para la vida útil de un pavimento.

De acuerdo a su ubicación respecto de la dirección principal o eje del pavimento, se denominan como longitudinales y transversales. Según la función que cumplen se les denomina de contracción, articulación, construcción expansión y aislamiento. Según la forma, se les denomina, rectas y acanaladas [Morales, J., 2004].

2.2.4 Pavimentos Rígidos en el Manual de Carreteras

En el Manual de Carreteras se establecen las consideraciones generales para todo tipo de pavimentos rígidos, se describen las metodologías de ensaye y control de pavimentos de hormigón, así controlar la calidad de los pavimentos rígidos construidos en el país. La elección del tipo de hormigón adecuado para cualquier obra específica se realiza en base a las condiciones climáticas, ambientales, programa de trabajo y puesta en servicio; en el MC se dimensionan todos estos factores para la constitución de un adecuado pavimento de hormigón.

En el MC Volumen 5, correspondiente a las especificaciones técnicas generales de construcción, se describen en su totalidad los requerimientos generales para la constitución de un pavimento de hormigón. La sección 5.410 del MC-V5 corresponde a pavimentos de hormigón, está se refiere a la construcción de pavimentos rígidos de hormigón, sobre una superficie preparada, de acuerdo a los alineamientos, cotas, perfiles y espesores especificados en un proyecto. Se describe las consideraciones de los materiales utilizados en la constitución de una mezcla de hormigón de un pavimento rígido, también se establecen los procedimientos de trabajo a efectuar en un proyecto de pavimentación.

En el MC Volumen 8, correspondiente a las especificaciones y métodos de ensaye y control, se muestran los ensayes y el control necesario para una correcta caracterización de una mezcla de hormigón, junto a su respectiva dosificación. Los sistemas de control de calidad empleados en pavimentos de hormigón se describen en la sección 8.003 del MC-V8. En la sección 8.401 se regulan las especificaciones generales de hormigones, en la sección 8.402 del MC-V8 se describen los métodos de ensaye para caracterización de los componentes de un pavimento de hormigón.

Dentro de las consideraciones especiales para la correcta dosificación de una mezcla de hormigón, se deben considerar las especificaciones de la obra, así efectuar todos los ensayos estipulados y contemplados en el diseño del hormigón según el MC. Algunos de los ensayes efectuados en este trabajo se describen a continuación junto a su respectiva sección del MC.

Granulometría	8.202.3 MC-V8 (LNV 65)
Desgaste de los ángeles	8.202.11 MC-V8 (LNV 75)
Determinación de la materia orgánica	8.202.15 MC-V8 (LNV 66)
Determinación de sales solubles	8.202.18 MC-V8 (LNV 76)
Determinación de densidades y absorción	8.202. 20 MC-V8 (LNV 68) 8.202.21 MC-V8 (LNV 61)
Material fino menor que 0.008 mm	8.202.4 MC-V8 (LNV 70)
Cubicidad de Partículas	8.202.6 MC-V8 (LNV 3)
Módulo de finura	Nch 165
Índice de trituración	8.202.8 MC-V8 (LNV 7)
Análisis de agua a usar en obra	8.402.2 MC-V8 (LNV 101)
Resistencia a desintegración por método de sulfatos	8.202.17 MC-V8 (LNV 74)
Partículas blandas, desmenuzables	8.202.16 MC-V8 (LNV 73)

Con respecto a los ensayes requeridos para la correcta caracterización de los materiales utilizados en cualquier dosificación de hormigón, se debe efectuar varias mezclas de prueba para establecer la mejor proporción de dosificación. En el presente trabajo no se describe detalladamente ningún procedimiento de ensaye efectuado en la caracterización de la mezcla de hormigón en estudio, solamente se referencia el procedimiento según la sección del Manual de Carreteras correspondiente.

2.3 Método de Madurez

2.3.1 Introducción

El método de madurez es una técnica desarrollada en el año 1940, pero fue en el año 1950 donde se tuvo total claridad de esta metodología. A comienzos del año 1950 investigadores ingleses (McInstosh, Alimente, Saúl) sostuvieron que la temperatura jugaba un rol fundamental en el desarrollo de la resistencia del hormigón; se dedujo así, que la temperatura del hormigón estaba directamente relacionada con la cantidad de hidratos generados y estos, a su vez, con la resistencia del hormigón [Velásquez, J., et ál., 2012]. De esta manera surge el concepto de madurez que se fundamenta en el historial de temperaturas del hormigón.

La metodología de madurez relaciona de forma directa los efectos de la resistencia con la temperatura y edad del hormigón. Se establece que muestras de una misma mezcla de hormigón tendrán iguales resistencias si es que tiene iguales valores de madurez, aunque el historial de temperaturas varié en el transcurso del tiempo [Saúl, 1951; Nurse y McIntosh, 1949]. El concepto de madurez está determinado por la multiplicación de intervalos de tiempo y la temperatura interna desarrollada en el hormigón, esto se va sumando en el transcurso del tiempo lo que establece que la madurez es la suma de los intervalos de tiempo-temperatura.

Esta metodología ha sido utilizada durante décadas en obras de edificación, pero se desconoce si su aplicación en pavimentos de hormigón tenga el mismo resultado. Hoy en día la demanda de tiempo en obras viales, hacen que la puesta en servicio de este tipo de proyectos sea uno de los factores más importante a considerar; debido a esta necesidad actual de acelerar los procesos constructivos, es necesario tener un modelo predictivo que entregue la resistencia del hormigón a edades tempranas de manera totalmente confiable. Los métodos actuales utilizados en la predicción de resistencia en hormigones no son confiables, no se puede obtener lecturas a edades tempranas y lo más desfavorable es que son métodos que someten las muestras de hormigón a condiciones ideales. Las muestras se mantienen a temperaturas idóneas entre 20° y 25 °C, con una humedad del 100%, por lo que las resistencias obtenidas son diferentes a las resistencias reales de terreno; es por esto que se hace necesario tener una metodología no destructiva, práctica y eficiente en el control de resistencias en pavimentos de hormigón, este método es el de la madurez.

El concepto de madurez es un buen indicador para tener un buen control de resistencias en terreno, debido que es un método no destructivo de control de resistencia en pavimentos, se puede controlar el hormigón desde que se encuentra en estado fresco a pocas horas de colocado, hasta cuando éste se endurezca y alcance gran resistencia. Las consideraciones más básicas para poder realizar un efectivo control de las resistencias en terreno a un pavimento son:

- Establecer la relación madurez-resistencia para la dosificación a utilizar.
- Obtener los valores de madurez de acuerdo a los registros de tiempo-temperatura en terreno y en el lugar de la obra.
- Comparar lo valores de madurez obtenidos en terreno con los datos obtenidos en laboratorio de acuerdo a los historiales de tiempo-temperatura en cada caso, para determinar la resistencia del hormigón.

El incremento de la resistencia del hormigón depende de diversos factores que se deben considerar previo a un diseño de un pavimento, este incremento depende del tipo de ambiente dispuesto en la obra, la temperatura y humedad a la cual se encuentra expuesto el pavimento, determinan el desarrollo de la resistencia. Controlar este tipo de factores hace que un pavimento cumpla con los requerimientos especificados.

2.3.1.1 Conceptos Relacionados con la Madurez

Para entender más la metodología de madurez, en necesario familiarizarse con algunos conceptos que están directamente relacionados con este término. Algunos de estos conceptos fueron desarrollados a partir de esta metodología, lo que hace necesario profundizar en ellos para lograr describir de buena forma el concepto en el que se basa este trabajo.

Se habla de **madurez** refiriéndose a una extensión del desarrollo de una propiedad particular en una mezcla de hormigón, específicamente en el historial acumulado del tiempo y la temperatura. El factor tiempo-temperatura corresponde al área bajo la curva del registro de temperaturas de una mezcla de hormigón. La **función madurez** es la expresión matemática que relaciona el historial de tiempo-temperatura y el periodo de curado de una mezcla de hormigón, a partir de esto se puede determinar un índice que será un indicativo de la madurez de la muestra.

Cuando se habla de madurez se relaciona directamente a una **edad equivalente**, esta corresponde al periodo de tiempo requerido para alcanzar una madurez igual a otra madurez, obtenida de una muestra con un periodo de curado y registro de temperaturas diferente a la madurez especificada.

Como se ha mencionado anteriormente, la **temperatura del hormigón** es un factor importante en los diferentes estados del endurecimiento del hormigón, es fundamental en el proceso de hidratación, lo que determina el tipo de endurecimiento del pavimento de hormigón (Figura 2.5). Las variaciones de temperatura a veces no son las esperadas ya que no se pueden regular, estas dependen directamente de las características y condiciones de medio ambiente. Cuando hay condiciones climáticas extremas, el adecuado control de la temperatura del pavimento es primordial para que logre su adecuada resistencia y endurecimiento.

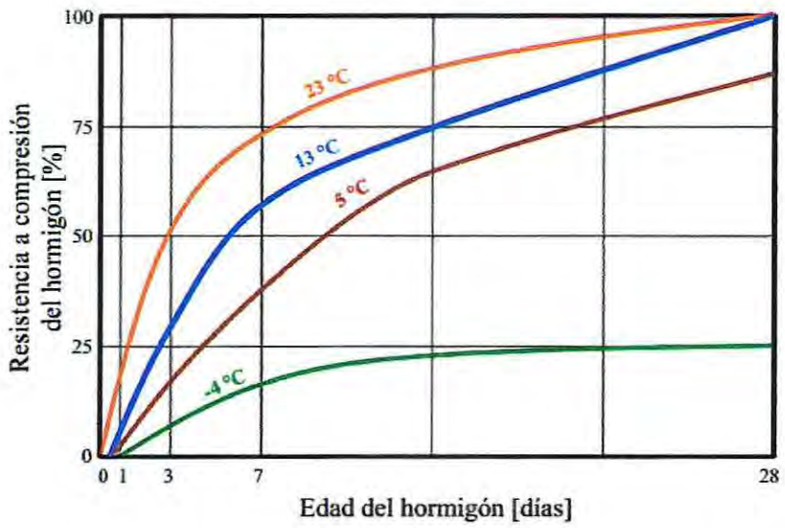

Figura 2.5 - Efecto de la temperatura de fraguado en la resistencia del hormigón.

Fuente: Curso para ARQ Clarín, diario de Arquitectura,
Módulo 2, Curado del Hormigón.

Unos de los procesos donde hay que tener mayor cuidado en el desarrollo del hormigón es el **fraguado**. Este consiste en una descripción de cambios que experimenta una mezcla de hormigón desde que es constituida, hasta que alcanza su resistencia máxima en un lugar determinado. Se distinguen tres etapas principales en el proceso de fraguado, y describen de buena forma la evolución del hormigón:

1) La primera etapa se origina antes de que la mezcla comience su etapa de fraguado, el hormigón es manejable, es blando y sobre todo es moldeable.

2) Cuando comienza el fraguado del hormigón, éste comienza adquirir rigidez y ya no es manejable para moldear, sin embargo la resistencia adquirida hasta este punto no es apropiada para que el hormigón realice su función por sí solo.

3) Finalmente el hormigón tiene resistencia considerable, adquiere resistencia mecánica que le brinda capacidad de soporte a esfuerzos y cargas.

Dentro del proceso de fraguado hay que tener especial cuidado con la **hidratación** del hormigón, esta es la interacción de todas las reacciones de los compuestos del hormigón. En el proceso de endurecimiento del hormigón se genera calor debido al proceso químico, los componentes reaccionan con el agua y forman una mezcla dura y estable. Este calor generado se denomina **calor de hidratación** y es variable dependiendo de las características de la mezcla; algunas de las variables que afectan el desarrollo de la hidratación son, temperatura inicial de la mezcla, temperatura del aire, volumen del hormigón, relación agua-cemento, aditivos y cantidad de cemento entre otros. En este proceso se distinguen cuatro fases como se aprecia en la Figura. 2.6, en la primera fase se distingue a los granos sin reaccionar al agua (a), luego en la fase (b) debido a la hidratación los granos en su superficie estos crecen hacia dentro y hacia fuera, después de horas las capas que recubren los granos interactúan entre si y forman una estructura continua (c), por último todas las reacciones se masifican y forman un compuesto conciso (d), la hidratación disminuye proporcionalmente.

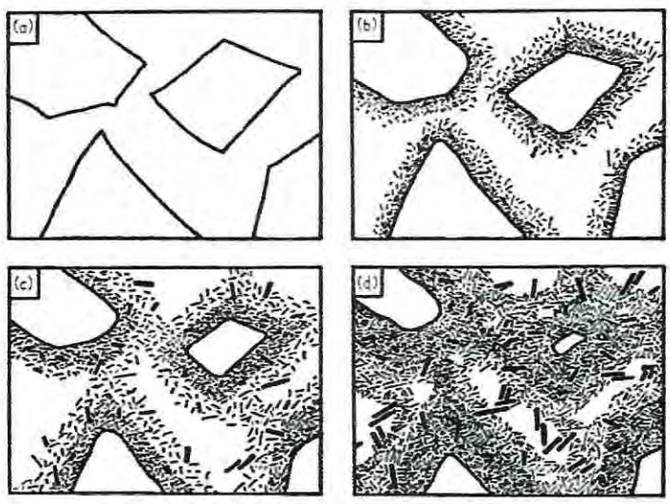

Figura 2.6 - Las cuatro fases en el fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland.

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

Todos los proyectos de pavimentación son distintos debido a la zona donde son construidos, el **gradiente de temperatura** está asociado a la diferencia de temperaturas en diferentes zonas de la losa de hormigón. Cuando se trabaja con grandes volúmenes de hormigón, los efectos del proceso de fraguado y de los factores asociados a este (viento, clima, temperatura, agua, entre otros), pueden provocar un diferencial de temperaturas considerable para causar un agrietamiento del hormigón, afectando sus propiedades y su durabilidad.

El estado plástico en que se encuentra el hormigón, desde la finalización de su mezclado hasta que se produce su endurecimiento, es decir, hasta que ha iniciado su proceso de fraguado, se denomina el **periodo reológico**, en este periodo se produce un acomodamiento de las partículas que lo constituyen, en ese medio semilíquido, en que se están gestando las reacciones químicas del proceso de hidratación. Un hormigón con la misma dosificación, con un periodo reológico más prolongado, tendrá mayor resistencia mecánica y en general mejores atributos de calidad [Carino y Voltz, 1991].

2.3.2 Concepto de Madurez

El método de madurez se basa en el historial de temperatura del hormigón para la estimación del desarrollo de resistencia, siempre y cuando exista humedad disponible para la hidratación del hormigón durante el tiempo de fraguado, utilizando ese historial de temperatura se calcula el índice de madurez [Aguilar, et ál., 2009]. En palabras más simples, la madurez es un parámetro de cómo ha progresado la hidratación de una mezcla de hormigón en particular.

La madurez proporciona un modelo relativamente simple y muy confiable para la estimación de la resistencia a edades tempranas, y bajo condiciones de temperatura variables. En cada mezcla de hormigón la relación de resistencia y el índice de madurez son único, esta relación se debe establecer previo a todo cálculo posterior.

El método de madurez, se basa, en que la resistencia de un hormigón, con una dosificación determinada, está en función de su temperatura y del tiempo en el que se encuentra a dicha temperatura [Stanley, et ál., 2003]. Si se posee un sensor que permita registrar la evolución de la temperatura en una mezcla de hormigón (historial de temperatura), con este registro se obtiene una curva de temperatura versus tiempo como se muestra en la Figura 2.7.

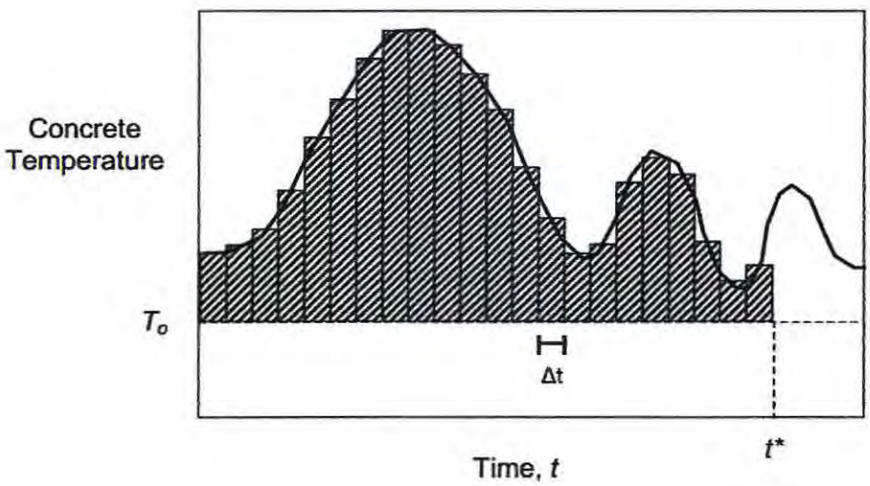

Figura 2.7 - Función método de madurez.

Fuente: "The maturity method: from theory to application", N.J. Carino and H.S. Lew Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8611 USA, 2001.

Al comienzo se aprecia que la temperatura aumenta progresivamente debido al calor generado por el proceso de hidratación del hormigón, después el progreso de las temperaturas depende de otros factores como el viento, clima, temperatura ambiental entre otras. La resistencia de la mezcla aumenta en mayor magnitud a edad temprana en temperaturas altas, por el contrario, a temperaturas bajas la progresión de la resistencia es más lenta y de menor orden. Existe un límite en el cual el proceso de hidratación del hormigón y la ganancia de resistencia cesa, esto se produce en temperaturas muy bajas del orden de -12 °C a -10 °C, el punto exacto de congelamiento de la hidratación y aumento de resistencia depende de los componentes de la mezcla en particular.

Como anteriormente se mencionó, el concepto de madurez se basa en una regla básica enunciada por Saúl en 1951, esta establece que muestras de una misma mezcla de hormigón tendrán iguales resistencias si es que tiene iguales valores de madurez, aunque cada una de estas muestras hayan sido expuestas a diferentes condiciones de curado, en consecuencia el historial de temperaturas es distintos en cada una de ellas. En la Figura 2.8 se representa de mejor manera este concepto, se muestran dos mezclas con diferentes condiciones de curado, la primera se encuentra expuesta a temperaturas bajas, por lo que toma más tiempo en alcanzar una madurez M1; la segunda se encuentra a una temperatura ambiental más elevada, como resultado, en un menor tiempo alcanza una madurez M2. Si tanto M1 como M2 tienen el mismo nivel de madurez (M), entonces estas dos mezclas de hormigón con distinto historial de temperaturas tendrán la misma resistencia.

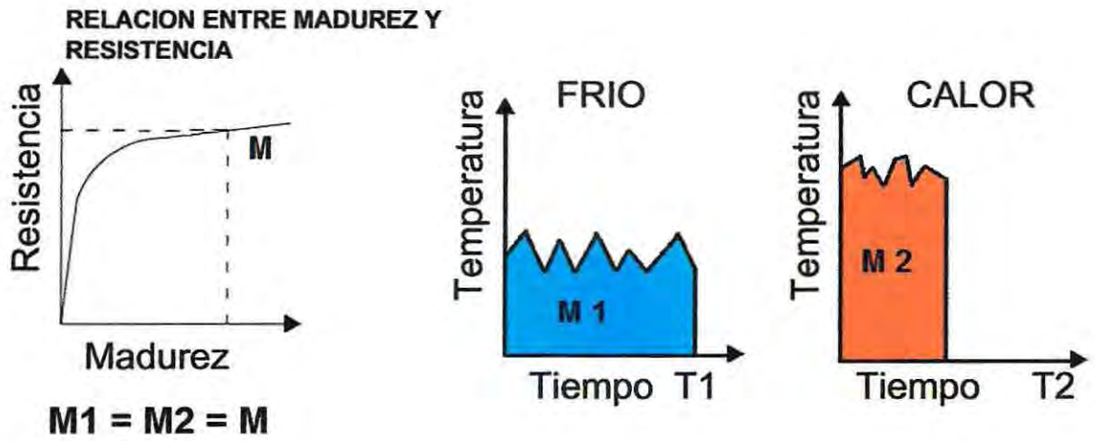

Figura 2.8 - Concepto de madurez.

El concepto de madurez del hormigón es bien amplio y no se limita específicamente a la evolución de la resistencia, existen varias propiedades del hormigón que se pueden desarrollar y analizar a través del tiempo, pero en este trabajo en particular se centra en el desarrollo de la resistencia mecánica que adquiere el hormigón en un tiempo determinado.

2.3.3 Ecuaciones de Madurez

La metodología de madurez desarrolla los efectos del tiempo y la temperatura en el aumento de la resistencia del hormigón, estos términos son variables directas en la función de madurez, que será la indicada de establecer cómo progresa la resistencia en una muestra determinada de hormigón. Durante décadas han existido diversas investigaciones donde se habla de madurez del hormigón, sin embargo las funciones más utilizadas y en las cuales se basa este trabajo, son la función de Nurse-Saúl que se basa en el factor de tiempo-temperatura y la función de Arrhenius que está asociada a la edad equivalente.

2.3.3.1 Teoría de Nurse-Saúl

Este fundamento se desarrolla en 1949, donde R.W. Nurse crea un método para estimar la resistencia del hormigón basado en una ecuación lineal que integra la velocidad de hidratación del hormigón con la temperatura de este. Posteriormente en el año 1951, Saúl emprende sus investigaciones donde vincula la función de madurez de Nurse a la resistencia a la compresión del hormigón, Saúl denominó a esto la ley de ganancia de resistencia con madurez, y básicamente enunciaba como anteriormente se explicó que, "El hormigón 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" [Saúl, 1951].

Esta teoría asume el producto acumulado del tiempo y la temperatura en una mezcla, y es resultado de las ideas planteadas por los autores anteriormente mencionados. A continuación se presenta la función de Nurse-Saúl (Ecu. 2.1) la cual es una de las teorías más utilizadas actualmente.

$$M = \sum(T - T_0)\,\Delta t \qquad \text{Ecu. 2.1}$$

Donde:

M (t) = Índice de madurez, factor tiempo-temperatura a una edad t, °C-días o °C-horas.

T = Temperatura promedio del hormigón expresada en °C, durante el intervalo de tiempo Δt.

T_0 = Temperatura dato, °C.

Δt = Intervalo de tiempo (días u horas).

El índice M calculado en la ecuación 2.1 es denominado como madurez; actualmente se le llama factor tiempo- temperatura según la terminología presentada en ASTM C 1074. La temperatura dato o datúm de temperatura como es llamado, es un dato correspondiente a la temperatura en que el hormigón deja de ganar resistencia y el proceso de hidratación cesa (T_0). Para el valor de T_0 existen varios valores; Saul y Bergtrom usaron en sus investigaciones un T_0 igual a -10 °C, años después Plowman determinó que esta temperatura de referencia era de -11.7 °C. Sin embargo debido a esta diferencia se ha optado por un valor base de T_0 igual a -10 °C, este valor es el utilizado actualmente para el valor de referencia de datúm de temperatura. Sea el valor de temperatura dato que se use, el factor tiempo- temperatura y la madurez de la mezcla de hormigón debe utilizar el mismo valor [Velásquez, 2012].

La ecuación de madurez planteada por Nurse-Saúl (Ecu. 2.1) se fundamenta en que el desarrollo de la resistencia del hormigón es una función lineal, a partir de esto se calcula el factor tiempo-temperatura. Malhora en 1971 y tiempo después Carino en 1991, plateaban que la aproximación lineal de la ecuación de Nurse-Saúl no era válida para la variación de curado en un amplio margen de temperaturas; como consecuencia, se propuso una variación de la fórmula de Nurse-Saul la cual no tuvo la aceptación esperada. Hoy en día se sigue utilizando la teoría de Nurse-Saúl para el cálculo de la madurez en el hormigón.

Para realizar un correcto cálculo de la temperatura dato, se debe conocer la temperatura de los materiales que componen al hormigón y las condiciones específicas de cada uno de ellos. Hay que tener cuidado cuando se quiere estimar la madurez en lugares donde las condiciones climáticas son muy extremas, la temperatura dato puede variar y afectar los valores obtenidos. Algunos de los factores de los cuales depende la temperatura dato son:

- Calidad y tipo de cemento, y los componentes del hormigón.
- La correcta unión y mezcla del hormigón.
- Alteración del proceso de hidratación en el hormigón debido a la incorporación de aditivos (líquidos o en polvo).
- Variación de temperaturas extremas en el proceso de curado del hormigón (endurecimiento).

La teoría de Nurse-Saúl es ampliamente usada en la actualidad, sin embargo, es una teoría muy simple y desconoce que la madurez en el hormigón aumenta descontroladamente a temperaturas elevadas. Esto hace que la ecuación planteada sea en cierta manera inexacta para los casos en que la temperatura es extrema, como también cuando se presentan grandes variaciones en la temperatura. Para los casos en que la temperatura es alta se subestima la resistencia del hormigón, al contrario, para temperaturas muy bajas las resistencias son más altas de las esperadas [Aguilar, 2009].

2.3.3.2 Teoría de Arrhenius

Freiesleben Hansen y Pedersen en el año 1977, propusieron una nueva teoría para calcular la madurez de una mezcla de hormigón, la cual toma como principal parámetro el historial de temperaturas de una muestra. Esta función está basada en la ecuación de Arrhenius, la cual se utiliza para describir el efecto de la temperatura en el índice de una reacción química del hormigón [Brown y LeMay, 1988].

Este concepto considera las limitaciones de la teoría de Nurse-Saúl, se toma en cuenta la hidratación del hormigón y como afecta su comportamiento las grandes variaciones de temperatura que puede presentar una mezcla. La teoría de Arrhenius estima la madurez en términos de una edad equivalente, esta permite expresar la ganancia de resistencia en el hormigón en función del tiempo y la temperatura. Se entiende por edad equivalente al periodo de curado a una temperatura de referencia, que produce una relación de aumento de resistencia, bajo las condiciones de curado reales que producen una misma madurez; la edad equivalente muestra el grado de endurecimiento y avance de las reacciones químicas en el hormigón.

Esta teoría permite el cálculo de la edad equivalente como se muestra en la siguiente ecuación:

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{\varepsilon}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_r}\right)} \Delta t \qquad \text{Ecu. 2.2}$$

Donde:

te = Edad equivalente a una temperatura especificada Ts (días, horas).

ε = Energía de activación, J/mol.

R = Constante universal de los gases, 8,314 J/mol-°K.

T = Temperatura promedio del hormigón °K, durante el intervalo de tiempo Δt.

Tr = Temperatura especificada, °K.

Δt = Intervalo de tiempo (días, horas).

La ecuación 2.2 se utiliza para calcular la edad equivalente del hormigón, en función de la resistencia adquirida a una temperatura determinada. Existen varios valores para la temperatura especificada (T_r), el valor más utilizado es de 20 °C, este valor se ha utilizado durante décadas en Norteamérica. Actualmente se ha establecido el valor de T_r en 23 °C. Sea el valor de la temperatura específica que se adopte, esta debe ser informada junto a la edad equivalente obtenida.

Alguno de los estudios comparativos que se realizaron demostraron que la función de madurez planteada en la teoría de Arrhenius, es superior a la de función de Nurse -Saúl [Byfors, 1980; Carino, 1982]. La incorporación de la ecuación 2.2 a esta metodología permite entender de mejor manera la relación de madurez-resistencia desarrollada con diversas temperaturas de curado inicial. Sin embargo uno de los factores donde este concepto decae, es que no puede determinar los efectos de la temperatura a edades tempranas con respecto a la resistencia final que adquiere una muestra de hormigón.

La dependencia de la temperatura es descrita por el valor de la energía de activación (ε), éste es el valor más dominante en la ecuación 2.2; se basa en la determinación del efecto de la temperatura de fraguado 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 a temperatura constante [Carino, 1984].

El procedimiento para determinar la energía de activación de una muestra de hormigón se obtiene en base lo estipulado en la norma ASTM C 1074-04, en el ítem "Determinación de la temperatura de Referencia o activación de la Energía"; esta norma se encuentra disponible en el Anexo A1.1 de este trabajo.

Para obtener el desarrollo de la función de madurez más apropiada para una muestra de hormigón, se debe poner énfasis en la variación de la tasa constante relacionada con la temperatura de curado. Como se señaló anteriormente la temperatura de curado está relacionada directamente con la ganancia de resistencia a una tasa constante, estos parámetros pueden ser calculados por medio de una ecuación indicada para el aumento del grado de hidratación versus la edad.

No se puede decir cuál de las teorías tiene mayor validez o se considera mejor, pues los dos fundamentos abarcan diferentes factores en la metodología de madurez del hormigón. El método de madurez se usa típicamente para monitorear el desarrollo de resistencia durante el progreso de un proyecto, por lo tanto, no es necesario modelar exactamente la ganancia de resistencia.

Es necesario señalar que el enfoque de la teoría de Nurse-Saúl es la más utilizada hoy en día debido a su simpleza, conociendo sus limitaciones, en países como Estados Unidos este concepto está ampliamente desarrollado. Por otro lado el fundamento planteado por la teoría de Arrhenius es mucho más exacto y es una mejor representación de la función de tiempo-temperatura de Nurse-Saúl. Ambos planteamientos se describen en detalle y forman parte de la norma ASTM C 1074-04 "Estimación de la Resistencia del Concreto por el Método de Madurez".

2.3.4 Equipo para medición de madurez en el hormigón

Un equipo de madurez debe ser capaz de registrar los parámetros más básicos para la medición de ésta en el hormigón, estos parámetros son el tiempo y la temperatura. Con el desarrollo tecnológico de las últimas décadas los dispositivos de madurez que existen actualmente son capaces de registrar y monitorear estos factores en el hormigón; el avance de los microprocesadores presentes en los sensores de madurez de pavimentos, es tal que pueden almacenar de forma automática la temperatura a intervalos de tiempos fijados por el usuario. También se puede variar o ajustar estos tiempos de medición reprogramando los sensores de madurez, cuando se requiere lecturas con intervalos de tiempo menores, como en las primeras horas colocada una mezcla de hormigón, donde el monitoreo es más sensible. Los datos registrados por estos equipos pueden ser monitoreados en tiempo real incluso de manera inalámbrica, como también pueden ser descargados a otros equipos de almacenamiento.

Existen dos tipos de equipos que pueden medir madurez en el hormigón. Los primeros equipos existentes en el mercado eran capaces de registrar los datos de madurez a nivel externo de la estructura analizada (fuera del hormigón), por el contrario los equipos actuales tienen la característica de registrar y almacenar datos de temperatura y/o madurez dentro del hormigón (cableado o inalámbrico), esto protege los datos y el equipo como tal de factores externos; la gran diferencia entre estas dos opciones en la discrepancia de los registros (localización de donde se registran los datos) y el método de almacenamiento que posee cada uno de ellos.

El equipo de medición de madurez utilizado en este trabajo combina en un solo paquete el sensor de temperatura y el equipo de registro de madurez. Se compone de un lector de madurez en el cual se pueden almacenar los registros de datos, también cuenta con sensores de medición de temperatura y madurez. En general las herramientas necesarias para efectuar una medición de madurez en el hormigón se compone de las siguientes partes:

Una unidad para medir la **resistencia a la compresión** del hormigón y **resistencia a la flexión** (Figura 2.9), de acuerdo al Manual de Carreteras Volumen N° 8, "Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control".

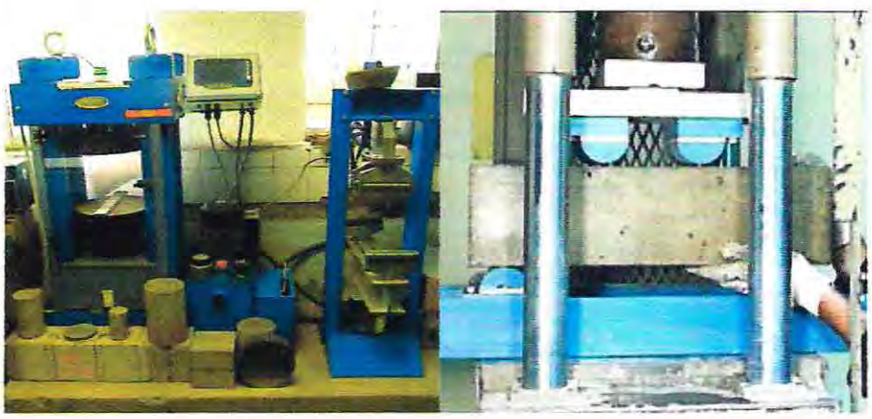

Figura 2.9 - Unidades de ensaye de probetas de hormigón.

Para poder aplicar de manera correcta el método de madurez se necesitan **sensores de temperatura** (Figura 2.10). En este trabajo los sensores fueron colocados internamente en el hormigón y son programables como el usuario requiera.

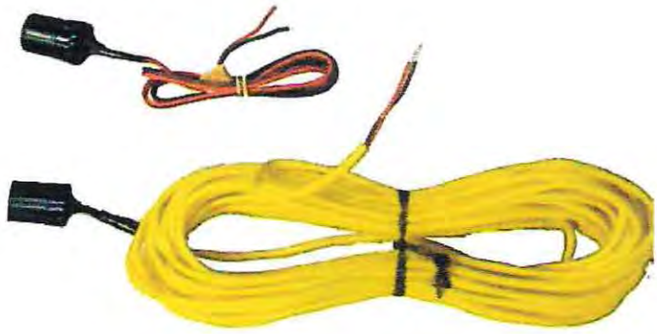

Figura 2.10 - Sensores de medición de madurez.

Fuente: www.engius.com

Por último se requiere de un **dispositivo de lectura y almacenamiento** de datos (Figura 2.11), en este trabajo se utilizó el equipo IntelliRock II, de la empresa Engius. Este equipo cumple las funciones de almacenamiento y lectura.

Figura 2.11 - Dispositivo de lectura de madurez Intellirock II.

Fuente: www.engius.com

Los sensores utilizados en este estudio son los denominados termistores, son capaces de registrar datos de temperatura con una precisión de ± 1 °C, como se indica en los requisitos de la norma ASTM C 1074-04. Los termistores empleados son resistencias sensibles a la temperatura, al medir la temperatura real del termistor, la medición del historial de temperatura se convierte en una resistencia equivalente, para esto se utiliza una curva de conversión resistencia-temperatura preestablecida.

Estos sensores son capaces también de procesar la información de tiempo-temperatura con el fin de calcular y almacenar la madurez de hormigón. La temperatura de funcionamiento está establecida entre los -20 °C a 99 °C, la precisión es de ± 1 °C y se pueden obtener lecturas a partir de intervalos mínimos de tiempo de 1 minuto.

2.3.4.1 Ubicación de Sensores

Sin importar el tipo de sensor de madurez que se utilice, lo más importante es que estos equipos sean colocados en las fracciones críticas dentro del pavimento de hormigón. La ubicación específica de los sensores en aplicaciones de madurez en pavimentos de hormigón, dependen de cómo se usarán los datos.

Como se mencionó anteriormente, no existe norma que aclare el procedimiento de colocación de sensores en pavimentos de hormigón. Se presentan a continuación algunas de las consideraciones para la ubicación general de estos sensores de madurez.

- Los sensores deben ser colocados por lo menos 0,6 m fuera de los bordes de la losa.
- Los sensores colocados en la mitad de la losa de hormigón, son útiles para determinar la resistencia promedio de la losa.
- En algunos casos cuando se requiera, los sensores deben ser colocados en intervalos entre 150 y 300 m a lo largo de la longitud del pavimento, para responder a las variaciones en tiempo de colocación de la mezcla de hormigón.
- Los sensores deben ser colocados en estacas o armaduras que están ancladas en la base del terreno, previo a las operaciones de pavimentación. Esto permite que la ubicación del sensor no cambie y arroje posteriormente datos erróneos.

Estos parámetros fueron establecidos en este estudio, en el próximo capítulo se describe de mejor forma la implementación de los sensores en pavimentos de hormigón.

2.4 Aplicación de la Metodología de Madurez a Pavimentos de Hormigón

2.4.1 Normativa para la Determinación de la Madurez

Como se describió en el ítem anterior, el método de madurez fue un modelo desarrollado a principios de 1950. Era una metodología en desarrollo y en los años siguientes se buscó la mejor forma, para utilizar de manera confiable esta nueva herramienta fuera de los laboratorios de los investigadores. El concepto no se utilizó mucho debido a que no se contaba con los equipos y no era un método de fácil manejo; fue a fines de la década de los 80 donde se realizaron los esfuerzos para estandarizar un procedimiento que permitiera establecer la relación de resistencia-madurez.

En 1987 se aprobó la norma ASTM C 1074, por primera vez la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales tomaba en cuenta la madurez para la determinación de resistencias en el hormigón. Esta norma considera la realización de una mezcla con características iguales a la que se usará en la obra, de tal manera, que se obtiene una curva de madurez que será utilizada para verificar resistencias en terreno y tiempo real. En líneas generales, con la dosificación del hormigón que se usará en la obra se confeccionan un total de 15 vigas de hormigón, luego se colocan sensores de temperaturas en las probetas para medir la madurez, se ensayan las vigas confeccionadas a diferentes edades (1, 3, 7, 14, y 28 días), se registra el valor de madurez obtenida de los sensores; es importante ensayar más de una viga en las edades establecidas para obtener valores más representativos. Al obtener los valores de resistencia con sus respectivos valores de madurez, se puede establecer la relación factor temperatura-tiempo, luego se confecciona la curva de madurez con los datos obtenidos (Figura 2.12).

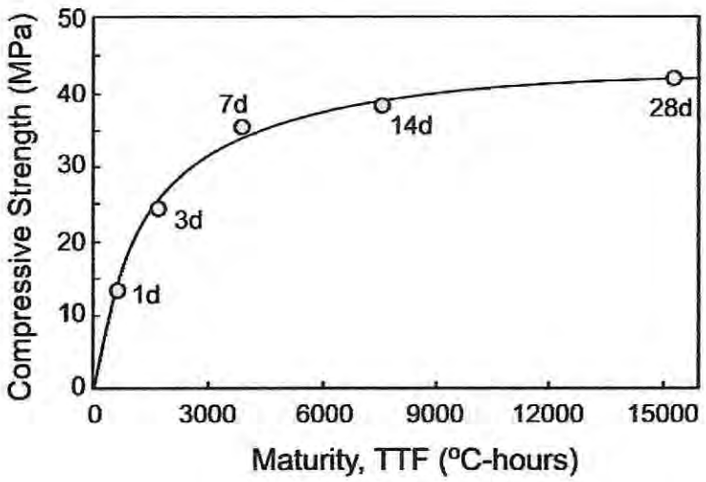

Figura 2.12 - Curva de madurez según ASTM C1074.

Fuente: "Maturity Testing for Concrete Pavement Applications", CPTP, noviembre 2005.

Si se conoce el valor de madurez en cualquier momento del desarrollo de una muestra de hormigón, se puede conocer el valor de su resistencia al verificar la curva de madurez obtenida con anterioridad. En esta norma también se incluye la teoría y el procedimiento para obtener el datum de temperatura (energía de activación); este valor es necesario según el método utilizado como se describió en el ítem 2.3. Si se quiere profundizar en la norma ASTM C 1074, está disponible en este trabajo una traducción de ella en el Anexo B.

El contenido básico presente en la norma ASTM C 1074 es:

- Funciones de madurez.
- Terminología.
- 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.

Se ha mencionado con anterioridad que en Chile no existe norma para el control de resistencia a edades tempranas con aplicación de la metodología de madurez. No se ha desarrollado ningún artículo en el Manual de Carreteras que estipule algún procedimiento o metodología de aplicación a este procedimiento; lo que estipula actualmente el Manual de Carreteras en el volumen N° 5, es la práctica tradicional de control de resistencia que se utiliza hace décadas, es por esto que en el presente estudio se tomará como referencia a modo de consulta la norma ASTM C 1074-04, que describe la "Práctica Estándar para Estimación de la Resistencia del Concreto por el Método de Madurez".

Hoy en día el modelo de madurez es más aceptado debido a su desarrollo, varias normas en el mundo utilizan el concepto de madurez dentro los métodos de prácticas y control en sus normas asociadas a procedimientos con hormigón. Algunas de las normas actuales que hacen referencia a la madurez son:

- ASTM C 1074: Práctica estándar para la estimación de la resistencia del hormigón por el método de madurez.

- ACI 214: Prácticas recomendadas para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto.

- ACI 228: Métodos para estimar la resistencia del concreto.

- ACI 308: Práctica estándar para el curado del concreto.

- ACI 318: Requisitos de Reglamento para concreto estructural.

- FHWA SA 97-105 (Administración Federal de carreteras): Guía para ensayos no destructivos del concreto.

2.4.2 Aplicaciones del Método de Madurez en Obras Viales

Debido al desarrollo que ha tenido el método de madurez en el hormigón, tanto en equipamiento como en su metodología de aplicación; es factible que este concepto pueda ser implementado como una herramienta efectiva en diversas áreas en proyectos de obras viales. Si bien algunas de estas áreas no cuentan con un desarrollo amplio, las investigaciones actuales quieren brindar a esta metodología la aceptación necesaria y confianza total en el área de proyectos viales.

Uno de los aspectos a tener en cuentas en esta materia, es que cada diseño de una mezcla de hormigón tiene una relación de madurez-resistencia única. Esto representa una limitación natural de este método, al considerar la confiabilidad de las estimaciones de resistencia a partir de la madurez; cualquier cambio o alteración de la mezcla en general (alteración de dosificación de la mezcla), afectarán directamente en la estimación de las resistencias logradas y los resultados finales. Esta sensibilidad a los cambios de una mezcla de hormigón en un proyecto, como también alteraciones en el procedimiento general, hace de este método algo susceptible y poco confiable debido a las pocas experiencias realizadas. Por ejemplo en Chile no existe procedimiento o norma que acredite esta metodología de control de resistencia, es por esto, que este trabajo se centra en la aplicación de la madurez en la apertura al tránsito a edades tempranas; así poder avalar este concepto en el área de obras viales.

Alguna de las aplicaciones y principales ventajas de la metodología de madurez en general se describen a continuación:

- Mejora las relaciones públicas, reduciendo el tiempo para la finalización del proyecto.
- Requiere un menor número de probetas (vigas o cilindros) para los ensayos en laboratorio, reduciendo así los costos de control de calidad.
- Los efectos del cambio climático sobre la resistencia del hormigón pueden ser monitoreados.
- Los moldes del encofrado en proyectos de puentes o edificios pueden retirarse más rápido, agilizando la construcción y disminuyendo costos.
- Los cables de postensado pueden ser tensados más pronto.
- Permite una programación de construcción acelerada. Se reduce de forma considerable las horas de trabajo.
- Puede supervisarse la resistencia in-situ en las ubicaciones críticas del hormigón a edad temprana.

Las aplicaciones de pruebas de madurez que más interesan en este estudio son las relacionadas a pavimentos de hormigón, éstas serán descritas con mayor detalle más adelante.

2.4.2.1 Aplicación de madurez en la apertura al tránsito

El uso de la metodología de madurez en el control de apertura a tránsito en pavimentos de hormigón, es uno de sus aplicaciones más llamativas en obras viales. Este trabajo de tesis se basa en el uso de este concepto, donde se busca validar su efectividad en el control de resistencias a temprana edad. Los beneficios de esta metodología es que se puede llegar a determinar la resistencia real a flexión en un pavimento de hormigón, las mediciones son hechas en tiempo real en las propiedades de la mezcla analizada dando a conocer de mejor manera, las condiciones de curado particulares de la muestra.

Los valores de resistencia a flexión proporcionan un aumento de la resistencia a la tracción en el fondo de la losa, donde las cargas de las ruedas inducen esfuerzos de tracción. Los métodos tradicionales de análisis de resistencia, no replican las condiciones de la mezcla de hormigón en terreno, por lo que las resistencias son variables y poco confiables.

La apertura a tránsito de manera óptima y a edades tempranas puede repercutir en ahorros considerables de tiempo y dinero, de tal manera que se asegura un trabajo aceptable y se aumenta la seguridad de la obra, esto se debe, que hay un tiempo menor de exposición a factores de peligro de la obra al tránsito existente.

En diversas investigaciones se determinó que el uso de las pruebas de madurez puede reducir los costos de construcción generales; se estima que el tiempo de construcción para proyectos de autopistas podría reducirse en más del 50% [Ansari, 1999]. También algunos autores destacan que el número de muestras de ensayo ocupados durante la construcción podría reducirse en aproximadamente un 75%, lo que se traduce en ahorro y reducción de costos para cualquier proyecto [Hunt, 1999].

2.4.2.2 Aplicación de madurez en juntas de pavimentos de hormigón

Otra de las aplicaciones donde se puede observar un buen uso de la metodología de madurez, es en la toma de decisiones técnicas para el corte de juntas de unión en pavimentos de hormigón (Figura 2.13). En la mayoría de los casos esta decisión se toma de forma empírica, lo que no garantiza un trabajo adecuado; al conocer la evolución de resistencia en base al factor de temperatura-tiempo que da el método de madurez, se puede estimar con precisión el tiempo de corte de las juntas, así de manera confiable se realiza un trabajo adecuado y con una planificación óptima.

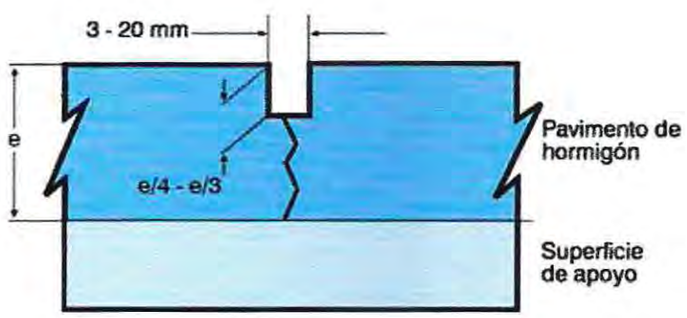

Figura 2.13 - Esquema de una junta de contracción ejecutada por aserrado.

Fuente: Diseño y ejecución de juntas en pavimentos y soleras de hormigón, IECA, Guías técnicas, enero de 2013.

Los cortes de juntas en un pavimento de hormigón son realizados para crear zonas de debilidad en la losa, de esta manera se reduce el agrietamiento general producto de los esfuerzos internos en la losa. Realizar los cortes en tiempos óptimos, asegura la vida útil del pavimento para el cual fue proyectado; actualmente los cortes se realizan después de horas de colocado el hormigón o cuando este se encuentra endurecido, se determina por experiencia del constructor y no en base a ensayos directos.

El tiempo de endurecimiento (fraguado) del hormigón es variable, depende de factores como, aditivos incorporados, tipo de cemento y condiciones ambientales; esto hace que una decisión de corte de juntas de forma empírica no sea adecuada. Al no existir procedimiento o norma que regule esto, el método de madurez permite determinar este tiempo con exactitud, monitoreando la evolución de resistencia a edades tempranas en el pavimento de hormigón.

2.4.2.3 Aplicación de madurez en control de calidad

Es importante señalar que el método de madurez puede ser utilizado como una herramienta de control de calidad en cualquier tipo de proyecto de obras viales. Si se realizan los procedimientos adecuados, se puede identificar cualquier desviación importante del diseño proyectado de la mezcla de hormigón, de tal manera que se pueden tomar decisiones correctivas de forma oportuna.

La madurez otorga una herramienta de control de calidad de forma directa y efectuada en el mismo lugar de la obra; con los métodos tradicionales es imposible realizar esto, ya que las condiciones utilizadas no permiten un control directo en la obra y no se realiza en edades tempranas. En base a la madurez, se puede analizar la sensibilidad de la mezcla observando los cambios de evolución de la resistencia; dicha sensibilidad, es la que debe ser monitoreada periódicamente para efectuar con efectivo control de calidad y asegurar un trabajo óptimo. En algunos proyectos, se ha concluido que las pruebas de la madurez reducen el tiempo de construcción y retrasos en el tráfico, como también mejora las relaciones públicas durante la construcción [Cable, 1998].

2.5 Características Generales Contrato Reposición Ruta 60-CH Sector Juncal-Portillo

2.5.1 Antecedentes

La Ruta 60-CH es una de las principales arterias de conexión para el corredor Bioceánico en el país, esta ruta tiene una longitud de 189 km la cual se divide en 3 secciones, se extiende desde su kilómetro 0 en la salida del Puerto de Valparaíso en el Camino La Pólvora, hasta el límite con Argentina en el sector túnel Cristo Redentor. Esta vía conecta las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar, Villa Alemana, Quillota, La Calera, LLay LLay, Panquehue, San Felipe y Los Andes; es una de las rutas más transitadas en la Región de Valparaíso y actualmente se encuentra en una etapa de mejoramiento, esto forma parte de los compromisos binacionales suscritos entre Chile y Argentina para la mejora de la vialidad de ambos países.

Debido al tráfico significativo presente en la Ruta 60-CH, es que hace varios años se trabaja en un mejoramiento de toda esta ruta; el alto desgaste de los pavimentos en algunos sectores y la poca capacidad de la ruta para la demanda de tránsito existente, hicieron necesario rediseñar tramos críticos de la ruta y realizar un mejoramiento completo. Dentro de los sectores más importantes se encuentra la Cuesta Juncalillo, conocida también como Cuesta Caracoles, la que se caracteriza por poseer un total de 30 curvas de retorno y una longitud de 10 km, está ubicada en el sector de Juncal Portillo, a un costado del Río Juncalillo.

Este tramo de la ruta 60-CH presentaba un alto desgaste en el pavimento producto de la alta demanda de tránsito; se contaba con un pavimento flexible (asfalto) que debido al tráfico de vehículos de gran tonelaje (camiones), presentaba fracturas y desgaste del pavimento, pérdida de la rugosidad y malformaciones en la capa de rodadura (ahuellamiento); por otro lado, se decidió rediseñar algunas de sus curvas por completo para recuperar su estándar de diseño inicial y tener mejores condiciones de seguridad. El proyecto de rehabilitación del tramo Juncal-Portillo en la ruta 60-CH tiene por nombre "Reposición ruta 60-CH sector Juncal – Portillo (Tramo 4, DM. 95.000,00 – DM. 104.980,49)", en la Figura 2.14 se muestra el trazado de la Ruta 60-CH.

Figura 2.14 - Trazado Ruta 60-CH en la Región de Valparaíso.

Fuente: www.Turistel.cl

2.5.2 Ubicación

El Contrato de Reposición ruta 60-CH sector Juncal – Portillo tiene una longitud de 9,98049 km el cual se inicia en el sector 4 DM. 95.000,00 que corresponde al inicio de la Cuesta Juncalillo (Sector de juntas de retorno) y se extiende hasta el DM. 104.980,49 ubicado a escasos metros al poniente del paso inferior de ferrocarriles en Portillo (curva 29), a continuación en la Figura 2.15 se muestra detalladamente el lugar de ubicación.

Figura 2.15 - Tramo en estudio sector Juncal-Portillo.

Fuente: www.Turistel.cl

En el total de la longitud del tramo en estudio de 9,98049 km hay una gran variación de altitud. Al comienzo de la cuesta hay una altitud de 2208 m sobre el nivel medio del mar, en el tramo más alto, se registra una altitud de 2835 m sobre el nivel medio del mar. La variación total entre la cota más baja y la más alta del proyecto es de 627 m. El relieve del tramo en estudio se muestra en la Figura 2.16.

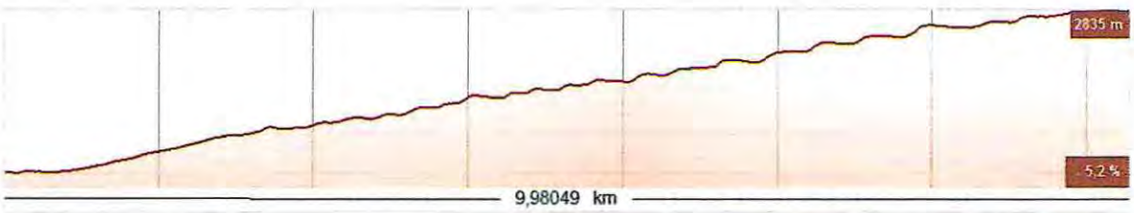

Figura 2.16 - Relieve contrato Reposición Ruta 60-CH.

Fuente: Google Earth

2.5.3 Descripción del Proyecto

El presente contrato de Reposición ruta 60-CH sector Juncal–Portillo se enmarca dentro de las políticas que la Dirección de Vialidad desarrolla en relación a la red vial del país, en particular, dentro de la Región de Valparaíso. Las principales obras realizadas en este proyecto, permiten recuperar el estándar de diseño inicial de la ruta (rehabilitación de la infraestructura).

A continuación se describen las principales obras a realizar en este proyecto de reposición:

- Rehabilitación de los pavimentos existentes mediante la reconstrucción en hormigón.
- Pavimentos de bermas con hormigón.
- Mejoramiento de la geometría de nueve curvas de retorno, imponiendo un radio mínimo de 18 m en una de ellas y de 20 m en las ocho restantes.
- Muros de contención para imponer la geometría deseada en sectores de mejoramiento.
- Colocación de defensas fluviales en rio Juncalillo frente a la curva N° 3.
- Mejoramiento del sistema de drenaje y saneamiento existente a través de la incorporación de fosos, contrafosos, cunetas revestidas, drenes longitudinales, ampliación y mejoramiento de obras de arte.
- Estabilización de muros de corte por medio de muros de retención.
- Reparación de los muros de retención existentes a lo largo de la cuesta.

Es importante señalar las especificaciones generales para el pavimento de hormigón con barras de traspaso de carga (Figura 2.17), ya que este trabajo está orientado a una nueva metodología de control de resistencia en los pavimentos de hormigón.

La construcción de las losas de Hormigón se regirá por lo señalado en la Sección 5.410 del MC Volumen 5; así como los áridos deberán cumplir con lo indicado en la Sección 8.201.1 del MC Volumen 8. El hormigón deberá ser confeccionado con cemento de alta resistencia y con una dosis de cemento mínimo de 300 kg/m^3, El tamaño máximo absoluto del árido grueso deberá ser de 40 mm. Se deberá usar en el hormigón un incorporador de aire (4% ± 0,5%), el cual deberá cumplir con los requisitos estipulados en ASTM C-260 y deberá ser previamente aprobado por la inspección fiscal.

Figura 2.17 - Barras de traspaso de cargas pavimento de hormigón.

Con respecto a los procedimientos de trabajo se efectuarán en conformidad con lo estipulado en los tópicos 5.410.3 y 5.501.311 del MC-V5. La resistencia característica a la flexotracción del hormigón será de 5,0 MPa a los 90 días, considerando una fracción defectuosa del 20%; no se podrá utilizar hormigón tipo Fast Track[1] y se deberá realizar control de uniformidad de acuerdo a lo indicado en la Norma NCh 1789 cada 2000 m^3 de hormigón producido.

El pavimento sólo podrá ser entregado a tránsito cuando la resistencia a tracción por flexión, medida por el método de madurez (ASTM C1074), sea igual o superior al 75% de la resistencia característica especificada (3.75 MPa). Se deberá colocar un sensor para medir madurez en el hormigón vaciado por el último camión de cada una de las jornadas de pavimentación; se verificará madurez cada 5.000 m^3 de hormigón producido.

Cuando fragüe la membrana de curado, el pavimento deberá ser cubierto por un periodo de al menos 7 días con un geotextil, agujerado o manta térmica (Figura 2.18), el cual deberá mantenerse permanentemente húmedo para evitar el fisuramiento por retracción[2].

En cada faena de hormigonado, se deberá realizar los controles de hormigón fresco indicados en 5.410.314 del MC-V5. Las muestras para los ensayes de tracción por flexión y tracción por hendimiento deberán ser gemelas y se ensayarán en las fechas especificadas (28 y 90 días).

Figura 2.18 - Pavimento con mantas de aislación térmica.

[1] Hormigón diseñado para la construcción de pavimentos que requieren una rápida puesta en servicio.
[2] Rápida desecación superficial en relación a la masa por la acción del sol, la humedad relativa, y especialmente del viento.

Todas las obras a ejecutar en este proyecto se ajustarán a lo estipulado en la especificaciones técnicas generales de construcción, contenidas en el Volumen 5 del Manual de Carreteras, en todos los aspectos pertinentes, salvo en aquellos que sean expresamente ampliados, modificados o completados por las Especificaciones Técnicas Especiales y otros antecedentes del proyecto.

Todo el seguimiento que se realizará al proyecto de Reposición ruta 60-CH sector Juncal – Portillo, se centrará en la reposición del pavimento y el procedimiento general de control de resistencia. En la Tabla 2.1 se describen los aspectos más importantes de este proyecto y en los cuales se centrará este trabajo de tesis.

Tabla 2.1 - Características generales del proyecto en estudio.

Nombre de Contrato	Reposición Ruta 60-CH, Sector Juncal – Portillo, Tramo 4, DM. 95.000,00 – DM. 104.980,49, Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso.
Descripción Contrato	Considera mejoramiento geométrico, rehabilitación de pavimentos mediante reconstrucción en hormigón y otras obras asociadas.
Ubicación	DM. 95.000 a DM. 104.980,49
Longitud	9,981 m
Inicio Contrato	17-12-2011
Termino de Contrato	05-04-2014
Centro de Gestión	Dirección de Vialidad
Nombre de Contratista	CONSTRUCTORA SALFA S.A.
Monto Estimado	$ 9.318.000.000 pesos
Presupuesto Oficial	$ 9.819.796.453 pesos
Pavimento de Hormigón	27.845 m^3

2.5.4 Trazado y Relieve

El tramo de estudio Sector Juncal-Portillo, se encuentra emplazado en un sector montañoso de la Cordillera de Los Andes. Corresponde a una cuesta en el Sector Juncal-Portillo, con una gran cantidad de quebradas en su recorrido, curvas bien pronunciadas y alta presencia de rocas, esto se debe, a que el terreno ha sido mayormente manipulado para la construcción de esta vía. La cuesta se sitúa a un costado del rio Juncalillo que pasa entre dos grandes montañas, las que dan el único paso posible por esta zona debido al relieve natural, esto se aprecia de mejor manera en la Figura 2.19.

El trazado comienza con dos curvas poco pronunciadas, las cuales están unidas por tramos rectos de gran amplitud, posteriormente 3 curvas sortean las irregularidades del terreno para subir en altura, para dar paso a una serie de curvas horizontales consecutivas bien pronunciadas (16 curvas de retorno), estas son bien cerradas y están unidas por tramos rectos cortos, las cuales hacen ganar la altura necesaria para sortear el relieve natural de la zona. La pendiente de la vía es moderada y no se presentan curvas verticales de gran magnitud en la cuesta.

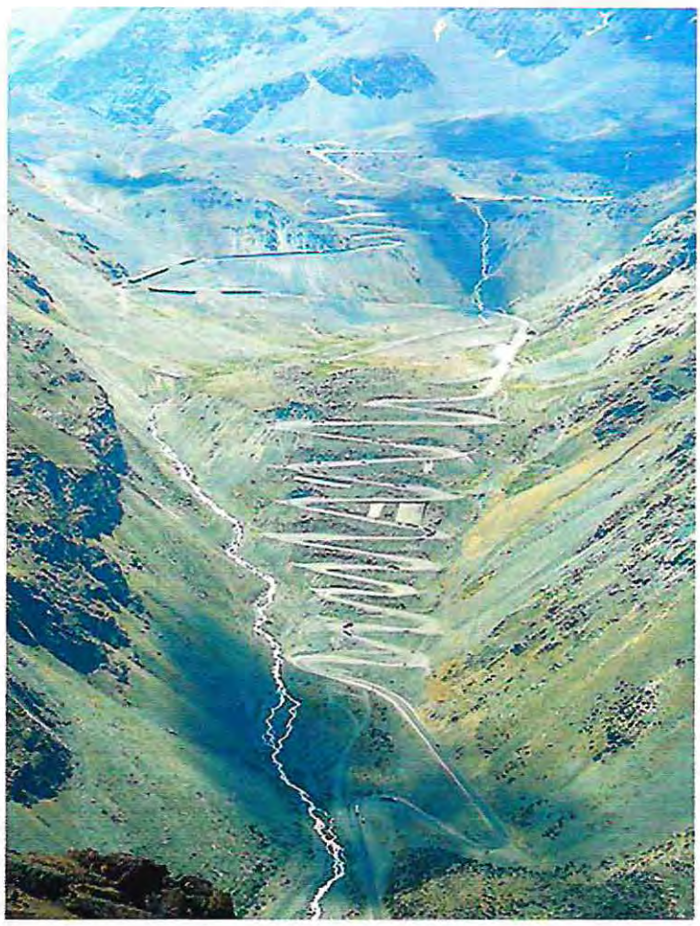

Figura 2.19 - Relieve de la cuesta Juncalillo.

2.5.5 Clima

Las condiciones climáticas y ambientales presentes en el lugar geográfico de realización del proyecto Reposición Ruta60-CH, son extremas durante el periodo de invierno. El clima predominante corresponde es el mediterráneo seco, donde las temperaturas presentes durante el año son semi-cálidas, exceptuando el periodo de invierno, donde las temperaturas caen considerablemente. Las lluvias presentes de la zona pueden llegar alcanzar los 350 mm anuales, y debido a la altitud de 2800 msnm, la acumulación de nieve en invierno es permanente.

Las temperaturas máximas y mínimas son bien marcadas en esta zona geográfica, en invierno se pueden alcanzar temperaturas bajo los -10 °C, y en verano la temperatura es más constante y se mantiene en el orden de los 22 °C. La intensidad del viento es bien alta y permanente, por lo que es un factor predominante en el lugar de realización del proyecto.

Como las condiciones climáticas son extremas en el periodo de invierno, la ejecución del proyecto en estudio se paraliza durante este periodo, esto se debe, que el hormigón a esas temperaturas es incapaz de desarrollar un incremento de la resistencia, y el proceso de fraguado del hormigón se congela.

En la Figura 2.20, se aprecia el lugar de realización del proyecto Reposición Ruta 60-CH en el periodo de invierno, donde es factible la ejecución del proyecto sin alteraciones por las características climáticas y ambientales.

Figura 2.20 - Cuesta Juncalillo en estación de verano.

CAPÍTULO 3

Metodología de Control de Resistencias en Pavimentos de Hormigón mediante el Método de Madurez

Como se ha mencionado anteriormente, el método de madurez es una herramienta relativamente simple, que permite estimar la resistencia del hormigón en terreno de forma efectiva. Esta alternativa es viable, siempre que los procedimientos de esta metodología sean bien ejecutados y no se altere el procedimiento establecido. Este concepto de control de resistencia es altamente beneficioso para los contratistas, al ser utilizado como complemento de los métodos tradicionales de ensaye, o también, si se opta por realizar un control de resistencias sólo por madurez.

En el desarrollo de este trabajo de tesis, se utilizó la norma ASTM C1074 como norma de referencia y consulta, sin embargo, de acuerdo al estudio realizado en este trabajo, se consideraron variaciones a los procedimientos establecidos en esta norma, determinando nuevos parámetros y consideraciones. Es importante establecer una correcta metodología de aplicación del método de madurez, ya que en Chile no existe norma o procedimiento alguno que establezca el correcto uso de esta metodología.

En este capítulo se describirá detalladamente el procedimiento y metodología de control de resistencia en pavimentos de hormigón a través de la aplicación de madurez, basado en el desarrollo de este estudio.

El proceso de control de resistencia por madurez consistente de forma general en dos pasos:

- Desarrollo de la curva de madurez para una mezcla determinada.
- Control de resistencia del pavimento de hormigón en terreno.

Al obtener esta información es factible que la resistencia de un pavimento de hormigón cualquiera pueda ser monitoreada, así observar la evolución del pavimento y optimizar el trabajo de la obra en general.

3.1 Determinación de la curva de calibración de madurez

A continuación se presentan las consideraciones generales previas al desarrollo de la curva de calibración de madurez.

La construcción de la curva de calibración de madurez para cualquier muestra de hormigón, debe ser efectuada con anticipación al inicio de la fase de pavimentación del proyecto, no es recomendable que la curva de madurez se confeccione paralelamente al inicio de la pavimentación, debido que cualquier error en la curva, postergará el adecuado control de resistencia en terreno.

Deben estar definida las propiedades de la muestra de hormigón a utilizar, se deberá usar los materiales específicos de la obra y se utilizará la dosificación presentada por el contratista. Al inicio del contrato y cada vez que se requiera un cambio de la dosificación del hormigón, el contratista y el organismo fiscalizador deberán determinar una nueva curva de madurez-resistencia. Esta curva puede ser confeccionada en base a ensayes de flexotracción o compresión del hormigón, según se requiera.

La calibración de cada diseño de mezcla de hormigón específica, se realizará en un laboratorio certificado por el MOP. Los materiales utilizados son los específicos de la mezcla establecida en el proyecto, cualquier cambio o alteración de los componentes de la mezcla (material de origen, dosificación, equipo de producción) deberá ser informada al organismo fiscalizador.

Se recomienda que la mezcla de hormigón utilizada para confeccionar la curva de calibración de madurez, sea producida de una sola amasada en lugar de la obra, manteniendo la dosificación establecida, todas las muestras de la curva deben ser curadas en iguales condiciones humedad y temperatura.

Tanto el contratista del proyecto como la entidad fiscalizadora (en este trabajo fue el LRV), deben confeccionar sus curvas de calibración de madurez de la misma amasada de hormigón, manteniendo las características de diseño de la mezcla de hormigón. Se recomienda el moldeado total de probetas de una sola vez y en el mismo lugar para ambas partes, así se disminuyen variaciones considerables de las curvas de calibración de madurez.

Para el registro de madurez en el hormigón se especifica un dispositivo para monitorear la temperatura interna del hormigón en función del tiempo. Los dispositivos aceptados pueden ser del tipo termocuplas o termistores conectados a dispositivos digitales, estos equipos deben medir la temperatura, para luego registrar y almacenar la información. El intervalo de tiempo registrado será ½ h o menos para las primeras 48 h y 1h o menos para después. El dispositivo que registre la temperatura debe tener una precisión de ±1°C.

A continuación se describe la metodología para el desarrollo de una curva de calibración de madurez para cualquier mezcla de pavimento de hormigón:

1) Establecer una planificación adecuada para la constitución de la curva de calibración de madurez, de acuerdo a las edades de ensaye mínimos (2, 3, 5, 7, 10, 14, 21 y 28 días), calendarizar de tal forma que no se produzcan variaciones en los días de ensaye de las probetas.

2) Moldear como mínimo 17 probetas prismáticas según la especificación (vigas o cilindros), utilizando la dosificación de hormigón previamente establecida, se debe ensayar obligatoriamente el contenido de aire incorporado y el asentamiento de la muestra previo a la constitución de las probetas; las probetas deben ser curadas según lo indicado en la especificación 8.402.9 del MC-V8. Se puede especificar un número mayor de probetas según el requerimiento del proyecto y las especificaciones generales de la propuesta.

3) Insertar sensor que registre madurez como mínimo en una de las probetas (se recomienda dos probetas), el sensor deberá estar ubicado en el centro de la muestra a ± 15 cm de profundidad. Conectar los sensores al equipo de medición de madurez, verificar que el sensor este activado de forma correcta y que este registrando datos. Las probetas con sensores incorporados no se ensayarán, estas serán utilizadas como referencia para obtener la madurez de las otras probetas en las edades determinadas; el conjunto de probetas deben estar juntas en el mismo lugar y sometidas a iguales condiciones de curado según 8.402.9 del MC-V8. En el caso que haya más de una probeta con sensor, la madurez final será el promedio de los datos obtenidos.

4) Ensayar las 16 vigas restantes a la flexotracción o compresión, según sea el caso, en las edades establecidas de 2, 3, 5, 7, 10, 14, 21 y 28 días. Ensayar 2 probetas para todas las edades establecidas y calcular la resistencia promedio. Si el rango de la resistencia promedio a compresión de las dos probetas excede 10%, se recomienda ensayar otra probeta y calcular el promedio de los tres ensayos.

5) Si se requiere obtener la curva de calibración de madurez hasta los 90 días, considerar el procedimiento anteriormente descrito, para obtener resultados en los 90 días.

6) En conjunto con el ensaye de las probetas en las edades establecidas (2, 3, 5, 7, 10, 14, 21 y 28 días), medir y registrar la madurez de la probeta de control cada vez que se realice un ensaye (mediciones simultáneas). Si se utiliza más de un dato de madurez, registre el promedio de los valores exhibidos.

7) Una vez finalizado el ensaye total de las probetas establecidas, desarrolle la curva de calibración de madurez, considerando las resistencias promedios a flexotracción obtenidas con el registro del índice de madurez; establezca la curva con mejor tendencia para el registro de datos obtenidos (Figura 3.1).

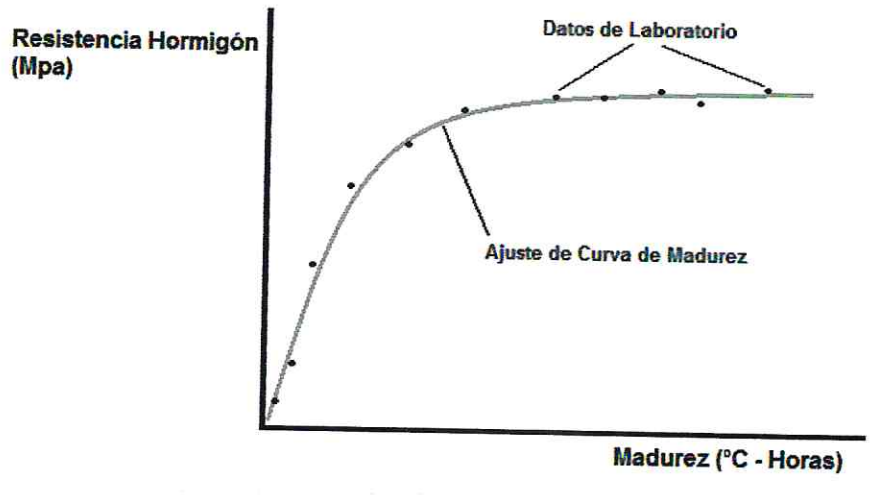

Figura 3.1 - Curva de calibración de madurez.

La curva obtenida es la relación de madurez-resistencia a ser utilizada para estimar la resistencia de la mezcla de hormigón en análisis, bajo distintas condiciones de curado y temperatura.

8) El contratista del proyecto deberá seguir la misma metodología para estimar su curva de calibración de madurez. La banda de trabajo tiene una tolerancia de ± 10% con respecto a la curva de madurez realizada por el organismo fiscalizador, en caso contrario, se rechazará la curva presentada y el contratista deberá efectuar una nueva curva de calibración de madurez.

El contratista deberá verificar la curva de madurez-resistencia de acuerdo a los siguientes criterios:

- En caso de superficies de pavimentos menores o iguales a 35.000 m^2, al menos una vez en el desarrollo del proyecto.
- En caso de superficies de pavimentos mayores a 35.000 m^2, al menos dos veces en el desarrollo del proyecto.

Nota 1: En este trabajo la curva de madurez presentada por el contratista fue verificada en conjunto con el LRV, donde se tomaron muestras propias para validar la curva.

Para que la metodología de desarrollo de la curva de calibración de madurez sea entendida de mejor forma y facilite el trabajo; en la Figura 3.2 se muestra un esquema que describe los pasos en el desarrollo de la curva de madurez descrito anteriormente.

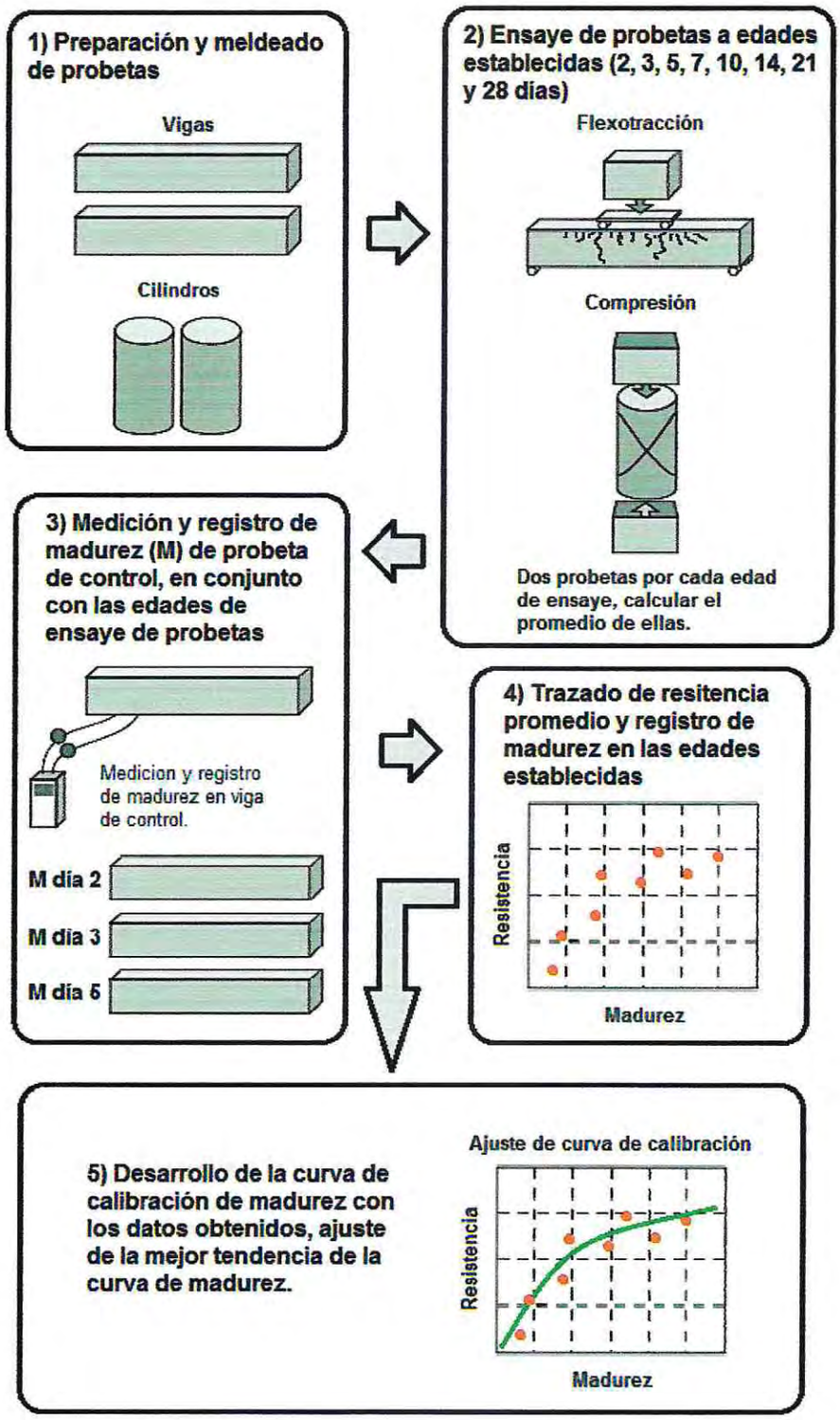

Figura 3.2 - Esquema de confección de una curva de calibración de madurez.

3.2 Control de resistencia del pavimento de hormigón en terreno

Para que sea efectivo el control de resistencia en pavimentos de hormigón mediante la aplicación de la metodología de madurez, se debe efectuar un correcto control y medición en terreno de la evolución de madurez del hormigón colocado en la obra. De no ser así, los resultados esperados no serán representativos de las condiciones del pavimento de hormigón.

Es necesario establecer ciertos procedimiento para la implementación de un correcto control de resistencia del pavimento de hormigón in-situ, a continuación se describirán los procedimientos.

1) El contratista deberá colocar al menos un sensor que registre madurez, en el hormigón vaciado por el último camión de cada una de las jornadas de pavimentación. Es recomendable si los volúmenes de hormigón colocados de una jornada son extensos, como también, si se interrumpe la colocación de hormigón durante la jornada, colocar más de un sensor que registre madurez para cubrir las variaciones en el desarrollo de fraguado de estas muestras.

   La colocación de los sensores se debe efectuar en ubicaciones críticas del pavimento de hormigón, considerando las condiciones expuestas y requerimientos del pavimento. Los sensores deben ser colocados al menos 60 cm alejados de los bordes del pavimento y lejos de cualquier elemento metálico que pueda afectar su correcto funcionamiento (punto de control señalizado). Se recomienda que el sensor tenga algún soporte para que su ubicación después de colocado el hormigón, no se altere; por otro lado, se debe indicar con algún elemento contundente o señalética la ubicación del sensor para prevenir la alteración de este.

   El contratista debe informar a la Inspección Fiscal o cualquier organismo regulador, la ubicación de cada uno de los sensores de madurez (kilometraje y pista).

2) Una vez insertado el sensor de madurez en el pavimento de hormigón, se deberá activar de forma oportuna y al conectar el sensor al equipo de medición de madurez, verificar que este activado de forma correcta y que este registrando datos.

3) Cuando se requiera o este establecido según los requerimientos del contrato, realizar mediciones y registro de madurez en el pavimento de hormigón. Registrar el valor del índice de madurez del equipo de medición o evalúe el índice de madurez desde el registro de temperatura según el equipo lo requiera.

4) Al obtener el registro de madurez del pavimento analizado en terreno, utilizando la curva de calibración de madurez previamente confeccionada, realizar una medición del valor de la resistencia a flexotracción (o compresión según requiera) correspondiente al índice de madurez medido en terreno.

Las características del hormigón analizado deben ser idénticas a las características de la mezcla de hormigón utilizado para la confección de la curva de calibración de madurez. Cualquier alteración de la muestra arrojará resultados incoherentes y no representativos de la muestra analizada. La temperatura a la cual se realiza el control de madurez, no debe variar en más de ± 20 °C a la temperatura a la cual se determinó la curva de madurez. Esto se debe a que una estimación de resistencia con un cambio de temperatura ± 20 °C, podría resultar no representativa. En los casos en que las condiciones climáticas de la obra cambien de forma extrema, se debe realizar una nueva curva resistencia-madurez, a menos que se demuestre que la relación madurez-resistencia todavía es válida para el cambio de temperaturas.

En la Figura 3.3 se representa un esquema del desarrollo de la metodología de control de resistencia en pavimentos de hormigón mediante la aplicación de madurez.

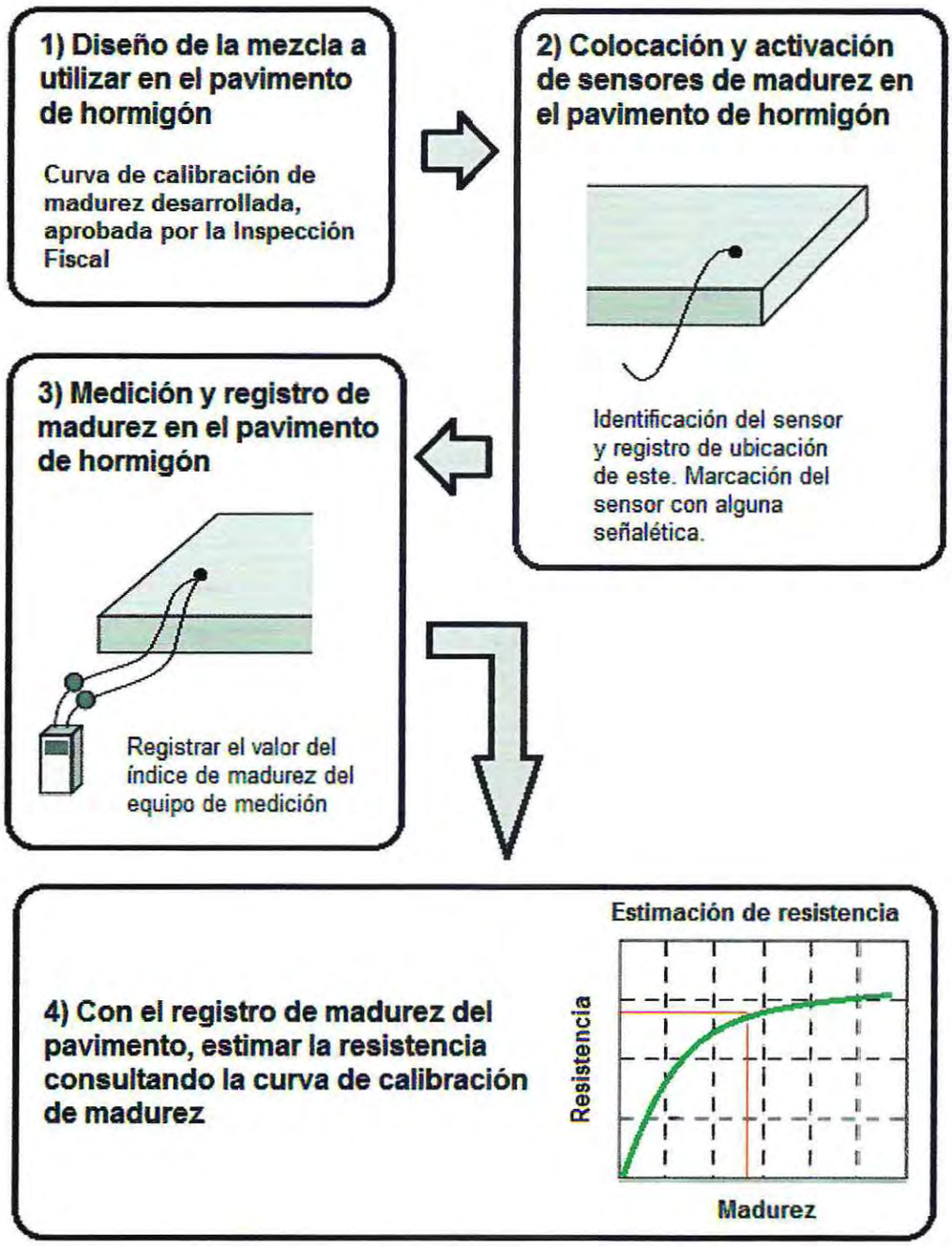

Figura 3.3 - Esquema de metodología de control de resistencia en pavimentos de hormigón mediante madurez.

3.3 Verificación de la curva de calibración de madurez

La verificación de la relación resistencia-madurez proporcionada por la curva de calibración de madurez, se debe efectuar para confirmar que esta relación establecida con anterioridad a la fase de pavimentación, es válida para el desarrollo completo de la obra.

Se debe generar un control permanente a los factores que puedan alterar la validez de la curva de calibración de madurez, estos factores pueden ser:

- Alteración de componentes de los materiales utilizados en la mezcla de hormigón establecida.
- Rendimiento de los equipos de mezclado y constitución de la mezcla de hormigón.
- Variación o alteración de las condiciones constructivas de la obra.
- Agentes externos a la obra que puedan afectar el desarrollo de la evolución del fraguado del pavimento de hormigón.

Se recomienda, que antes de realizar operaciones críticas que afecten al pavimento de hormigón, o en el caso, que exista cualquier incertidumbre con respecto a la veracidad de la curva de calibración de madurez, se realice una verificación de la curva de madurez. Es recomendable realizar verificaciones de la curva de madurez de forma periódica en el desarrollo de toda la duración del proyecto vial, según sea el requerimiento del proyecto.

Los métodos estipulados para la correcta verificación de la curva de calibración de madurez son:

a) Medición y registro de índice de madurez a probetas (vigas o cilindros) moldeadas durante la fase de pavimentación de la obra, comparar los resultados con la curva de calibración de madurez desarrollada.

b) Estimar la resistencia del pavimento de hormigón en terreno usando otro tipo de procedimiento estipulados en el MC-V8.

En el caso que la verificación de la curva de madurez muestre resultados fuera del rango de aceptación, se deberá confeccionar una nueva curva de calibración de madurez con las condiciones actuales de la obra. La verificación permanente de la curva de madurez confeccionada debe ser considerada como parte de la planificación de calidad del proyecto vial, de esta manera, se asegura que la relación de resistencia-madurez desarrollada es efectiva y viable para el control de resistencia del pavimento.

CAPÍTULO 4

Estudio del Control de Resistencia en Pavimentos de Hormigón Desarrollando la Relación Resistencia-Madurez

4.1 Generalidades

En el desarrollo de este capítulo se describirá ampliamente el estudio realizado en el control de resistencia del pavimento de hormigón del contrato Reposición ruta 60-CH sector Juncal – Portillo (Tramo 4, DM. 95.000,00 – DM. 104.980,49), ubicado en la provincia de Los Andes, Región de Valparaíso.

Para poder evaluar el control de resistencia en pavimentos de hormigón por medio de la metodología de madurez, en este trabajo se consideraron los aspectos más importantes en el desarrollo de la madurez en un pavimento de hormigón. Los aspectos estudiados en este capítulo son:

1. Características generales y diseño de la mezcla de hormigón utilizada para la pavimentación del contrato Reposición Ruta 60-CH.

2. Desarrollo y elaboración de la curva de calibración de madurez, considerando todos los factores involucrados en la confección.

3. Medición del índice de madurez en terreno, en los tramos de pavimentos en estudio.

4. Control de resistencia en terreno, mediante la aplicación de la curva de calibración de madurez.

De acuerdo a los objetivos de este estudio, se realizó un seguimiento y control de muestras en tramos de pavimentos de hormigón del proyecto, de los cuales se obtuvieron resultados para la evaluación de la aplicación de esta metodología en pavimentos de hormigón.

Considerando los aspectos mencionados anteriormente, en este capítulo se presentan todos los resultados obtenidos en este trabajo; el análisis de estos resultados se describe más adelante en el capítulo 5.

4.2 Características y Diseño de la Mezcla de Hormigón

En el desarrollo de este trabajo no se propuso realizar el diseño de la mezcla de hormigón utilizada para la constitución del pavimento, en las especificaciones generales del contrato, esta mezcla ya estaba determinada y el diseño estuvo a cargo de la empresa constructora Salfa corp S.A. El diseño de la mezcla de hormigón corresponde a un pavimento rígido con barras de traspaso de cargas con la denominación HF 5,0 (80) 40/06 (80% nivel de confianza, 40 mm de tamaño máximo nominal y 6 cm de trabajabilidad), este diseño es el adecuado para condiciones establecidas y las necesidades de demanda del pavimento.

El diseño de la mezcla de hormigón utilizada durante todo el proceso de pavimentación será descrito en el presente capítulo, es necesario tener una buena caracterización del estudio hecho al diseño de la mezcla de hormigón, debido que este trabajo se sustenta en la mezcla de hormigón y su comportamiento una vez colocado. El diseño del hormigón es la base para toda la producción que se efectuará en la obra, sirve para una correcta evaluación de los pavimentos a futuro y específicamente en este trabajo, es la base para la aplicación de la metodología de madurez como una herramienta de control de resistencia.

El método de madurez requiere de una buena caracterización del hormigón a utilizar, en este trabajo se efectuaron varios controles al diseño de la mezcla de hormigón, así poder visar la dosificación presentada y asegurar que el trabajo realizado fuera el adecuado.

A continuación se presentan las características generales del diseño de la mezcla de hormigón HF 5,0 (80) 40/06, la cual corresponde al pavimento de hormigón analizado en el desarrollo de este trabajo. Los análisis hechos para esta dosificación corresponden a los descritos en el punto 2.2.4 "Pavimentos rígidos en el manual de carretas" del Capítulo 2.

Características Generales:

Empresa Constructora : Constructora Salfa Corp S.A.
Obra : Reposición Ruta 60-CH, Juncal-Portillo.
Ubicación : Tramo 4, DM. 95.000,00 – DM. 104.980,49, Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso.
Tipo de Hormigón : HF 5.0 (80) 40/60.

En la Tabla 4.1 se caracterizan los materiales utilizados en el diseño de la mezcla de hormigón, junto con la procedencia y el tipo de material.

Tabla 4.1 - Características de Material de dosificación.

Tipo de Cemento	Polpaico P-400
Grava 1 1/2"	Planta Cominco
Gravilla 3/4"	Planta Cominco
Arena Media	Planta Cominco
Aditivo 1	Polyheed 840 (basf)
Aditivo 2	Microair (basf)

La procedencia de los áridos utilizados en el diseño del hormigón proviene de la planta de áridos COMINCO S.A., los análisis efectuados a estos áridos en el desarrollo de este trabajo fueron hechos en el LRV. Los aditivos incorporados al diseño (Polyheed 840 y Mocroair) serán descritos más adelante en el punto 4.2.3 de este capítulo.

El análisis de áridos se realizó a las tres muestras presentadas, Grava 1 ½", Gravilla 3/4" y Arena media. El resultado del análisis de áridos se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.2 - Granulometría de materiales empleados en la dosificación.

Tamiz		% que pasa	% que pasa	% que pasa	NORMA
Nch (mm)	ASTM (inch)	Grava 1 1/2"	Gravilla 3/4"	Arena Media	LNV 63
40	**1 1/2"**	100	-	-	
25	**1"**	73	-	-	
20	**3/4"**	19	100	-	
12,5	**1/2"**	-	54	-	
1	**3/8"**	-	16	100	
6,3	**1/4"**	-	-	-	
5	**N° 4**	-	1	77	
2,5	**N° 8**	-	-	57	
2	**N° 10**	-	-	-	
1,25	**N° 16**	-	-	41	
0,63	**N° 30**	-	-	29	
0,5	**N° 40**	-	-	-	
0,315	**N° 50**	-	-	15	
0,16	**N° 100**	-	-	5	
0,08	**N° 200**	-	-	-	
Finos por lavado	[%]	0,3	0,4	1,2	LNV 70

La abreviatura LNV de las normas presentadas en la Tabla 4.2 corresponde a funciones del Laboratorio Nacional de Vialidad descritas en el Manual de Carretera Volumen 8, en las siguientes tablas se presentara la misma denominación para la descripción de los ensayos.

A continuación se presenta las constantes físicas obtenidas de las muestras analizadas:

Tabla 4.3 - Constantes físicas.

Constante	Unidad	Grava 1 1/2"	Gravilla 3/4"	Arena Media
Dens. Apar. Suelta	[kg / m^3]	1512	1440	1620
Dens. Real Seca	[kg / m^3]	2680	2660	2650
Densidad Neta	[kg / m^3]	-	-	-
Absorción	[%]	1,2	1,5	2,2
Partículas Chancadas	[%]	53	69	-
Módulo de Finura		7,81	6,83	3,75

Los ensayes efectuados para el análisis de áridos de la mezcla de hormigón HF 5,0 (80) 40/06, se realizaron acorde a lo estipulado en el ítem 8.200 del Manual de Carretera Volumen 8, correspondiente a las especificaciones generales de áridos para morteros y hormigones.

4.2.1 Dosificación de la mezcla de hormigón

Una vez realizado del análisis de áridos para la caracterización de los materiales a utilizar en el diseño de la mezcla de hormigón, se pude proceder con el cálculo de la dosificación. En este ítem se presenta el desarrollo efectuado, para la obtención de la dosificación utilizada en la materialización de los pavimentos rígidos del proyecto Reposición Ruta 60-CH, Juncal-Portillo.

En las bases del contrato se proyecta un pavimento de hormigón con una resistencia especificada del producto como, HF 5.0 (80) 40/06. Las características de este hormigón son las siguientes:

Resistencia a los 28 días : 50 kgf/cm^2 (Resistencia a la flexotracción)
Nivel de Confianza : 80 %
Desviación (s) : 5 kgf/cm^2
Resistencia especificada flexotracción : 50 kgf/cm^2 o 5 MPa.

La obtención de la resistencia media se efectuó mediante la ecuación 4.1, según el método ACI para la dosificación de mezclas de hormigón.

$$fr = f'c + 0{,}842 * S \qquad \text{Ecu. 4.1}$$

Donde:

fr = Resistencia media (kgf/cm^2).
$f'c$ = Resistencia a la flexotracción (kgf/cm^2).
S = Desviación (kgf/cm^2).

Al resolver la ecuación 4.1 tenemos:

Resistencia media a flexotracción: 54,21 kgf/cm^2

Para el cálculo de la dosificación se utilizó el método ACI 211.1, la selección de las proporciones de los ingredientes que constituyen la mezcla, corresponden a un balance entre economía y especificaciones para el hormigón descritas en tópico 5.410 del Manual de Carreteras Volumen 5.

Para estimar la razón de agua cemento requerida, se toma como referencia el tipo de cemento incorporado a la mezcla.

Tipo de cemento: Polpaico 400, Grado de alta resistencia.

La resistencia media a flexotracción obtenida fue de 54,21 kgf/cm^2, en la siguiente tabla se especifica la razón de A/C según la resistencia a flexo tracción a los 28 días.

Tabla 4.4 - Razón agua/cemento según características de aire incorporado.

Resistencia a la compresión a 28 días [MPa]	Razón agua / cemento (en masa)	
	Sin aire incorporado	Con aire incorporado
40	0,42	-
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

Como la resistencia media a flexotracción a los 28 días es superior a 40 MPa, se toma como razón agua cemento de la Tabla 4.4.

Razón A/C: 0,42

Una vez establecida la razón de A/C, se determina la dosis de agua a incorporar en la mezcla, los resultados se establecen según el tamaño máximo nominal de los áridos analizados. La dosis de agua obtenida (W) es:

Tamaño máximo nominal : 40 mm (1 ½")
Trabajabilidad : 6 cm (especificada en el diseño)

Agua libre : 158 l/m³

Considerando la cantidad de agua obtenida, obtenemos la cantidad de dosis de cemento en el diseño, tomando en cuenta la ecuación 4.2, la dosis de cemento (C) es:

$$C = \frac{W}{A/C} \qquad \text{Ecu. 4.2}$$

Donde:

C = Dosis de cemento (kg/m³).
W = Dosis de agua.
A/C = Razón agua cemento.

Considerando los valores obtenidos, tenemos:

Razón A/C : 0,42
W : 158 l/m³

C: 376 kg/m³ (Para un cemento Polpaico 400, Grado alta resistencia)

Con los datos obtenidos anteriormente, se estima la cantidad de áridos a utilizar en la mezcla de hormigón, considerando el volumen neto de los materiales analizados el resultado es:

Árido Total: 1868 kg/m³

Por último se establece la dosificación final para la muestra de hormigón HF 5.0 (80) 40/06, en la siguiente tabla se muestra el resumen para esta dosificación.

Tabla 4.5 - Parámetros de dosificación de diseño de mezcla de hormigón.

Muestra	Tipo	Cantidad	Unidad
Tipo de Cemento	Polpaico P-400	376	[kg / m³]
Grava 1 1/2"	Planta Cominco	789	[kg / m³]
Gravilla 3/4"	Planta Cominco	187	[kg / m³]
Arena Media	Planta Cominco	892	[kg / m³]
Aditivo 1	Polyheed 840 (basf)	1,925	[kg / m³]
Aditivo 2	Microair (basf)	0,28	[kg / m³]

Agua Libre	158	[l / m³]
Agua Total	188	[l / m³]

Los áridos utilizados en la mezcla final para la constitución del hormigón HF 5.0 (80) 40/06, son mezclados de acuerdo a los porcentajes establecidos por la dosificación final. En la Tabla 4.6 se muestra el resultado de esta mezcla en cumplimiento con la banda de trabajo acordada.

Tabla 4.6 - Mezcla de áridos final para mezcla de hormigón.

Tamiz		Dosificación (%)			Mezcla	
Nch (mm)	ASTM (inch)	Grava 42	Gravilla 10	Arena 48	% pasa	Banda de Trabajo Empresa
40	**1 1/2"**	100	-	-	100	95 - 100
25	**1"**	73	-	-	89	84 - 94
20	**3/4"**	19	100	-	66	61 - 71
12,5	**1/2"**	-	54	-	53	48 - 58
1	**3/8"**	-	16	100	50	45 - 55
5	**N° 4**	-	1	77	37	32 - 42
2,5	**N° 8**	-	-	57	27	23 - 31
1,25	**N° 16**	-	-	42	20	16 - 24
0,63	**N° 30**	-	-	29	14	10 - 18
0,315	**N° 50**	-	-	15	7	4 - 10
0,16	**N° 100**	-	-	5	2	0 - 4

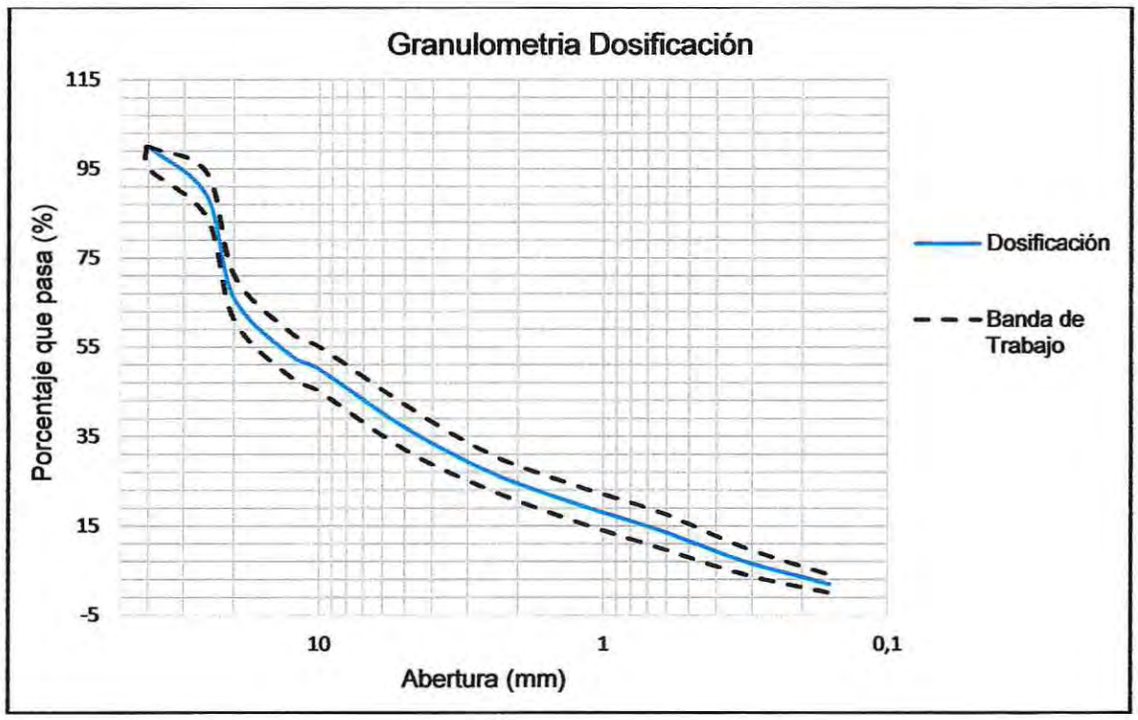

Figura 4.1 - Gráfico de granulometría según banda de trabajo.

Los porcentajes de la mezcla de áridos cumple con la banda de trabajo establecida por la empresa, la mezcla de dosificación se realizó acorde lo establecido con el ítem 5.410.302 del MC- V5.

4.2.2 Validación de Dosificación

En conjunto con el desarrollo de la dosificación de la muestra de hormigón HF 5.0 (80) 40/06 descrito en el ítem anterior, en el desarrollo de este trabajo se realizaron dos verificaciones a la dosificación de diseño presentada por la empresa constructora.

El objetivo de estas verificaciones a la muestra de hormigón en estudio, fue para certificar que el hormigón utilizado en los pavimentos constituidos del proyecto Reposición Ruta 60-CH, Juncal-Portillo, es idéntico a la dosificación de diseño presentada anteriormente. Cualquier alteración de la muestra de hormigón invalidaría totalmente la curva de calibración de madurez confeccionada en este estudio.

La primera verificación realizada fue efectuada en el mes de noviembre del 2013, para esto se dispuso de los mismos materiales utilizados en el diseño de la mezcla. Para el segundo caso, la verificación realizada en el mes de diciembre del 2013, se mantuvieron las características y condiciones originales de la dosificación analizada. El desarrollo de estas validaciones a la mezcla de hormigón es descrito a continuación.

4.2.2.1 Primera validación hormigón HF 5.0 (80) 40/06

Se consideró efectuar una primera verificación a la muestra considerando la importancia de diseño de la mezcla en el desarrollo de este trabajo. Esta validación a la dosificación de trabajo fue realiza en el mes de noviembre de 2013 en el LRV. La procedencia y el tipo de materiales analizados, es el mismo del diseño original.

A modo de simplificación se le denominará a la primera verificación como (A). La identificación de las características de la mezcla analizada es la siguiente:

Grava 1 ½" : Procedencia Planta Cominco (Fecha de muestreo 18-11-2013).
Gravilla ¾" : Procedencia Planta Cominco (Fecha de muestreo 18-11-2013).
Arena 1 : Procedencia Planta Cominco (Fecha de muestreo 18-11-2013).

Tabla 4.7 - Granulometría primera visación de dosificación.

Tamiz		% que pasa	% que pasa	% que pasa	NORMA
Nch (mm)	ASTM (inch)	Grava 1 1/2"	Gravilla 3/4"	Arena 1	LNV 63
40	**1 1/2"**	100	-	-	
25	**1"**	67	-	-	
20	**3/4"**	12	100	-	
12,5	**1/2"**	0	51	-	
1	**3/8"**	0	14	100	
6,3	**1/4"**	-	-	-	
5	**N° 4**	-	1	80	
2,5	**N° 8**	-	-	63	
2	**N° 10**	-	-	-	
1,25	**N° 16**	-	-	49	
0,63	**N° 30**	-	-	35	
0,5	**N° 40**	-	-	-	
0,315	**N° 50**	-	-	18	
0,16	**N° 100**	-	-	5	
0,08	**N° 200**	-	-	-	
Finos por lavado	[%]	0,1	0,2	2,0	LNV 70

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados de análisis de áridos, se realizó conforme a los estipulado en el ítem 8.203.3 del MC-V8. Junto al análisis granulométrico, se efectuó la caracterización para las constantes físicas de la muestra ensayadas conforme a lo estipulado en el ítem 8.200 del MC-V8, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.8 - Constantes físicas primera visación de dosificación.

Constante	Unidad	Grava 1 1/2"	Gravilla 3/4"	Arena 1
Dens. Apar. Suelta	[kg / m³]	1532	1523	1731
Dens. Real Seca	[kg / m³]	2636	2666	2646
Densidad Neta	[kg / m³]	2717	2739	2741
Absorción	[%]	1,1	1,0	1,3

La mezcla de áridos obtenida para el hormigón HF 5.0 (80) 40/06 se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.9 - Mezcla de áridos para la primera verificación.

Tamiz		Dosificación (%)		Mezcla	
Nch (mm)	ASTM (inch)	Gravilla 50	Arena 1 50	% pasa	Banda de Trabajo Empresa
40	**1 1/2"**	-	-	-	95 - 100
25	**1"**	-	-	-	95 - 100
20	**3/4"**	100	-	100	95 - 100
12,5	**1/2"**	51	-	76	77 - 87
1	**3/8"**	14	-	57	58 – 68
5	**N° 4**	1	80	41	36 – 46
2,5	**N° 8**	-	63	32	28 – 36
1,25	**N° 16**	-	49	25	20 – 28
0,63	**N° 30**	-	35	18	13 - 21
0,315	**N° 50**	-	18	5	7 - 13
0,16	**N° 100**	-	5	2	0 – 4

Sólo se tomaron en cuenta los parámetros de la gravilla ¾" y la arena 1, correspondiente a una arena media. Como resultado de los análisis hechos a las muestras que componen la mezcla de hormigón en estudio, se obtuvo la siguiente dosificación final (Tabla 4.10).

Tabla 4.10 - Dosificación final primera visación.

Muestra	Tipo	Cantidad	Unidad
Tipo de Cemento	Polpaico P-400	325	[kg / m³]
Gravilla 3/4"	Planta Cominco	951	[kg / m³]
Arena 1	Planta Cominco	951	[kg / m³]
A/C	-	0,49	-
Agua Libre		158	[l / m³]

La mezcla final de los agregados utilizados cumple con la banda de trabajo determinada por la empresa constructora, en el Capítulo 5 se describe cual fue el problema con esta dosificación. El mezclado de agregados de la mezcla, se realizó acorde a los porcentajes indicados de la dosificación, los procedimientos efectuados para el resultado de esta dosificación, fueron los descritos en el punto 4.2 de este capítulo; el análisis completo se encuentra disponible en el Anexo A.1.

4.2.2.2 Segunda validación hormigón HF 5.0 (80) 40/06

Para tener total certeza de los análisis efectuados a la dosificación y características del hormigón en estudio, se realizó una segunda verificación a la mezcla de diseño. Se efectuó un mes después de la primera verificación. Se decidió por este segundo control a modo de comparación con el primer control efectuado, como también, a modo de comprobación de los materiales utilizados en el diseño de la mezcla.

Se denomina a esta segunda validación de la dosificación de la mezcla HF 5.0 (80) 40/06 como (B); las características analizadas son las siguientes.

Grava 1 ½" : Procedencia Planta Cominco (Fecha de muestreo 17-12-2013).
Gravilla ¾" : Procedencia Planta Cominco (Fecha de muestreo 17-12-2013).
Arena 1 : Procedencia Planta Cominco (Fecha de muestreo 17-12-2013).

La granulometría efectuada según el ítem 8.203.3 del MC-V8 se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.11 - Granulometría segunda visación de dosificación.

Tamiz		% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa	Banda
Nch (mm)	ASTM (inch)	Grava 1 1/2"	Gravilla 3/4"	Arena 2	Mezcla Arena con Corte	Recomendada Arena
40	**1 1/2"**	100	-	-	-	-
25	**1"**	67	-	-	-	-
20	**3/4"**	12	100	-	-	-
12,5	**1/2"**	-	50	-	-	-
1	**3/8"**	-	13	100	-	100 - 100
5	**N° 4**	-	1	80	100	95 - 100
2,5	**N° 8**	-	-	64	80	80 - 100
1,25	**N° 16**	-	-	50	63	50 - 85
0,63	**N° 30**	-	-	36	45	25 - 60
0,315	**N° 50**	-	-	19	24	10 - 30
0,16	**N° 100**	-	-	7	9	2 - 10
Finos por lavado	[%]	0,1	0,2	2,0	-	5,0 Max

Junto con la granulometría del material analizado, se determinaron las contantes físicas, estas se describen en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 - Constantes físicas obtenidas para la segunda verificación.

Constante	Unidad	Grava 1 1/2"	Gravilla 3/4"	Arena Media
Dens. Apar. Suelta	[kg / m^3]	1530	1520	1730
Dens. Real Seca	[kg / m^3]	2680	2670	2650
Densidad Neta	[kg / m^3]	2717	2740	2740
Absorción	[%]	1,1	1,0	2,3
Partículas Chancadas	[%]	64	60	-

Una vez constituida las características del material utilizado en la mezcla de hormigón en estudio, se mezclaron las cantidades de Grava, Gravilla y Arena en los porcentajes establecido, se realizó acuerdo al ítem 5.410.302 del MC- V5. El resultado de esta mezcla se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.13 - Mezcla de áridos final para la segunda visación.

Tamiz		Dosificación (%)			Mezcla	
Nch (mm)	ASTM (inch)	Grava 42,2	Gravilla 10,0	Arena 47,8	% pasa	Banda de Trabajo Empresa
40	**1 1/2"**	100	-	-	100	95 - 100
25	**1"**	67	-	-	86	84 - 94
20	**3/4"**	12	100	-	63	61 - 71
12,5	**1/2"**	-	50	-	53	48 - 58
1	**3/8"**	-	13	100	49	45 - 55
5	**N° 4**	-	1	80	38	32 - 42
2,5	**N° 8**	-	-	64	31	23 - 31
1,25	**N° 16**	-	-	50	24	16 - 24
0,63	**N° 30**	-	-	36	17	10 - 18
0,315	**N° 50**	-	-	19	9	4 - 10
0,16	**N° 100**	-	-	7	3	0 - 4

En la siguiente figura se presenta el gráfico de la mezcla de áridos efectuado, para la segunda verificación propuesta.

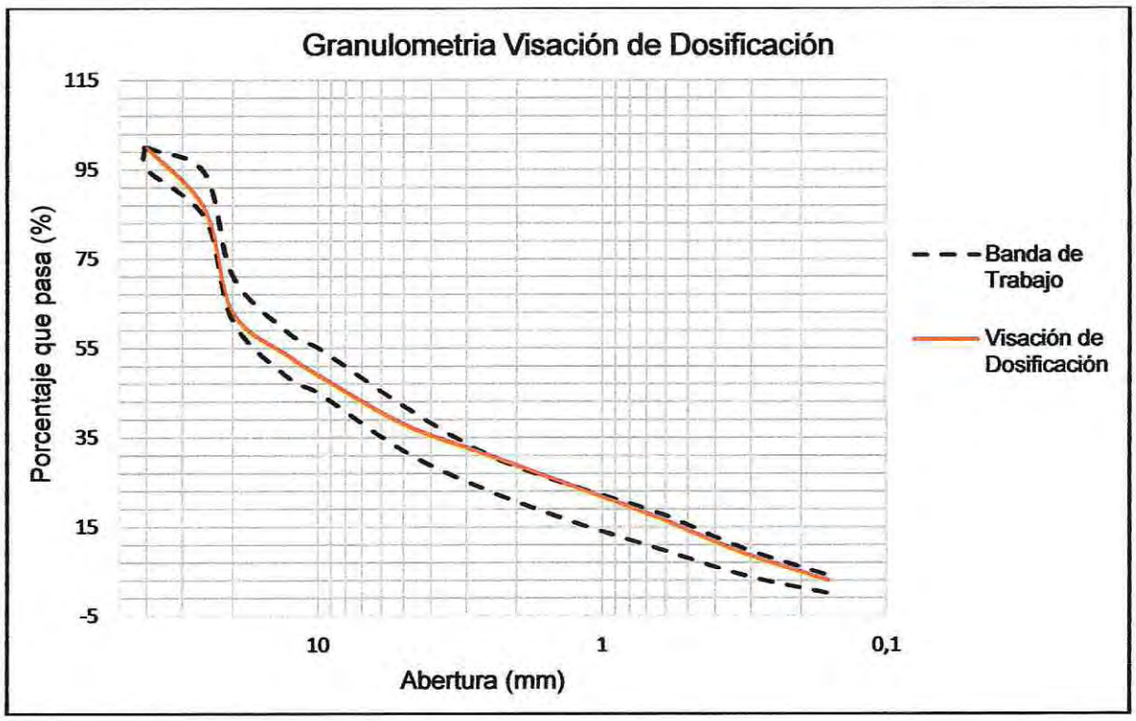

Figura 4.2 - Gráfico de granulometría segunda verificación de dosificación.

El análisis de áridos efectuado a la mezcla en estudio, permite finalmente constituir la dosificación final. Los resultados de la mezcla analizada se muestran en siguiente tabla.

Tabla 4.14 - Dosificación final segunda verificación.

Muestra	Tipo	Cantidad	Unidad
Tipo de Cemento	Polpaico P-400	376	[kg / m^3]
Aditivo 1	Polyheed 840 (basf)	1,925	[kg / m^3]
Aditivo 2	Microair (basf)	0,28	[kg / m^3]

A/C	0,42	-
Agua Total	188	[l / m^3]

Las porciones de áridos establecidas son idénticas a las determinadas en el punto 4.2.1 de este capítulo. Los agregados fueron mezclados de acuerdo a los porcentajes indicados en la dosificación original, la mezcla de agregados realizada cumple totalmente con la banda de trabajo presentada en el diseño de la mezcla.

Se confeccionó un hormigón de prueba para esta dosificación propuesta, los resultados de resistencia a la compresión cúbica a la edad de 7 y 14 días se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 - Muestras de hormigón de prueba confeccionadas a partir de la dosificación propuesta.

Muestra	Fecha confección	Edad ensaye (días)	Tipo de Hormigón	Resistencia (MPa)
1A	19-12-2013	7	HF 5,0 (80) 40/6	3,1
2A	19-12-2013	7	HF 5,0 (80) 40/6	2,9
3A	19-12-2013	7	HF 5,0 (80) 40/6	3,2
1B	19-12-2013	14	HF 5,0 (80) 40/6	3,7
2B	19-12-2013	14	HF 5,0 (80) 40/6	3,5
3B	19-12-2013	14	HF 5,0 (80) 40/6	3,8

Los procedimientos efectuados para el resultado de esta dosificación, fueron los descritos en el punto 4.2 de este capítulo. El análisis completo se encuentra disponible en el Anexo A.2.

4.2.3 Aditivos en el diseño de la mezcla de hormigón

El diseño de la mezcla de hormigón requerido en las bases del contrato en estudio, se establece la incorporación de dos aditivos a la dosificación de la mezcla utilizada para la constitución de los pavimentos de hormigón. La incorporación de estos aditivos es necesaria, debido a las condiciones generales de construcción en donde se emplaza la obra Reposición Ruta 60-CH. Sector Juncal-Portillo.

La ubicación del proyecto posee características singulares únicas, debido a esto, las consideraciones a la hora de efectuar un correcto diseño de la mezcla deben ser tales, que se asegure el correcto desempeño del pavimento frente a factores constructivos y climáticos. Los aditivos especificados para el diseño de la mezcla de hormigón son, un plastificante Polyheed 840 Basf, y un incorporador de aire Microair Basf.

El plastificante Polyheed 840 Basf es un aditivo líquido que genera un hormigón más uniforme. Su aplicación en la mezcla reduce la cantidad de agua de amasado con su correspondiente disminución en la cantidad de cemento, para obtener la consistencia y resistencia requerida, otorgando ahorros significativos para el constructor. Se recomienda el uso de este plastificante, debido que se requiere una mezcla de hormigón con un fraguado normal y de buena calidad.

Las cualidades que este plastificante otorga al hormigón son, mejora las características del acabado, mejora la trabajabilidad (incluso usando menos agua), reduce la segregación y el sangrado, otorga un fraguado normal. Una vez que el hormigón se encuentra endurecido las características adquiridas son:

- Mejora la apariencia en las superficies pulidas.
- Aumenta las resistencias a la compresión y a la flexión, así como la adherencia al acero de refuerzo.
- Reduce la permeabilidad y el agrietamiento.
- Aumenta la resistencia del concreto con aire incluido, sujeto a ciclos de congelamiento y deshielo y a los efectos de descamación por sales deshielantes.

Debido a los gradientes térmicos presentes en el lugar de emplazamiento de la obra, como también, los factores climáticos y ambientales extremos (ciclos de hielo y deshielo), es necesario la incorporación de aire en la mezcla de hormigón, así garantizar la vida útil para el cual fue diseñado y que el pavimento no presente problemas a edad temprana. El incorporador de aire Microair Basf es un aditivo inclusor de aire que le proporciona al hormigón una protección extra creando burbujas de aire ultra estable, las cuales son fuertes, pequeñas y con poco espaciamiento en la mezcla. Algunas de las características que brinda al hormigón son:

- Mejora considerablemente la estabilidad del aire retenido.
- Mayor resistencia al daño causado por los ciclos de congelamiento y deshielo.
- Mayor resistencia a la descamación por sales para deshielo.
- Superior plasticidad y manejabilidad.
- Mejora el sistema de inclusión de aire en el hormigón endurecido.
- Menor permeabilidad incrementando su impermeabilidad al agua.
- Reduce la segregación y el sangrado.

Según lo estipulado en el ítem 5.410.201(4) del MC-V5, los aditivos incorporados en la dosificación presentada en este capítulo, cumplen con los requisitos establecidos en NCh 2182, fueron controlados en el diseño de la mezcla según NCh 2281. El uso de estos aditivos fue supervisado por el LRV y la empresa constructora del proyecto.

4.3 Desarrollo de la curva de calibración de madurez

La aplicación del método de madurez en este trabajo de tesis está orientada a los pavimentos de reposición confeccionados en el contrato Reposición Ruta 60-CH, sector Juncal-Portillo, corresponden a un hormigón de cemento hidráulico con barras de traspaso de cargas. La utilización de este tipo de pavimento en los últimos años ha tenido un incremento, debido que se ha enfocado en la construcción y reposición de rutas a lo largo del país. Para que el uso de estos pavimentos siga en desarrollo, es necesario buscar otras alternativas para el control de resistencia, ya que los métodos tradicionales no benefician la implementación de este tipo de pavimento.

El proyecto estudiado Reposición Ruta 60-CH, se separó por temporadas, debido que las condiciones climáticas y ambientales existentes en el lugar de la obra en el periodo de invierno, hacían imposible el avance y desarrollo del proyecto. Después de este periodo de paralización, los procedimientos efectuados para visación de dosificación del hormigón y la curva de madurez, se realizaron desde su inicio para asegurar una adecuada estimación de la resistencia en los pavimentos. Se nombró en este trabajo a la temporada 1 como T1 y la temporada 2 como T2.

En este estudio uno de los factores importantes a considerar es el datúm de temperatura, como se explicó en el ítem 2.3, este índice corresponde a la temperatura donde el hormigón deja de ganar resistencia, por lo que este parámetro influye directamente en el desarrollo de la madurez. Como el proyecto en el periodo de invierno se paralizaba, se asumió el datum de temperatura en 0 °C, ya que las temperaturas presentadas no fueron extremas. El valor utilizado en este trabajo es recomendado en la norma ASTM C1074, en el caso que sea necesario calcular este índice, en el Anexo A1 de la norma ASTM C1074 se presenta la metodología de obtención del datum de temperatura.

Figura 4.3 - Preparación de moldes vigas para la confección de muestras para la curva de madurez.

En este ítem se presentarán los resultados obtenidos en el desarrollo de la curva de calibración de madurez, separados por las temporadas de trabajo de la constructora. Este trabajo se realizó de acuerdo a los datos obtenidos en la temporada 2 del contrato Reposición Ruta 60-CH, donde se realizó un seguimiento y control en la obra. Se presentan los datos observados en la temporada 1, de esta manera, poder comparar las curvas de calibración de madurez de ambas temporadas.

4.3.1 Confección curva de calibración de madurez

Para la confección de la curva de calibración de madurez se utilizó la metodología descrita en el capítulo 3, específicamente en el punto 3.1 "Metodología de control de resistencia en pavimentos de hormigón mediante el método de madurez".

Se prepararon 16 probetas de vigas para la obtención de la resistencia a flexotracción en las edades establecidas previamente (2, 3, 5, 7, 10, 14, 21 y 28 días), como se muestra en la Figura 4.4. También se preparó una probeta modelo, a la cual se le incorporó un sensor de medición de madurez para registrar la evolución de este índice, y así obtener los registros a las edades de ensaye de las 16 probetas; a esta probeta se le nombró como probeta modelo y no fue ensayada en ningún momento, solo se utilizó para el registro de madurez.

Figura 4.4 - Confección de probetas de viga para la curva de madurez.

Se prepararon muestras tanto para el LRV como para la empresa constructora, todas de una única amasada de hormigón. Los sensores de madurez fueron activados al final de la constitución de las probetas (Figura 4.5). Luego de 24 horas de la confección de las muestras, se trasladaron a los respectivos laboratorios, donde finalmente se ensayaron para obtener los resultados. Este procedimiento fue efectuado por parte del LRV y la empresa constructora por separado.

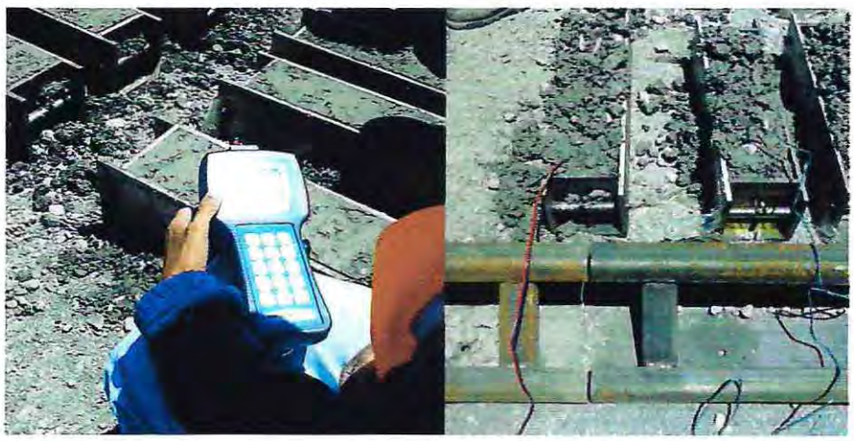

Figura 4.5 - Activación de sensores de madurez en probeta modelo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de ensayes de probetas en las edades estipuladas, corresponden a la curva de calibración del LRV de la temporada 2, donde se realizó el control y seguimiento a la obra.

Tabla 4.16 - Resultados en probetas de curva de calibración de madurez.

Edad	Dimensiones			Peso	Carga	Resist.	Madurez	Promedio	
(Días)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	(g)	(KN)	(MPa)	(°C - hr)	Resist. (MPa)	Madurez (°C - hr)
2	151	530	152	29068	26,34	3,40	1851	**3,3**	**1851**
2	151	530	153	29060	25,49	3,25	1851		
3	151	530	152	30092	28,17	3,63	2108	**3,7**	**2108**
3	153	530	152	29284	29,30	3,73	2108		
5	152	530	151	29080	31,08	4,04	2473	**4,1**	**2473**
5	152	530	151	29204	32,30	4,19	2473		
8	152	530	151	29050	36,10	4,69	3962	**4,6**	**3962**
8	153	530	151	29182	35,23	4,54	3962		
10	152	530	150	30065	38,04	5,01	4910	**5,0**	**4910**
10	152	530	150	29048	38,36	5,05	4910		
14	152	530	151	29150	42,43	5,51	6625	**5,4**	**6625**
14	153	530	150	29045	40,76	5,33	6625		
21	151	530	151	30002	47,15	6,16	10023	**5,9**	**10023**
21	152	530	153	29376	45,29	5,73	10023		
24	152	530	151	29069	47,72	6,20	13902	**6,1**	**13902**
24	152	530	151	29110	47,01	6,10	13902		

En este trabajo se desarrolló la curva de calibración de madurez a partir de los datos obtenidos en la Tabla 4.16, esta curva de madurez se obtuvo en conjunto con el LRV. Fue utilizada posteriormente, para la verificación de la curva de calibración de madurez de la empresa constructora, como también, en el control de resistencia en terreno en los pavimentos de hormigón del contrato en estudio.

Algunas de las edades de ensaye de las probetas para la confección de la curva de calibración de madurez, no fue la misma que la planificada; esto se debe, que algunos de los días de ensaye no estaba dentro de los días hábiles de trabajo, como resultado, se efectuaron los ensayes en los días más próximos a los estipulados.

El Manual de Carretera establece que la apertura a tránsito en pavimentos de hormigón, se puede efectuar cuando se cumple el 75% de la resistencia máxima requerida. En las bases del contrato la resistencia mínima requerida establecida es de 5,0 MPa, como resultado, la condición de apertura del 75% de la resistencia máxima es de **3,75 MPa**.

4.3.1.1 Temporada 1

Como anteriormente se mencionó, los trabajos realizados en el contrato Reposición Ruta 60-CH, se efectuaron en dos temporadas. Se presentan en este trabajo los resultados de ambas temporadas, para realizar una adecuada comparación, así evaluar adecuadamente los resultados obtenidos.

i) Constructora

Se presentan a continuación los resultados de la curva de calibración de madurez obtenidos por parte de la empresa constructora en la T1. En la Tabla 4.17, se muestran los resultados de las probetas ensayadas en terreno en los días estipulados para la confección de la curva de madurez de la empresa constructora, perteneciente a la temporada 1.

Tabla 4.17 - Resultados ensaye probetas para curva de madurez constructora T1.

Edad (días)	Resistencia (MPa)	Madurez (°C - hr)
2	2,1	1166
3	2,4	1551
5	2,6	2021
7	2,8	2585
9	3,1	3115
14	3,8	4629
21	4,5	6549
28	5,2	13098

Con los resultados observados en las diferentes edades de la Tabla 4.17, se grafican los esfuerzos obtenidos con su respectivo índice de madurez, se traza la mejor línea de tendencia logarítmica para ajustar los valores obtenidos.

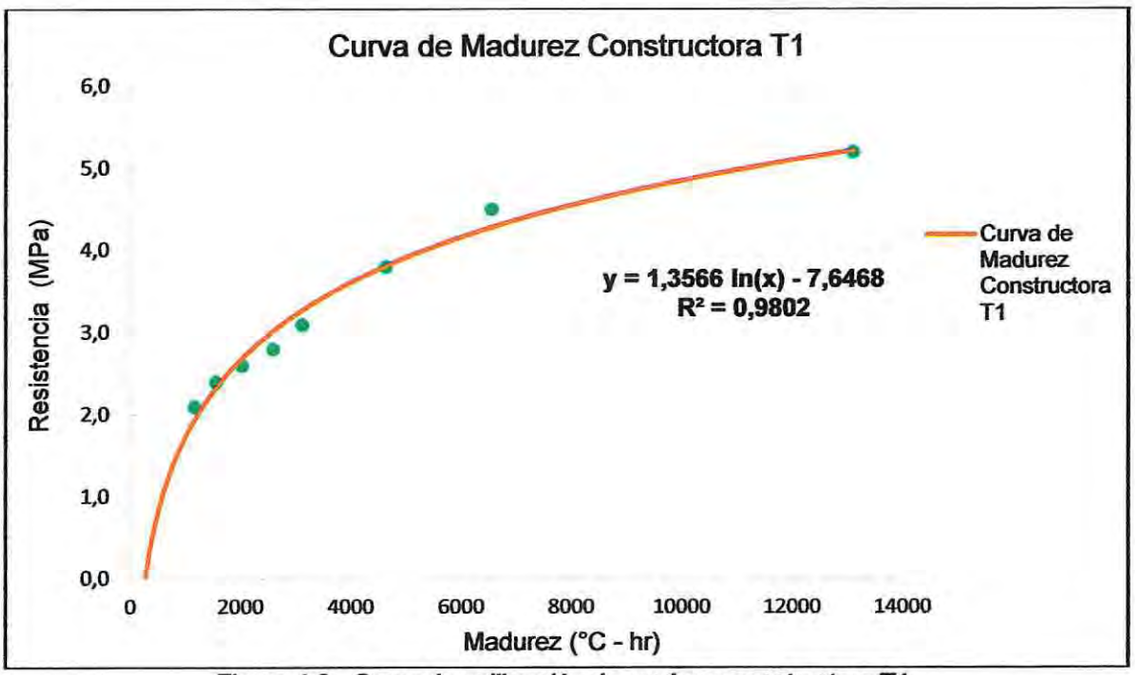

Figura 4.6 - Curva de calibración de madurez constructora T1.

De la curva de madurez obtenida y de la tendencia ajustada para los datos, se obtiene una ecuación logarítmica natural con su respectivo valor de R^2, que correlaciona la madurez con la resistencia del hormigón. A continuación se presenta la ecuación obtenida a partir de la curva de madurez de la Figura 4.6.

$$R = 1{,}3566\ ln\ [M] - 7{,}6468 \qquad \text{Ecu. 4.3}$$

Donde:

R = Resistencia (MPa)
M = Madurez del hormigón (°C-hr)

Con la curva de calibración de madurez obtenida, se puede estimar el índice de madurez requerido para la apertura a tránsito, con una resistencia mínima de 3,75 MPa. La madurez correspondiente a este valor es de **4452 (°C-hr).**

ii) Laboratorio Regional de Vialidad

Como corresponde para una correcta evaluación del control de resistencia por el método de madurez, se presentan a continuación los resultados obtenidos por parte del LRV en la temporada 1 de trabajo en el proyecto Reposición Ruta 60-CH. En la Tabla 4.18, se muestra el resumen de la planificación para la elaboración de la curva de madurez del LRV.

Tabla 4.18 - Resultado ensaye de probetas para curva de madurez LRV T1.

Edad (días)	Resistencia (MPa)	Madurez (°C - hr)
2	3,0	1254
3	3,7	1797
5	3,4	2860
7	4,3	3828
9	4,7	4788
14	4,7	7307
21	5,5	10744
28	5,1	13970

Observando las mediciones obtenidas en los días 2, 3, 5, 7, 9, 14, 21 y 28; se asocian la madurez con la resistencia en una ecuación final, donde en el eje de las ordenadas (Y) se grafican los resultados de las resistencias, por otro lado, en el eje de las abscisas (X) se grafica el índice de madurez obtenido de la probeta modelo. En la Figura 4.7 se presenta el resultado de la curva de calibración de la T1 del LRV.

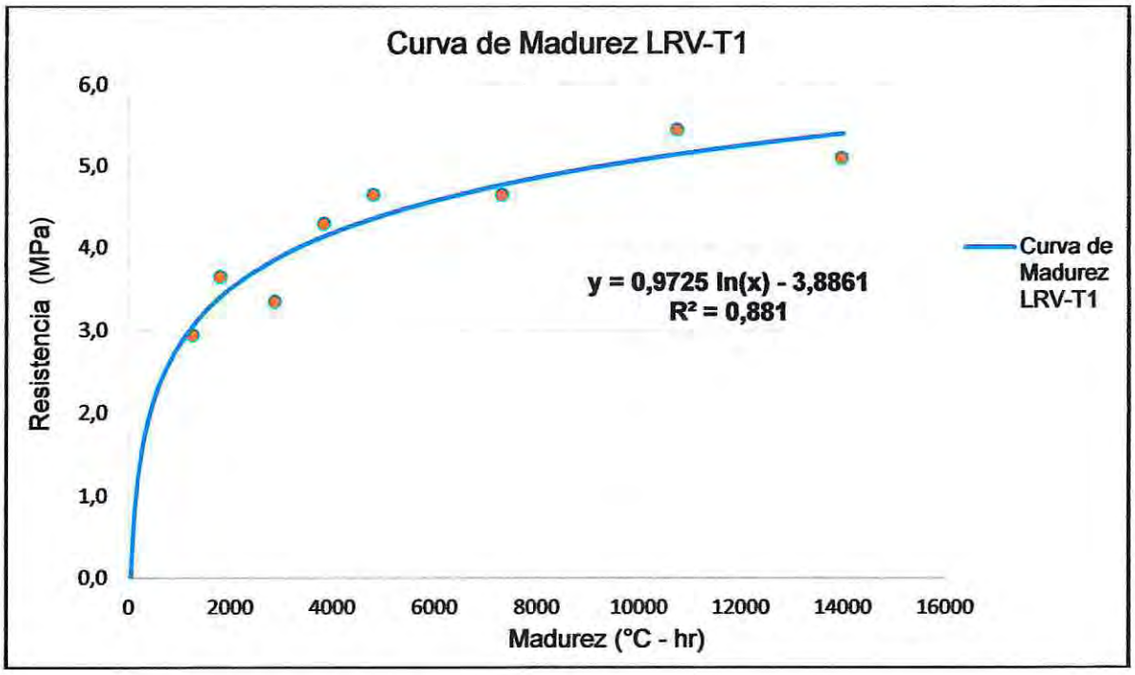

Figura 4.7 - Curva de calibración de madurez LRV T1.

De acuerdo a la línea de tendencia trazada en la Figura 4.7, se obtiene la siguiente ecuación.

$$R = 0{,}9725\ Ln\ [\ M\ ] - 3{,}8861 \qquad \text{Ecu. 4.4}$$

Donde:

R = Resistencia (MPa)
M = Madurez del hormigón (ºC-hr)

La madurez mínima para habilitar a tránsito según la curva de calibración de madurez obtenida por el LRV, es de **2570 (°C-hr).**

4.3.1.2 Temporada 2

En este ítem se presentan los resultados de la temporada 2 de contrato estudiado, el seguimiento y control al proyecto Reposición Ruta 60-CH se realizó en esta temporada, donde se profundizó en la aplicación de esta metodología de control de resistencia en terreno.

i) Constructora

A continuación se presentan los datos obtenidos por parte de la empresa constructora SALFA S.A. en la elaboración de la curva de madurez. Como se indicó en el capítulo 3, tanto la empresa constructora del proyecto y el organismo fiscalizador deben confeccionar sus curvas de calibración de madurez. En la Tabla 4.19 se muestran los datos obtenidos por la constructora en la T2.

Tabla 4.19 - Resultados ensaye de probetas de curva de madurez constructora T2.

Edad (días)	Resistencia (MPa)	Madurez (°C - hr)
3	3,3	1811
4	3,5	2250
5	3,8	2653
6	4,1	3200
7	4,2	3697
10	5,0	5100
14	5,1	7123
17	5,2	8452
21	5,4	10155
28	5,8	13837

A partir de la Tabla 4.19, se traza la mejor tendencia para los datos obtenidos y se establece la curva de calibración de madurez de la T2 para la constructora, el Figura 4.8 se muestra el resultado.

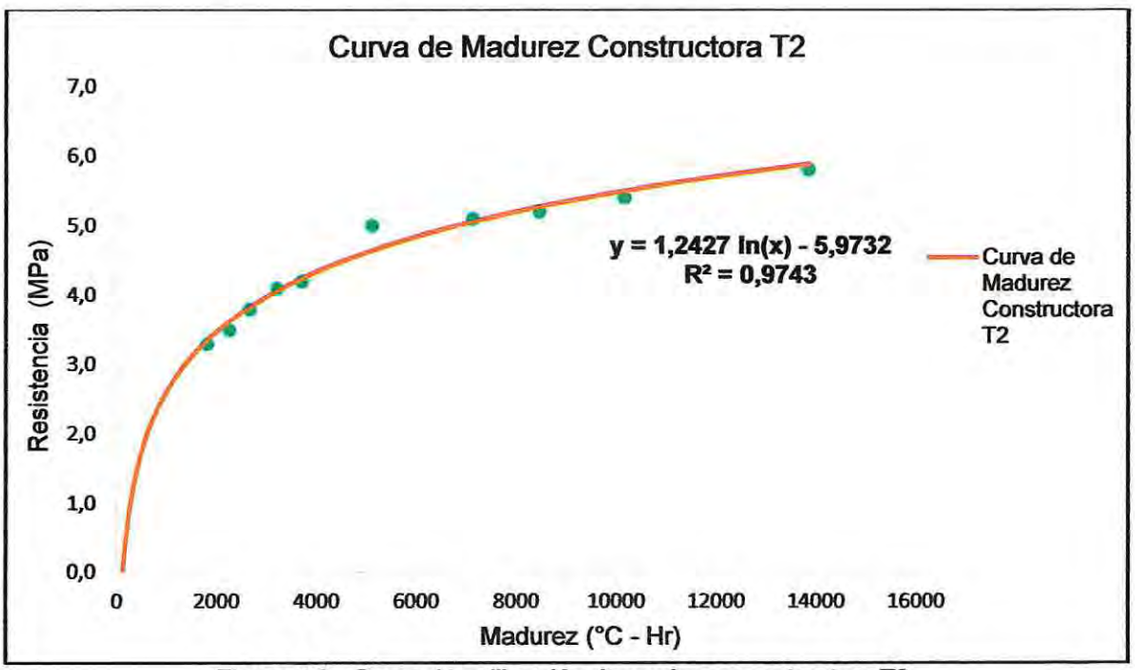

Figura 4.8 - Curva de calibración de madurez constructora T2.

De la línea de tendencia logarítmica trazada en la Figura 4.8, se obtiene una ecuación que correlaciona la resistencia del hormigón con el índice de madurez, a continuación se presenta la relación obtenida.

$$R = 1{,}2427\ Ln\ [\ M\ ] - 5{,}9732 \qquad \text{Ecu. 4.5}$$

Donde:

R = Resistencia (MPa)
M = Madurez del hormigón (°C-hr)

Como la resistencia mínima de apertura a tránsito es de 3,75 MPa, la madurez correspondiente a este valor obtenida de la ecuación 4.5 es de **2501 (°C-hr).**

ii) Laboratorio Regional de Vialidad

En el desarrollo de este trabajo, se profundizo en la obtención de la curva de calibración de madurez correspondiente a la T2 del laboratorio regional de vialidad. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.20 - Resultados ensaye probetas de curva de madurez LRV T2.

Edad (días)	Resistencia (MPa)	Madurez (°C - hr)
2	3,3	1851
3	3,7	2108
5	4,1	2473
8	4,6	3962
10	5,0	4910
14	5,4	6625
21	5,9	10023
28	6,1	13902

De los datos observados en la Tabla 4.20, se constituyó la curva de calibración de madurez del LRV. En la Tabla 4.16 se encuentra toda la descripción de los ensayes efectuados, para la obtención de los resultados finales de la curva de madurez utilizada en este trabajo, la cual se utilizó para comparar las otras curvas de madurez obtenidas, tanto en la T1, como en la temporada dos.

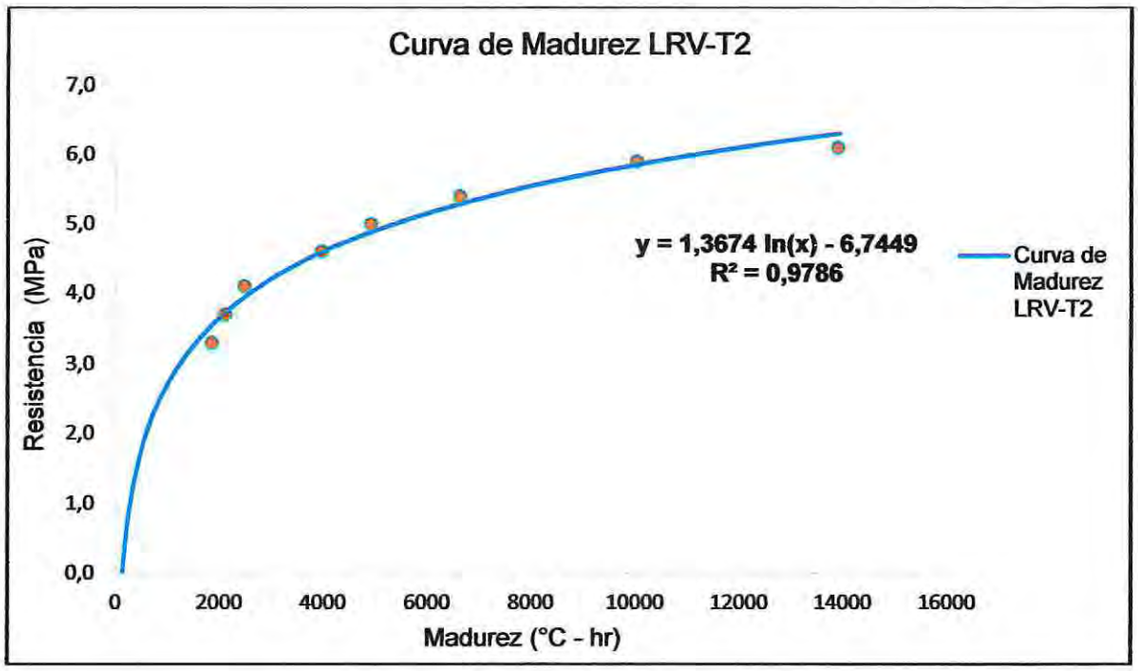

Figura 4.9 - Curva de calibración de madurez LRV T2.

Con los datos obtenidos a partir de la curva de calibración de madurez de segunda temporada del LRV (Figura 4.9), se obtiene la siguiente ecuación.

$$R = 1{,}3674\ Ln\ [\ M\ ] - 6{,}7449 \qquad \text{Ecu. 4.6}$$

Donde:

R = Resistencia (MPa)
M = Madurez del hormigón (°C-hr)

Como anteriormente se mencionó, el requisito para habilitar a tránsito establecido en el contrato Reposición Ruta 60-CH es del 75% de la resistencia máxima requerida, esto corresponde a 3,75 MPa. A partir de la curva de madurez elaborada en el LRV en la segunda temporada de trabajo, se obtiene que la madurez mínina para aceptar el tránsito vehicular de los pavimentos de hormigón confeccionados en el proyecto, es de **2154 (°C-hr).**Para la evaluación general de la aplicación de esta metodología en el control de resistencia en pavimentos de hormigón, se utilizaron los parámetros obtenidos en la segunda temporada de trabajo, la ecuación 4.6 se utilizará para estimar la resistencia del pavimento de hormigón en terreno.

Las condiciones básicas de habilitación de tránsito establecidas en este estudio son:

Resistencia mínima : 3,75 (MPa)
Madurez mínima : 2154 (°C-hr)

La comparación de los resultados presentados más adelante, fue realizada a partir de las condiciones mínimas de apertura a tránsito recién mencionadas.

4.4 Medición de Índice de Madurez y control de resistencia en Terreno

Una parte importante del trabajo realizado en este estudio, corresponde a la medición de los sensores incorporados en los pavimentos de hormigón del contrato Reposición Ruta 60-CH. La obtención de estos resultados es primordial para el desarrollo del control de resistencia a través del método de madurez, para así efectuar un adecuado control en terreno de la resistencia en un pavimento de hormigón.

La incorporación de los sensores de madurez en el pavimento de hormigón fue descrita en el capítulo 3, estos sensores son activados al momento de la colocación de hormigón en terreno, de esta forma se registra la evolución de la resistencia desde el inicio. Para realizar la lectura y registro de madurez en terreno, se necesita un equipo de lectura de madurez, el equipo fue descrito en el ítem 2.3.4 del capítulo 2. Una vez conectado el equipo al sensor en el pavimento, se puede obtener el desarrollo de la temperatura y madurez (Figura 4.10), desde el momento de inicio del sensor hasta la lectura; los datos se pueden almacenar en este equipo, para luego, ser importados a cualquier ordenador y facilitar el manejo de los datos obtenidos.

Figura 4.10 - Sensor de madurez incorporado en el pavimento.

Para el correcto control de resistencia del pavimento de hormigón en terreno, es necesario realizar un control permanente de la madurez en los sensores (control diario), de esta manera, determinar el momento exacto para la apertura a tránsito del pavimento, y efectuar una planificación eficiente de los trabajos en la obra.

Para contrastar los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de madurez, se obtuvieron resultados de un total de 42 sensores de madurez, correspondientes a diferentes tramos de pavimento del contrato Reposición Ruta 60-CH. En los tramos en estudio, también se tomaron muestras frescas al momento de hormigonar en obra, de esta forma, obtener resultados de acuerdo a la metodología actual de control de resistencia estipulada en el MC.

4.4.1 Lectura de sensores de madurez en terreno

Para entender de mejor manera como se manejan los datos en terreno con la aplicación de esta metodología, se presentan los resultados obtenidos de dos sensores incorporados en dos tramos contiguos de pavimento del contrato Reposición Ruta 60-CH.

La descripción de los sensores para este ejemplo es:

Sensor A : Sector de muestreo (km inicio 97290, km final 97340)
Fecha muestreo 14-11-2013

Sensor B : Sector de muestreo (km inicio 97340, km final 97400)
Fecha muestreo 15-11-2013

La fecha de muestreo corresponde al día de pavimentación de estos tramos, donde se tomaron muestras frescas del hormigón utilizado y se activaron estos sensores. Posteriormente se controló permanentemente los sensores para estimar la resistencia en terreno.

En la Figura 4.11 se observa cómo se conectan los sensores al equipo para obtener la madurez en terreno, de esta forma, planificar una apertura a tránsito de manera segura y confiable.

Figura 4.11 - Lectura de sensor de madurez en terreno.

El equipo de madurez IntelliRock II registra tanto la madurez como el historial de temperaturas, en la Figura 4.12 se muestra el historial de temperatura del Sensor A entregado por el equipo de madurez, el equipo puede mostrar los resultados como gráficos y datos.

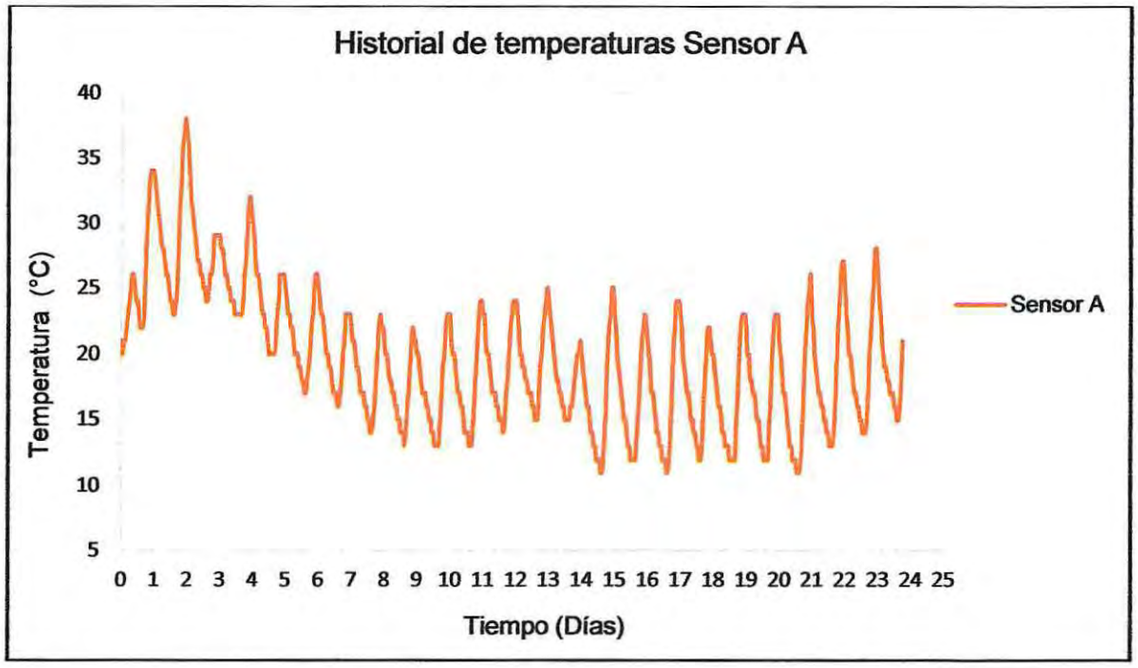

Figura 4.12 - Desarrollo de temperaturas Sensor A.

En la Figura 4.13 se muestra el historial de temperatura entregado por el equipo de madurez correspondiente al Sensor B

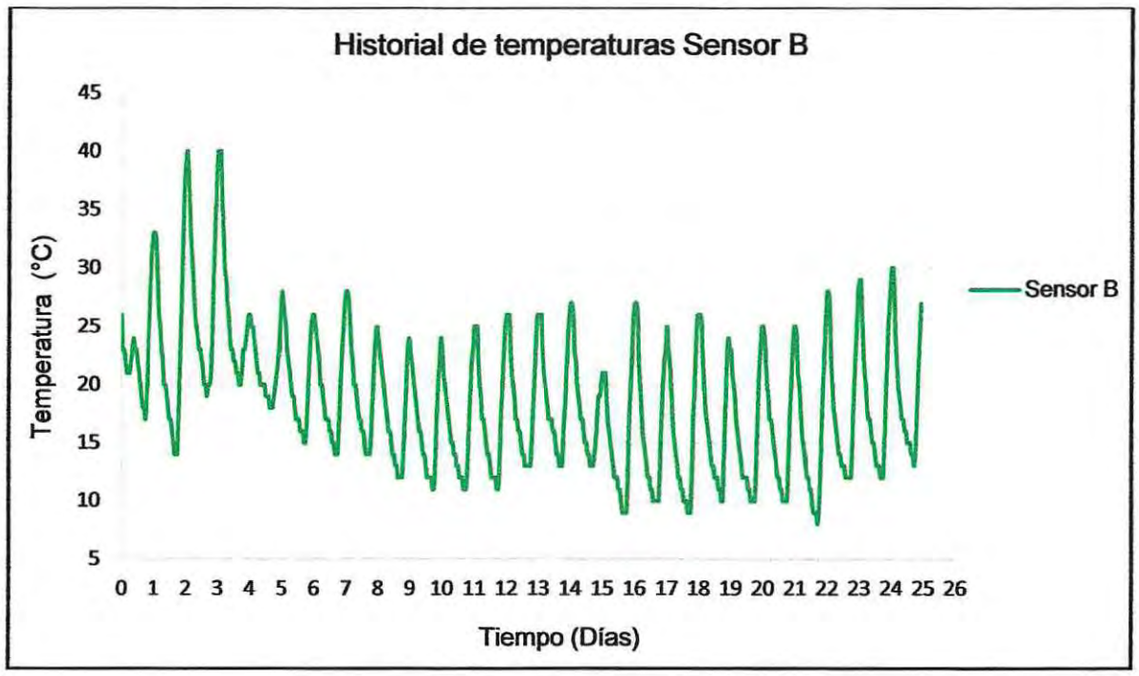

Figura 4.13 - Desarrollo de temperaturas Sensor B.

Del historial de temperatura obtenido en las figuras anteriores, el equipo IntelliRock II es capaz de calcular la madurez por sí solo, de esta manera, se evita calcular manualmente la madurez por las ecuaciones establecidas en el capítulo 2.

En la Figura 4.14 se muestra la evolución de madurez de los sensores A y B entregada por el equipo, correspondiente a los días de la lectura realiza.

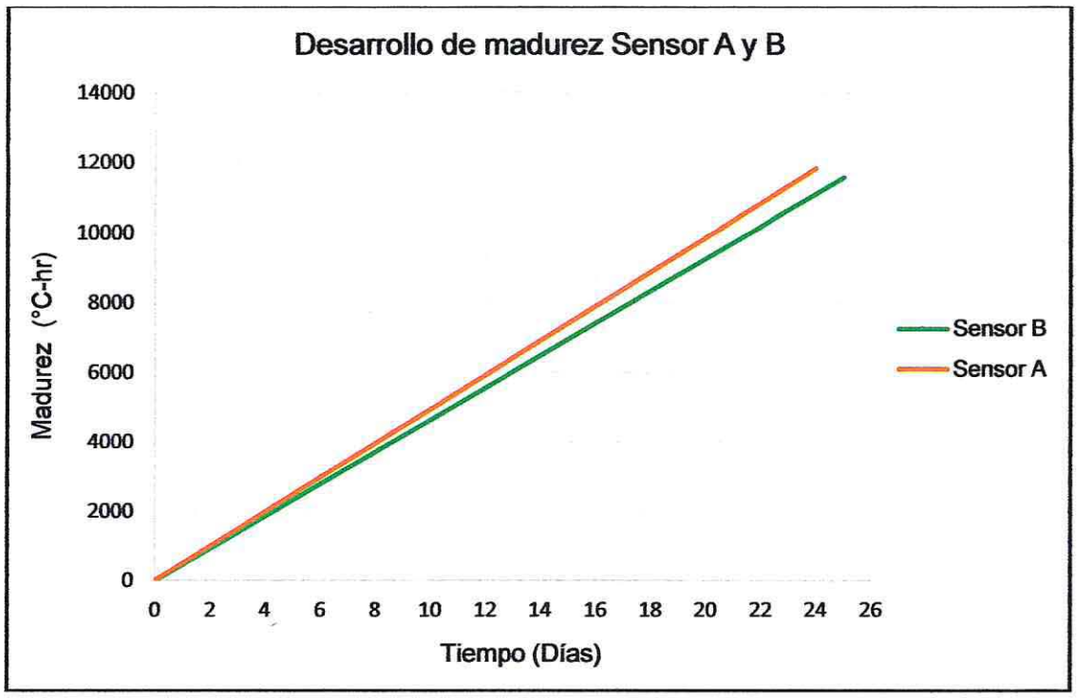

Figura 4.14 - Evolución de índice de madurez sensor Ay B.

A partir de los resultados de madurez obtenidos de los sensores A y B, se puede obtener la evolución de la resistencia de acuerdo a los resultados obtenidos en el ítem 4.3.1.2, correspondientes a la segunda temporada de trabajo. Para estimar la apertura a tránsito en estos tramos de pavimentos se utilizó la ecuación 4.6 de este capítulo.

Según los resultados obtenidos de estos sensores, los resultados de madurez mínima para la habilitación al tránsito son (2154 °C-hr):

Sensor A : A las 79 hs después del inicio del sensor, con una temperatura de 25 °C y una madurez de **2164 °C-hr** se obtuvo una resistencia de **3,76 MPa.**
Habilitación al tránsito al cuarto día de la fecha de pavimentación.

Sensor B : A las 87 hs después del inicio del sensor, con una temperatura de 21 °C y una madurez de **2168 °C-hr** se obtuvo una resistencia de **3,76 MPa.**
Habilitación al tránsito al cuarto día de la fecha de pavimentación.

Los resultados presentados más adelante, solo corresponderán a la madurez en el día de cumplimiento de apertura a tránsito y a la resistencia correspondiente para esta madurez, así comparar los resultados con la metodología tradicional de control de resistencia.

4.4.2 Control de resistencia en terreno mediante madurez

Una vez confeccionada y aprobada la curva de calibración de madurez que se usará como modelo para el control de resistencia en terreno del pavimento de hormigón, se puede proceder a registrar los valores de madurez proporcionados por los sensores incorporados en los pavimentos en estudio.

Para la obtención de los resultados de resistencia medidos en tiempo real en terreno, se trabajó con la ecuación resultante de la curva de calibración de la temporada 2 del LRV, descrita en el ítem 4.3.1.2 de este capítulo.

$$R\ (MPa) = 1{,}3674\ Ln\ [\ M\ (°C - hr)] - 6{,}7449 \qquad \text{Ecu. 4.6}$$

Se seleccionaron 42 sensores de distintos tramos de pavimentos confeccionados en el proyecto, las muestras corresponden a diferentes fechas de confección de pavimentos. Simultáneamente se tomaron muestras frescas correspondientes a los sectores de estudio, para así, contrastar los resultados obtenidos, con las resistencias determinadas con la metodología tradicional de control de resistencia en pavimentos de hormigón. El análisis de los resultados obtenidos se describirá en el capítulo 5.

El desarrollo de este trabajo se centra en la evolución de la resistencia en un pavimento de hormigón a temprana edad, es por esto, que los resultados obtenidos de los sensores de madurez, se centran en los 7 primeros días de la confección de un pavimento. Otra razón para el estudio en los primeros 7 días, es que con el método tradicional de control de resistencia, las muestras tomadas del hormigonado de un tramo de pavimento se ensayan a los 7 días, si estas cumplen con el 75% de la resistencia requerida, se puede habilitar el pavimento al tránsito vehicular.

Con los datos de madurez tomados en terreno, se puede estimar la resistencia para los días estudiados. Con el equipo de madurez se pueden obtener datos del historial de temperatura de una muestra, como también, el desarrollo de la madurez; al incorporar estas variables en la ecuación 4.6 se obtiene directamente la resistencia del pavimento. Los sensores de madurez se pueden programar para elegir los intervalos de registro de datos según se requiera, en este trabajo, los sensores fueron programados para registrar datos cada 1 hora.

Al conectar el equipo al sensor, se puede guardar la información para que una vez desconectado el sensor, los datos queden en la memoria y se puedan manipular con tranquilidad; en cualquier momento se puede volver a conectar el sensor al equipo, y volver a realizar el mismo procedimiento.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los sensores en las muestras estudiadas, en la Tabla 4.21 se destaca de color amarillo el día de cumplimiento de la madurez para la apertura a tránsito (2154 °C-hr), considerando la tensión de rotura mínima de 3,75 MPa.

Tabla 4.21 - Registro de índice de madurez tomado en terreno.

Muestra	Sector Muestreo	Madurez [°C-hr]				
		3 Días	4 Días	5 Días	6 Días	7 Días
1	95080-95140 Derecha	1820	2190	2356	2948	4051
4	95175-95200 Derecha	1945	2265	2403	2951	3878
7	95155-95200 Izquierda	1914	2249	2355	3396	3807
10	104741-104846 Izquierda	1963	2248	2319	3099	3932
15	104500-104560 Izquierda	1891	2187	2322	2997	3934
19	103707-103810 Derecha	1948	2244	2492	2825	3886
22	103830-103940 Izquierda	1900	2189	2423	2613	3786
23	103940-104015 Izquierda	1959	2244	2419	2838	3680
25	100890-100922 Izquierda	1862	2174	2326	2900	3886
26	104980-104996 Izquierda	2007	2236	2307	2617	3573
29	103700-103770 Izquierda	1898	2190	2333	2616	3592
31	100922-100982 Izquierda	1844	2264	2437	3423	3629
33	100982-101087 Izquierda	1868	2169	2432	2899	3666
34	101087-101184 Izquierda	1808	2266	2311	2708	4038
37	101262-101368 Izquierda	1247	2004	2183	2298	3443
41	104880-104980 Izquierda	1963	2177	2356	3195	3970
47	102602-102715 Izquierda	987	1798	2168	2459	3314
51	101462-101538 Izquierda	1113	1904	2214	2435	2752
55	101615-101671 Izquierda	1123	1853	2199	2561	3594
57	102695-102786 Derecha	1201	1992	2215	2478	2896
63	102740-102786 Derecha	1943	2268	2374	2605	4063
67	103400-103456 Izquierda	1545	2178	2376	2815	3686
74	102960-103029 Izquierda	1839	2163	2362	3394	3638
81	102290-102324 Izquierda	1286	2009	2221	2312	2797
83	100164-100232 Derecha	1169	1801	2169	2458	3157
89	102490-102525 Izquierda	1005	1406	1842	2155	2320
92	104440-104482 Derecha	967	1794	2210	2348	3013
96	104480-104528 Derecha	1364	1869	2184	2520	3273
106	101343-101437 Derecha	1089	1903	2196	2349	2955
109	101437-101468 Derecha	1215	1863	2201	2497	3154
114	103817-103874 Derecha	1876	2253	2375	2996	3620
116	101637-101688 Derecha	1937	2259	2463	3193	3911
179	100592-100640 Izquierda	1891	2155	2459	3079	3875
180	96798-96874 Derecha	1624	2043	2212	2525	3143
181	99208-99276 Derecha	1493	1952	2211	2786	2995
182	96874-96925 Derecha	965	1608	1926	2199	2546
183	99276-99303 Derecha	1713	1973	2216	2780	3087
184	99303-99355 Derecha	879	1392	2047	2164	2420
185	96925-96975 Derecha	791	1006	1333	1969	2190
186	99355-99407 Derecha	715	1097	1477	2005	2201
187	96611-96670 Derecha	1592	1803	2232	2714	3133
188	99407-99504 Derecha	1871	2196	2641	3078	3916

En la Tabla 4.22 se muestran los resultados de resistencia obtenidos de las mediciones de madurez en terreno, se destaca la tensión de rotura a la flexotracción mínima, equivalente al 75% de 5 MPa.

Tabla 4.22 - Resultados de resistencia en terreno de muestras en estudio.

Muestra	Sector Muestreo	Resistencia [MPa]				
		3 Días	4 Días	5 Días	6 Días	7 Días
1	95080-95140 Derecha	3,52	3,77	3,87	4,18	4,61
4	95175-95200 Derecha	3,61	3,82	3,90	4,18	4,55
7	95155-95200 Izquierda	3,59	3,81	3,87	4,37	4,53
10	104741-104846 Izquierda	3,62	3,81	3,85	4,25	4,57
15	104500-104560 Izquierda	3,57	3,77	3,85	4,20	4,57
19	103707-103810 Derecha	3,61	3,81	3,95	4,12	4,56
22	103830-103940 Izquierda	3,58	3,77	3,91	4,01	4,52
23	103940-104015 Izquierda	3,62	3,81	3,91	4,13	4,48
25	100890-100922 Izquierda	3,55	3,76	3,86	4,16	4,56
26	104980-104996 Izquierda	3,65	3,80	3,84	4,02	4,44
29	103700-103770 Izquierda	3,58	3,77	3,86	4,02	4,45
31	100922-100982 Izquierda	3,54	3,82	3,92	4,38	4,46
33	100982-101087 Izquierda	3,56	3,76	3,92	4,16	4,48
34	101087-101184 Izquierda	3,51	3,82	3,85	4,06	4,61
37	101262-101368 Izquierda	3,00	3,65	3,77	3,84	4,39
41	104880-104980 Izquierda	3,62	3,76	3,87	4,29	4,59
47	102602-102715 Izquierda	2,68	3,50	3,76	3,93	4,34
51	101462-101538 Izquierda	2,85	3,58	3,79	3,92	4,09
55	101615-101671 Izquierda	2,86	3,54	3,78	3,99	4,45
57	102695-102786 Derecha	2,95	3,64	3,79	3,94	4,15
63	102740-102786 Derecha	3,61	3,82	3,88	4,01	4,62
67	103400-103456 Izquierda	3,30	3,77	3,88	4,12	4,48
74	102960-103029 Izquierda	3,53	3,76	3,88	4,37	4,47
81	102290-102324 Izquierda	3,04	3,65	3,79	3,85	4,11
83	100164-100232 Derecha	2,91	3,51	3,76	3,93	4,27
89	102490-102525 Izquierda	2,71	3,17	3,54	3,75	3,85
92	104440-104482 Derecha	2,65	3,50	3,79	3,87	4,21
96	104480-104528 Derecha	3,13	3,56	3,77	3,96	4,32
106	101343-101437 Derecha	2,82	3,58	3,78	3,87	4,18
109	101437-101468 Derecha	2,97	3,55	3,78	3,95	4,27
114	103817-103874 Derecha	3,56	3,81	3,88	4,20	4,46
116	101637-101688 Derecha	3,60	3,82	3,93	4,29	4,57
179	100592-100640 Izquierda	3,57	3,75	3,93	4,24	4,55
180	96798-96874 Derecha	3,36	3,68	3,79	3,97	4,27
181	99208-99276 Derecha	3,25	3,62	3,79	4,10	4,20
182	96874-96925 Derecha	2,65	3,35	3,60	3,78	3,98
183	99276-99303 Derecha	3,44	3,63	3,79	4,10	4,24
184	99303-99355 Derecha	2,52	3,15	3,68	3,76	3,91
185	96925-96975 Derecha	2,38	2,71	3,09	3,63	3,77
186	99355-99407 Derecha	2,24	2,83	3,23	3,65	3,78
187	96611-96670 Derecha	3,34	3,51	3,80	4,07	4,26
188	99407-99504 Derecha	3,56	3,78	4,03	4,24	4,57

En la Figura 4.15 se muestra gráficamente el desarrollo de la resistencia de algunas de las muestras en estudio, para visualizar de mejor manera, la evolución de la resistencia en un pavimento de hormigón, controlado por la metodología de madurez.

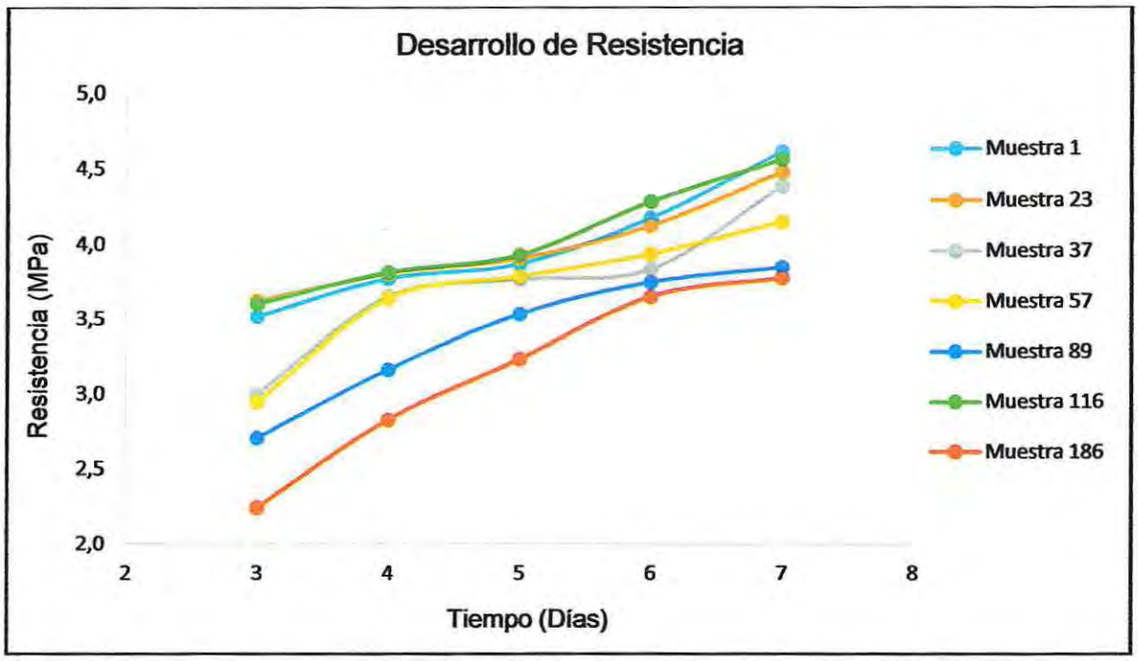

Figura 4.15 - Progreso de renitencia en terreno de diferentes muestras.

Es importante para el correcto control de la resistencia en un pavimento de hormigón mediante esta metodología, tener especial cuidado con los sensores de madurez incorporados en el pavimento. En la Figura 4.16 se muestra un sensor después de una lectura, el cual no presentó ningún cuidado.

Figura 4.16 - Muestra de sensor de madurez luego de lectura en terreno.

Para efectuar una correcta evaluación de esta metodología en el control de resistencia, se deben comparar los resultados obtenidos, con el método actual de control de resistencia estipulado por el MC. De un total de 186 muestras obtenidas en distintos tramos de pavimento, se seleccionaron las muestras correspondientes a los registros de madurez anteriormente descritos. Para la evaluación efectuada en este trabajo, se consideraron las resistencias obtenidas en día 7, para luego compararlas con las resistencias obtenidas por madurez. Los valores se encuentran disponibles en el Anexo A.3.

CAPÍTULO 5

Análisis de Resultados

5.1 Dosificación y diseño de la mezcla de hormigón

Uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de este trabajo, es el análisis de los resultados presentados en el capítulo anterior, la evaluación final del control de resistencia en pavimentos de hormigón mediante la aplicación de la metodología de madurez, depende de cómo son interpretados los resultados obtenidos, y cómo se comportan en comparación al método actual de control de resistencia establecido en el manual de carreteras.

De acuerdo a los resultados mostrados en el ítem 4.2 del capítulo 4, se definió el diseño de la dosificación para el hormigón utilizado en los pavimentos del contrato Reposición Ruta 60-CH. El diseño de la mezcla fue presentado por la empresa constructora y se estudiaron todas las características correspondientes al hormigón a utilizar.

Para que la dosificación propuesta por la empresa sea utilizada en los hormigones de la obra, se debe visar el diseño de la dosificación presentada. En este trabajo se realizaron dos verificaciones a la dosificación en estudio, de esta manera, certificar que las propiedades del hormigón utilizado en la constitución en los pavimentos del proyecto no sufrió alteraciones o cambios que pudieran alterar la confiabilidad de los resultados evaluados.

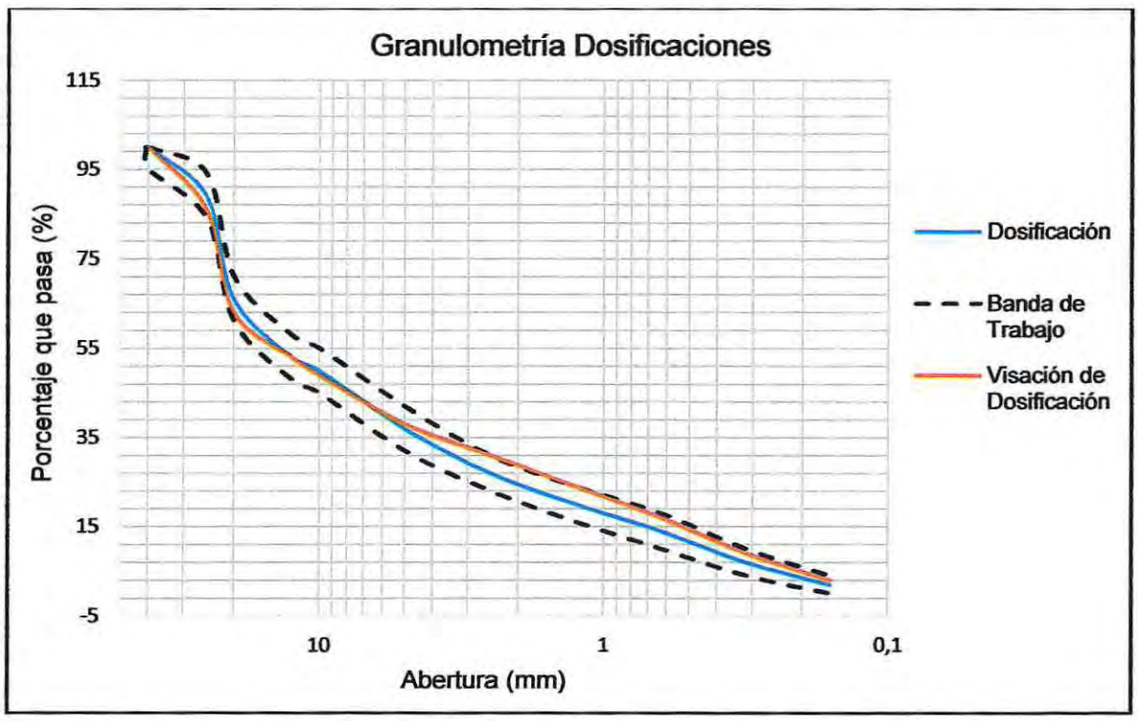

Figura 5.1 - Granulometría de dosificaciones analizadas.

Como se muestra en la Figura 5.1, tanto la dosificación de diseño de la mezcla de hormigón, como la segunda visación efectuada en este trabajo, se encuentran dentro de los rangos de la banda de trabajo propuesta por la empresa; como resultado, las características de los áridos correspondientes a la mezcla de hormigón estudiada es aceptada.

En la primera verificación de la dosificación propuesta (4.2.2.1), se observaron que algunos parámetros de los áridos analizados no cumplían con el diseño presentado en el ítem 4.2.2. Se observaron alteraciones en la mezcla de grava 1 ½", por lo que ésta quedó fuera de banda y no se logró analizar la mezcla de todos los componentes del diseño de la mezcla de hormigón estudiado. Esta visación de la dosificación se desestimó, como resultado se realizó una segunda verificación de la mezcla de hormigón.

Como resultado de la primera verificación descrita anteriormente, se procedió a efectuar un segundo análisis de la mezcla de dosificación presentada por la empresa constructora (4.2.2.2); en el desarrollo de esta segunda verificación, se tomaron precauciones adicionales para disminuir los errores presentes en la primera visación. Los resultados obtenidos en esta verificación, permiten validar la dosificación presentada por la empresa constructora para la confección del hormigón a utilizar en el proyecto; el análisis de los áridos estudiados es aceptable y corresponde a las características presentadas en el ítem 4.2. Por otro lado, los resultados obtenidos son idénticos a los establecidos en la dosificación de diseño.

Simultáneamente con el análisis de las características de los materiales de la mezcla de hormigón en estudio, se confeccionó un hormigón de prueba para estimar la resistencia de la mezcla de hormigón; los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.15 del ítem 4.2.2.2. La proyección a los 90 días de la resistencia obtenida permite visar por completo, la dosificación de diseño de la mezcla de hormigón estudiada, como resultado, el hormigón se puede utilizar en obra y efectuar los trabajos de pavimentación del contrato Reposición Ruta 60-CH.

Para asegurar que los resultados de resistencia obtenidos por medio de la madurez sean totalmente confiables, es importante realizar controles permanentes a la dosificación utilizada en la obra; cualquier variación en la mezcla de hormigón, invalida la curva de calibración de madurez utilizada para el control de resistencia de pavimentos de hormigón. Tomar muestras frescas en terreno, como analizar las caracterizas del hormigón, son procedimientos factibles para el correcto control de la mezcla de hormigón utilizada (Figura 5.2).

Figura 5.2 - Preparación de muestras frescas en terreno.

5.2 Curva de calibración de madurez

De los resultados presentados en el ítem 4.3 del capítulo 4, los cuales corresponden al desarrollo de la curva de calibración de madurez utilizada en este trabajo, para el control de resistencia en terreno de los pavimentos de hormigón confeccionados en el proyecto en estudio; se analizaron las diferencias entre las curvas de madurez obtenidas en este estudio en conjunto con el LRV, y las curvas de calibración de madurez obtenidas por la empresa constructora.

De los resultados obtenidos en la primera temporada de trabajo, se confeccionaron curvas de calibración de madurez por parte de la empresa constructora del proyecto en estudio, y el organismo fiscalizador (LRV). Para poder comparar ambas curvas, como se describió en el capítulo 4, para que la curva de madurez presentada por la constructora sea aceptada, debe cumplir dentro de los rangos ± 10% de la curva obtenida por el LRV.

En la Tabla 5.1 se muestra los valores de resistencia obtenidos, manteniendo la madurez asociada a los días de ensaye para establecer el rango de ± 10% de la curva LRV y comparar las dos curvas obtenidas.

Tabla 5.1 - Resistencias obtenidas según ± 10% curva de madurez LRV-T1.

Edad [días]	Resistencia [MPa]	Resist. (MPa) [+10%]	Resist. (MPa) [-10%]
2	3,0	3,2	2,7
3	3,7	4,0	3,3
5	3,4	3,7	3,0
7	4,3	4,7	3,9
9	4,7	5,1	4,2
14	4,7	5,1	4,2
21	5,5	6,0	4,9
28	5,1	5,6	4,6

A partir de los resultados obtenidos en la tabla anterior, se graficó la curva de calibración del LRV con su respectivo rango de ± 10%, dentro de este gráfico se incorpora la curva de madurez obtenida por la empresa constructora (Figura 5.3).

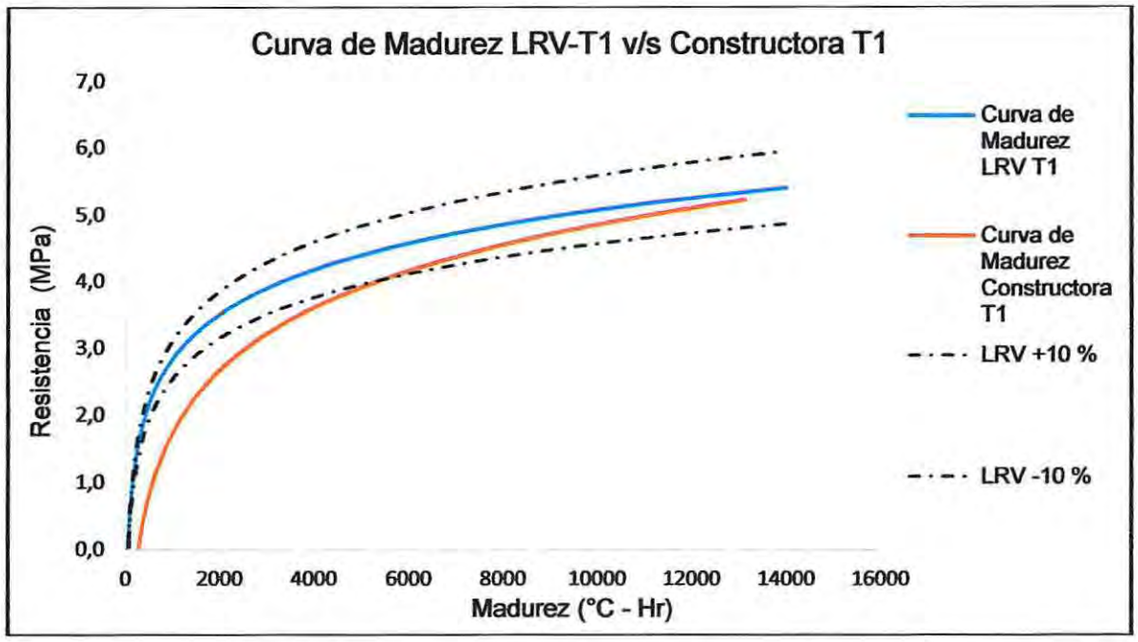

Figura 5.3 - Comparación de curva de madurez constructora vs LRV temporada 1.

Se puede apreciar en la figura anterior, que la curva de calibración de madurez obtenida por la empresa constructora, está fuera del rango de aceptación del organismo fiscalizador (LRV), como resultado, la curva de calibración de madurez de la constructora se rechaza, y se debe realizar otra curva de madurez para efectuar el control de resistencia en los pavimentos del proyecto.

Uno de los factores de la variación entre estas dos curvas de calibración de madurez, se debe que en la primera temporada de trabajo se confeccionaron estas curvas de madurez según lo estipulado la norma ASTM C 1074; como es una norma general para el control de resistencia en hormigones, hay procedimientos y pasos en la metodología de control de madurez en pavimentos de hormigón, que no están descritas o no se toman en cuenta. Como no existe experiencia en la implementación de esta metodología de control de resistencia, como también, la no existencia de algún procedimiento o norma que regule esta práctica en Chile, el control por resistencia a través de la metodología de madurez no se efectuó en la primera temporada de trabajo, ya que se desestimó la curva de calibración presentada por la constructora.

En la segunda temporada de trabajo del contrato Reposición Ruta 60-CH, se tomaron precauciones de acuerdo a la experiencia obtenida en la primera temporada. Se estableció una metodología única de control de resistencia en pavimentos de hormigón, considerando la confección de la curva de madurez, esta metodología fue descrita en este trabajo en el capítulo 3.

En la Tabla 5.2 se muestran los valores de resistencias obtenidos, para los días de ensayes estipulados en la confección de la curva de calibración de madurez utilizada en este trabajo (correspondiente al LRV), se estableció el rango de ± 10% de la curva LRV para poder efectuar la comparación de la curva obtenida por la constructora. El índice de madurez obtenido de acuerdo a las edades de ensayes, se mantuvieron iguales y se encuentran disponibles en el ítem 4.4 del capítulo anterior.

Tabla 5.2 - Resistencias obtenidas según ± 10% curva de madurez LRV-T2.

Edad [días]	Resistencia [MPa]	Resist. (MPa) [+10%]	Resist. (MPa) [-10%]
2	3,3	3,6	3,0
3	3,7	4,1	3,3
5	4,1	4,5	3,7
8	4,6	5,1	4,1
10	5,0	5,5	4,5
14	5,4	5,9	4,9
21	5,9	6,5	5,3
28	6,1	6,7	5,5

De los resultados obtenidos en tabla anterior se trazaron ambas curvas en un mismo gráfico, para analizar si la curva de calibración de madurez presentada por la empresa constructora, cumple con los requisitos establecidos de esta metodología de control de resistencia (Figura 5.4).

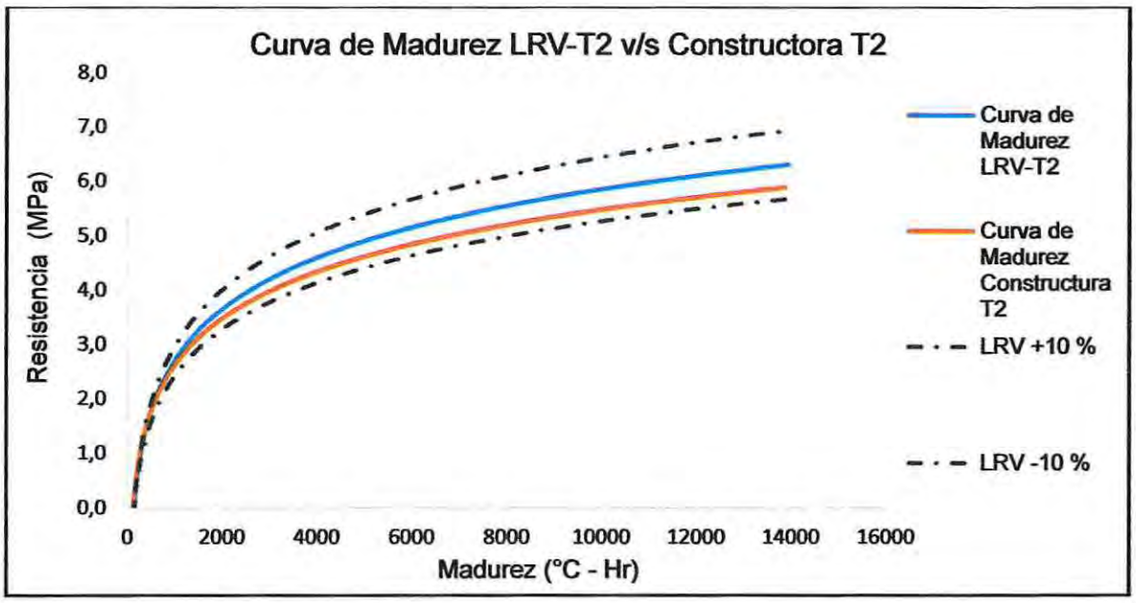

Figura 5.4 - Comparación de curva de madurez constructora vs LRV temporada 2.

De acuerdo a los resultados observados en la figura anterior, la curva de madurez presentada por la empresa constructora es aceptada, debido que se encuentra dentro de los rangos de aceptación establecidos en la metodología de madurez. Se aprecia una curva de similares características a la presentada en este estudio (LRV), con una tendencia menor, pero que se encuentra dentro ± 10% de la curva LRV.

Como las curvas comparadas cumplen con los requisitos estipulados, se puede efectuar el control de resistencia en los pavimentos de hormigón del proyecto en estudio, de esta manera realizar un control en terreno de la resistencia con mediciones reales, mediante la aplicación de la curva de madurez del LRV.

Para el control de resistencia en terreno se consideraron los parámetros establecidos en el ítem 4.4.2 del capítulo 4, el cual corresponde al control de resistencia en terreno por medio de la madurez.

Al comparar sólo las curvas de madurez obtenidas por la constructora, se aprecia que estás varían significativamente una de la otra, en todo el transcurso del desarrollo de la madurez (Figura 5.5).

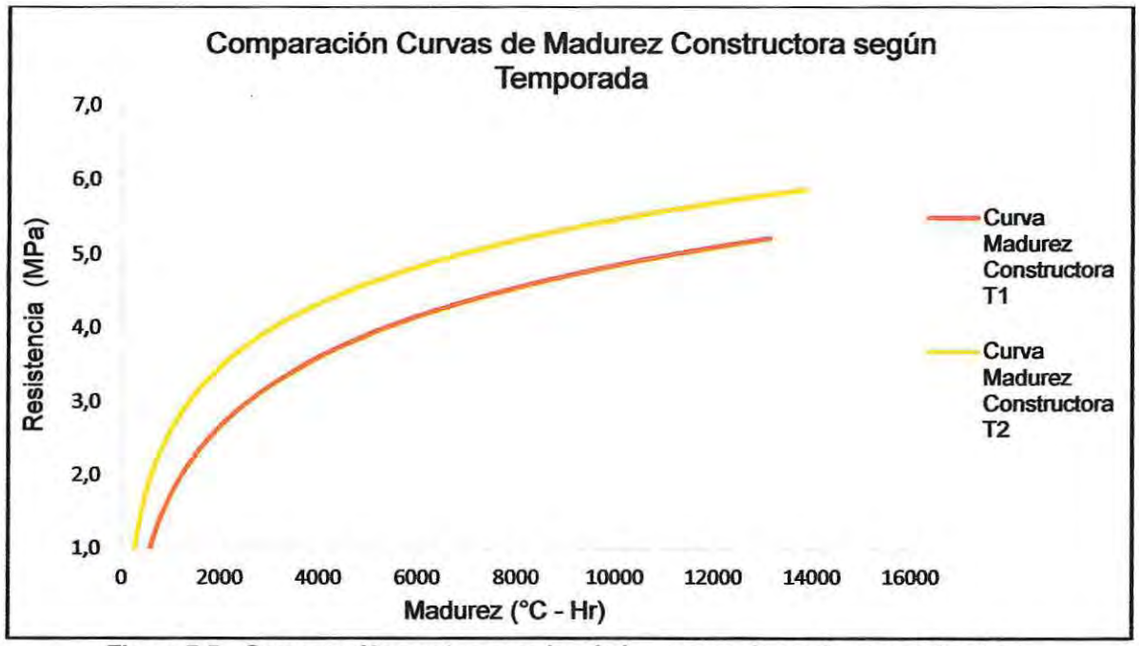

Figura 5.5 - Comparación por temporadas de las curvas de madurez constructora.

Al comparar las curvas obtenidas en el LRV en las dos temporadas, se observa que estas varían de forma significativa según se desarrolla el índice de madurez, al comienzo no presenta grandes variaciones significativas, los cambios se deben a que fueron constituidas con consideraciones diferentes de la metodología de madurez (Figura 5.6).

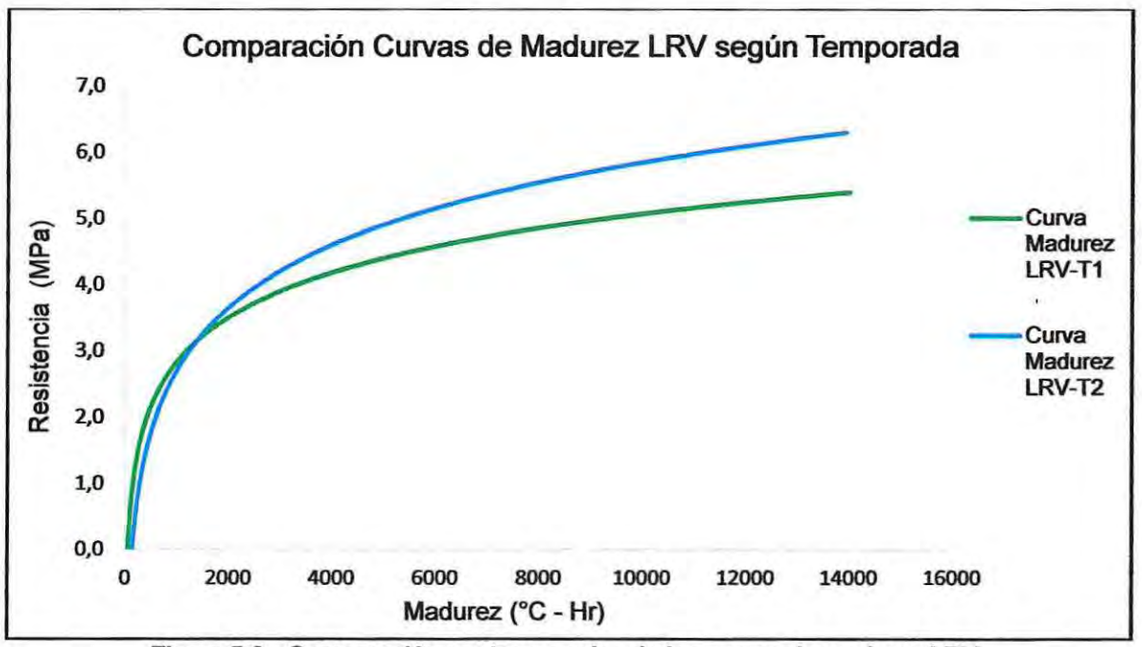

Figura 5.6 - Comparación por temporadas de las curvas de madurez LRV.

Al comparar todas curvas confeccionadas por parte de la constructora del proyecto en estudio, y el Laboratorio Regional de Vialidad; como se observa en la Figura 5.7, las tendencias obtenidas son parecidas, sin contar la curva realizada por la empresa constructora en la primera temporada de trabajo. Como se trabajó con la misma dosificación de hormigón durante el desarrollo del proyecto, las curvas de calibración solo presentan cambios significativos según avanza el desarrollo del índice de madurez (aumento de la resistencia).

Se estimó que la variación presente entre las curvas de la primera y segunda temporada, se debe que fueron constituidas en diferentes lugares geográficos y la elaboración del hormigón utilizado en las muestras de ensaye para las edades estipuladas, no fue la apropiada, producto que la mezcla de los componentes de la mezcla de hormigón no fue efectuada en una sola amasada, por lo que la mezcla no fue homogénea.

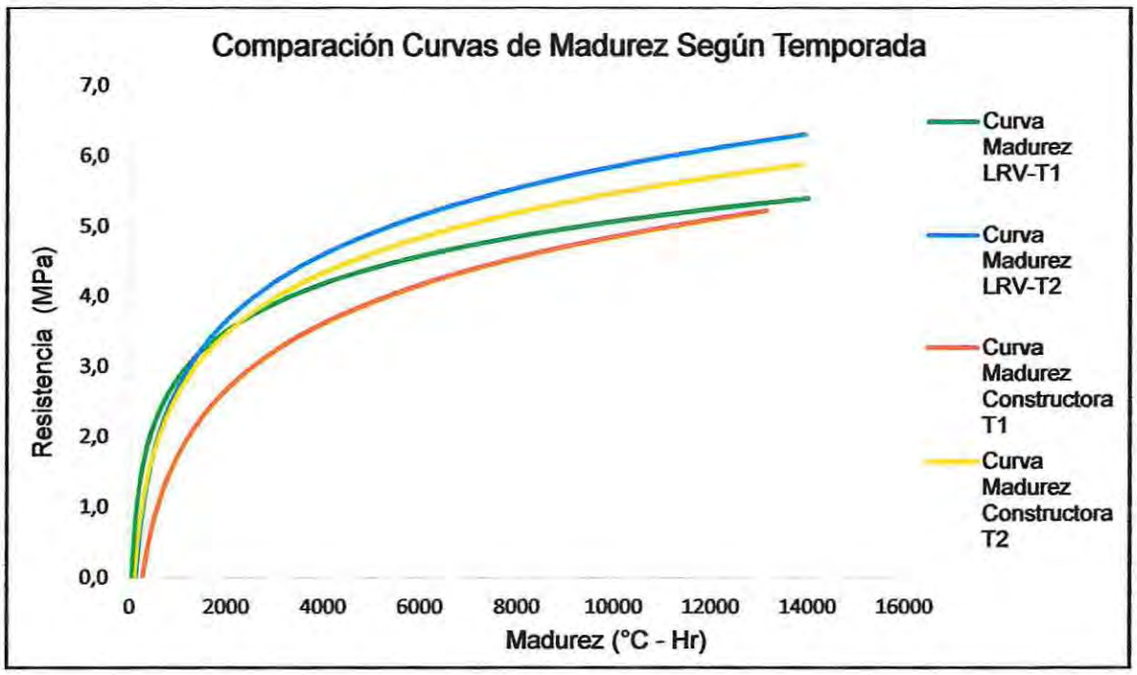

Figura 5.7 - Comparación general de las curvas de madurez estudiadas.

Para efectuar el control de resistencia en terreno a través de la aplicación de la metodología de madurez, se deben cumplir dos condiciones mínimas. Primero se debe verificar la dosificación presentada por la empresa constructora, así certificar las características y calidad del hormigón que se utilizará en la pavimentación del proyecto. Como segunda condición, la curva de calibración de madurez presentada por la empresa constructora, debe ser aceptada por el organismo fiscalizador, de esta forma, se asegura que el control efectuado por cualquiera de las curvas obtenidas, muestran valores representativos de los pavimentos estudiados.

5.3 Análisis de factores y variables en el control de resistencia mediante el método de madurez

De los resultados obtenidos en el registro del índice de madurez y el control de resistencia efectuado en terreno, los cuales fueron descritos en el ítem 4.4 del capítulo anterior; corresponde realizar un completo análisis de los resultados, para así, evaluar el uso de la metodología de madurez en control de resistencia en pavimentos de hormigón. Para obtener una adecuada evaluación, es necesario comparar los resultados obtenidos con la metodología actual de control de resistencia.

Dentro de los objetivos estipulados en este trabajo, se consideró identificar factores que puedan alterar la confiabilidad del control de madurez, como un método viable para el control de resistencia en pavimentos de hormigón en Chile. Considerando las variables involucradas en el desarrollo de madurez, se estudiaron las variables más significativas para la evaluación de este trabajo, las variables estudiadas son:

1. Temperatura.
2. Humedad.
3. Intensidad del viento.

Después de un análisis en las bases estipuladas en el contrato Reposición Ruta 60-CH, se decidió desestimar la variable de intensidad del viento, debido que uno de los requisitos del contrato era la utilización de un geotextil o manta térmica, que cubriera los pavimentos confeccionados por lo menos, en los primeros 7 días (Figura 5.8). Se determinó este requisito para la construcción de los pavimentos del proyecto, debido a la alta intensidad del viento presente en la zona de la obra, el cual puede producir figuración superficial en los pavimentos.

Como el recubrimiento en el pavimento a través de algún geotextil se consideró por lo menos en los primeros 7 días, la variable de intensidad del viento no afecta al desarrollo de la madurez en este proyecto en particular. El objetivo principal de la utilización de la metodología de madurez en el control de resistencia, es que permite estimar la resistencia real de un pavimento a edades tempranas, es por esto que se desestimó la intensidad del viento producto de las especificaciones especiales para este contrato.

Figura 5.8 - Manta térmica en tramo de pavimento del proyecto en estudio.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, las variables analizadas en el desarrollo de la madurez en este trabajo son la temperatura y la humedad. Para la obtención de estos factores, como se estipuló en los alcances de este trabajo, tanto la temperatura como la humedad, se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana.

La estación más cercana la cual contaba con los datos a estudiar en este trabajo, era la estación meteorológica privada Lagunitas, perteneciente a Codelco Chile, División Andina. Esta estación está ubicada a 10,5 km de la ubicación del contrato a una altura de 2791 metros sobre el nivel medio del mar. Se obtuvieron datos de temperatura, humedad, intensidad y dirección del viento; los datos otorgados fueron del año 2011 hasta mayo del 2014, con mediciones cada 10 minutos.

Uno de los factores observados en este trabajo, que afecta en el desarrollo de la madurez, es la manipulación inadecuada de los sensores de medición de madurez. Como no existe experiencia en la utilización de este método en el control de resistencia en pavimentos rígidos, en algunos casos se presentaron problemas con los sensores incorporados en los pavimentos. Dentro de las fallas encontradas, estuvo presente la incorrecta iniciación de los sensores de madurez, como también, problemas con la ubicación y registro de datos de los sensores. Cualquier alteración en los procedimientos establecidos en la metodología de madurez descrita en el capítulo 3, invalida el control de resistencia efectuado a través de la madurez.

En la Tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos para las muestras en estudio aplicando la metodología de madurez, se presenta el día de cumplimiento para la apertura a tránsito, considerando las condiciones mínimas de apertura establecidas en el ítem 4.4 del capítulo 4, junto al día de cumplimiento, se asocia la madurez obtenida y su respectiva resistencia.

Se decidió trabajar con los promedios de temperatura y humedad diarios presente en las muestras analizadas, debido que los datos máximos y mínimos de acuerdo a la temperatura y humedad, no reflejaban en su totalidad al desarrollo de la madurez en terreno. La temperatura y humedad establecida en la Tabla 5.3, corresponde a los días de cumplimiento de apertura a tránsito de las muestras estudiadas, es decir, si una muestra cumplió con los requisitos de apertura a tránsito al cuarto día, la temperatura y humedad promedio acorde a esa muestra, corresponde a los cuatro días anteriores a la fecha de cumplimiento de la muestra. De esta manera, se evaluará la influencia de la temperatura y humedad en las muestras en estudio, desde la confección del pavimento, hasta el día de cumplimiento para la apertura a tránsito.

Como se estableció en capítulo anterior, las condiciones mínimas para habilitar el tránsito de algún tramo de pavimento de hormigón en el contrato Reposición Ruta 60-CH son:

Resistencia mínima : 3,75 (MPa)
Madurez mínima : 2154 (°C-hr)

El total de muestras analizadas en este estudio, corresponde a 42 tramos de pavimento de hormigón del contrato Reposición Ruta 60-CH, los cuales pertenecen a diferentes fechas de confección en la temporada 2 del proyecto. La fecha de las muestras estudiadas corresponde a los periodos de febrero a mayo del 2013, y noviembre a diciembre del 2013. A continuación se presentan los resultados obtenidos, los cuales serán analizados en profundidad más adelante.

Tabla 5.3 - Resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de madurez.

Muestra	Cumplimiento apertura tránsito			Variables en estudio	
	Día	Madurez [°C - hr]	Resistencia [MPa]	T prom. [°C]	W prom. [%]
1	4	2190	3,77	11,1	45
4	4	2265	3,82	14,0	31
7	4	2249	3,81	15,2	50
10	4	2248	3,81	10,0	56
15	4	2187	3,77	11,1	47
19	4	2244	3,81	9,8	30
22	4	2189	3,77	13,2	21
23	4	2244	3,81	12,7	22
25	4	2174	3,76	13,1	19
26	4	2236	3,80	13,1	19
29	4	2190	3,77	12,3	26
31	4	2264	3,82	11,8	24
33	4	2169	3,76	11,3	22
34	4	2266	3,82	10,9	20
37	5	2183	3,77	11,1	19
41	4	2177	3,76	11,0	25
47	5	2168	3,76	9,2	26
51	5	2214	3,79	9,0	23
55	5	2199	3,78	9,5	27
57	5	2215	3,79	9,2	30
63	4	2268	3,82	9,1	29
67	4	2178	3,77	9,6	29
74	4	2163	3,76	11,9	26
81	5	2221	3,79	10,5	33
83	5	2169	3,76	8,6	39
89	6	2155	3,75	6,4	37
92	5	2210	3,79	6,9	25
96	5	2184	3,77	7,6	22
106	5	2196	3,78	6,9	33
109	5	2201	3,78	6,1	31
114	4	2253	3,81	9,3	16
116	4	2259	3,82	11,5	14
179	4	2155	3,75	9,3	32
180	5	2212	3,79	8,7	31
181	5	2211	3,79	8,7	31
182	6	2199	3,78	7,9	35
183	5	2216	3,79	7,2	36
184	6	2164	3,76	4,5	50
185	7	2190	3,77	5,2	47
186	7	2201	3,78	5,2	47
187	5	2232	3,80	5,5	49
188	4	2196	3,78	5,9	49

Se encuentra disponible en el Anexo A.4, la descripción completa de los datos mostrados en la Tabla 5.3, con los valores máximos y mínimos de la temperatura y humedad.

De los resultados presentados en la Tabla 5.3, se obtuvieron los parámetros estadísticos descritos en la siguiente tabla.

Tabla 5.4 - Variables estadísticas de los resultados obtenidos mediante la metodología de madurez.

Variable	Valor	Unidad
Temperatura máxima	15,2	[°C]
Temperatura mínima	4,5	[°C]
Temperatura promedio	9,5	[°C]
Humedad máxima	56	[%]
Humedad mínima	14	[%]
Humedad promedio	32	[%]
Madurez máxima	2268	[°C-hr]
Madurez mínima	2155	[°C-hr]
Madurez promedio	2207	[°C-hr]
Resistencia máxima	3,82	[MPa]
Resistencia mínima	3,75	[MPa]
Resistencia promedio	3,78	[MPa]

Al observar los valores obtenidos de la Tabla 5.4, se observa que la variación de temperatura entre la máxima y mínima de las muestras analizadas, es de **10,7 °C**. Al analizar la humedad, la diferencia existente es de **42%** entre los valores máximos y mínimos.

Si se comparan los valores de madurez y resistencias obtenidos, se observa que estos no varían significativamente, esto se debe, que se está analizando la fecha de cumplimiento en la apertura a tránsito de estos tramos de pavimento, por lo que los resultados deberían ser parecidos.

Para evaluar si el control de resistencia por medio de la madurez es válido en pavimentos de hormigón, se compararon los resultados obtenidos en la medición de madurez y control de resistencia en terreno, considerando los días de cumplimiento de las muestras con el total de muestras estudiadas, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.5 - Cumplimiento a la apertura a tránsito según días.

Día cumplimiento	N° Muestras	Cumplimiento
Día 4	22	52%
Día 5	15	36%
Día 6	3	7%
Día 7	2	5%

De tabla anterior, se graficaron los resultados para dimensionar de mejor manera el desarrollo de la madurez en los días de cumplimiento de las muestras estudiadas (Figura 5.9).

Figura 5.9 - Cumplimiento de apertura a tránsito según metodología de madurez.

Al analizar los días de cumplimiento con el total de las muestras en estudio, se observa que el **100%** de las muestras estudiadas cumplió antes del séptimo día, o el mismo séptimo día, con las condiciones de apertura a tránsito. Ahora si se considera la condición de apertura a tránsito a edades tempranas (3 a 5 días), el **88%** de las muestras estudiadas está en condiciones básicas de habilitación al tránsito vehicular, lo que replica la efectividad del control de resistencia realizado por este método.

Para comparar los análisis de resultados recién mostrados, se deben considerar los resultados obtenidos a partir del método tradicional de control de resistencia estipulado en el manual de carreteras. Estos resultados se encuentran disponible en el Anexo A.3, solo se consideró la resistencia obtenida en laboratorio al séptimo día, a fin de evaluar la cantidad de muestras que cumplían con las condiciones mínimas de apertura a tránsito.

Los mismos tramos en estudio considerados para el control de resistencia según la madurez recién descritos, fueron considerados para el control tradicional de resistencia. De un total de 42 muestras estudiadas los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Es importante mencionar que la recepción del hormigón utilizado en obra en la pavimentación de los tramos en estudio, como en la toma de muestras frescas para este trabajo, cumplió con las disposiciones exigidas en el inciso 5.401 del MC-V5 (asentamiento de cono, porcentaje de aire incorporado, compactación del hormigón, textura superficial).

Tabla 5.6 - Cumplimiento apertura a tránsito metodología tradicional según días.

Día cumplimiento	N° Muestras	Cumplimiento
7 Días	11	26%
Mayor a 7 Días	31	74%

Al igual que en el caso anterior, los resultados de la Tabla 5.6 se graficaron para describir de mejor manera el desarrollo de la resistencia obtenida con el método tradicional de control de resistencia en pavimentos de hormigón (Figura 5.10).

Figura 5.10 - Cumplimiento apertura al tránsito según metodología tradicional.

Como se observa en la figura anterior, de las 42 muestras en estudio, sólo el **26%** de ellas en el séptimo día, logro cumplir con las condiciones básicas de apertura a tránsito; esto considerando que las muestras fueron curadas en condiciones ideales en el laboratorio del proyecto, y no replican la evolución de las condiciones de los pavimentos estudiados.

Junto con las 42 muestras en estudio consideradas para la evaluación de la metodología de madurez en el control de resistencia, se analizaron un total de 186 muestras provenientes de diferentes tramos de pavimentos de la segunda temporada de trabajo, confeccionados para la evaluación de resistencia con el método actual vigente en el MC. Las muestras fueron analizadas a los 7, 14, 28 y 90 días, para este estudio solo se consideraron las muestras del día 7, debido que este trabajo se centra en apertura a tránsito en tempranas edades y con la metodología actual de control de resistencia, se puede obtener como mínimo una apertura a tránsito al séptimo día.

A continuación se presentan los resultados observados en las 186 muestras analizadas, según el método actual de control de resistencia.

Tabla 5.7 - Cumplimiento apertura a tránsito de muestras totales según metodología tradicional en días.

Día cumplimiento	N° Muestras	Cumplimiento
7 Días	68	37%
Mayor a 7 Días	118	63%

De manera gráfica se presentan los resultados obtenidos de la Tabla 5.7, en la Figura 5.11 se muestran los porcentajes de cumplimiento de los requisitos básicos para la apertura a tránsito.

Figura 5.11 - Cumplimiento al tránsito según muestras totales de metodología tradicional.

De acuerdos a los resultados obtenidos y la evaluación de las muestras en estudio, en comparación con las resistencias obtenidas por el método actual de control de resistencia. Se puede apreciar que la implementación de la metodología de madurez en control de resistencia en terreno, efectuado en los pavimentos en estudio del contrato Reposición Ruta 60-CH, es totalmente viable y recomendable.

Al comparar los resultados obtenidos por la metodología actual de control de resistencias, el 26% de las muestras en estudio cumplió con los requisitos, y el 37% del total de muestras obtenidas a partir de este método, cumplieron con lo especificado. El problema con estos resultados, es que no fueron obtenidos en terreno y en tiempo real, son resultados de laboratorio y no replican en nada las condiciones reales de los pavimentos analizados.

5.3.1 Efecto de la temperatura en el desarrollo de la madurez

Para poder efectuar un correcto análisis de los factores y variables involucradas en este trabajo, es necesario realizar un análisis estadístico. Según Montgomery, todo experimento o estudio realizado puede definirse como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identifica las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida (Figura 5.12). La planeación y realización de estudios y de los análisis de los datos resultantes, se efectúa a fin de obtener conclusiones válidas y objetivas.

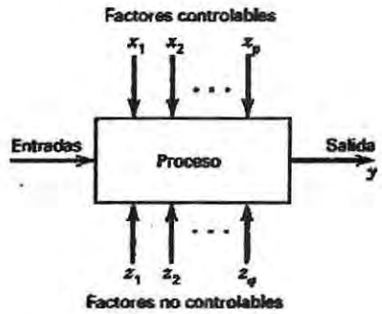

Figura 5.12 - Modelo general de un proceso o sistema.

Fuente: Diseño y Análisis de Experimentos, Douglas C. Montgomery, Universidad Estatal de Arizona, 2004.

En cualquier estudio, los resultados y las conclusiones que puedan obtenerse, dependen en gran medida de la manera en que se recopilaron los datos. En este trabajo se estudió la influencia de la temperatura y la humedad en el desarrollo de la madurez, así determinar cuál de estos factores pueden discrepar en la confiabilidad del control de madurez, como una metodología para el control de resistencia en pavimentos de hormigón. Para analizar los factores involucrados en el desarrollo de la madurez, se utilizó el análisis de varianza para probar si lo efectos de la temperatura y humedad influyen en el desarrollo de la madurez en este trabajo. El modelo de análisis de varianza, o ANOVA, corresponde a un modelo donde los predictores son categóricos, en estos casos, el modelo ANOVA más simple asume que el aporte de cada variable categórica sobre las medias de las observaciones es una constante, diferente para cada valor que pueda tomar dicha variable. La hipótesis evaluada es que los efectos de la temperatura y humedad afectan en el desarrollo de la madurez, si esta se cumple, entonces el factor encontrado será significativo; se consideraron dos factores para realizar el análisis de varianza.

Para entender de mejor manera la dispersión de los resultados obtenidos, los datos se graficaron en diagramas de caja para el desarrollo de la madurez según tramos de temperaturas establecidos en este estudio. También se muestran diagramas de dispersión de la temperatura y humedad según el desarrollo de madurez obtenidos en los cumplimientos de apertura a tránsito de las muestras estudiadas

A continuación se presentan los análisis efectuados a las muestras en estudio según la dispersión de temperatura y humedad en el desarrollo de la madurez.

Diseño y Análisis de Experimentos, Douglas C. Montgomery, pp. 1-7, 175-177.

Como se muestra en la Figura 5.13, la distribución de los datos de temperatura promedio de las muestras estudiadas, no refleja ninguna tendencia clara respecto al desarrollo de la madurez, como resultado, no es factible obtener un correcto análisis a partir de esta distribución. Los datos fueron obtenidos de los resultados presentados en la Tabla 5.3.

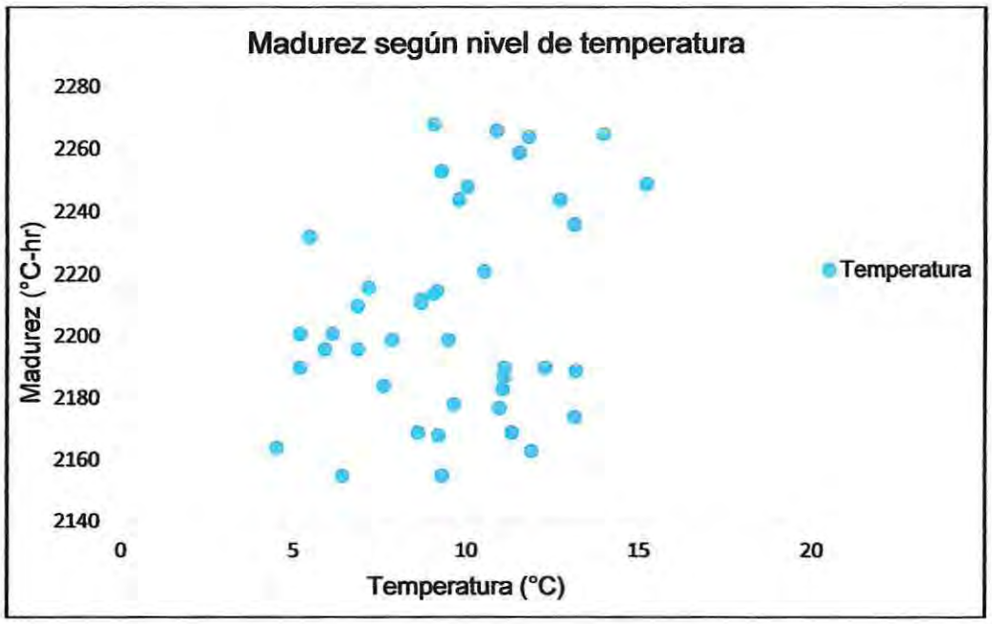

Figura 5.13 - Distribución del desarrollo de la madurez según el nivel de temperatura.

Para representar de mejor forma el desarrollo de la madurez según el nivel de temperatura, se establecieron tramos de temperatura para estudiar la dispersión de los resultados observados en la Tabla 5.3, según lo descrito, se establecieron los siguientes tramos:

1. Temperatura promedio entre 4 °C a 8 °C.
2. Temperatura promedio entre 8 °C a 13 °C.
3. Temperatura promedio entre 13 °C a 16 °C.

Estos tres tramos de temperatura promedio obtenidos de las muestras en estudio, ayudan a representar de mejor manera la distribución del desarrollo de madurez. Los tramos se establecieron teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos descritos en el ítem anterior.

En la Figura 5.14, se muestran los resultados de la distribución de la madurez según el nivel de temperatura, mediante los tramos establecidos.

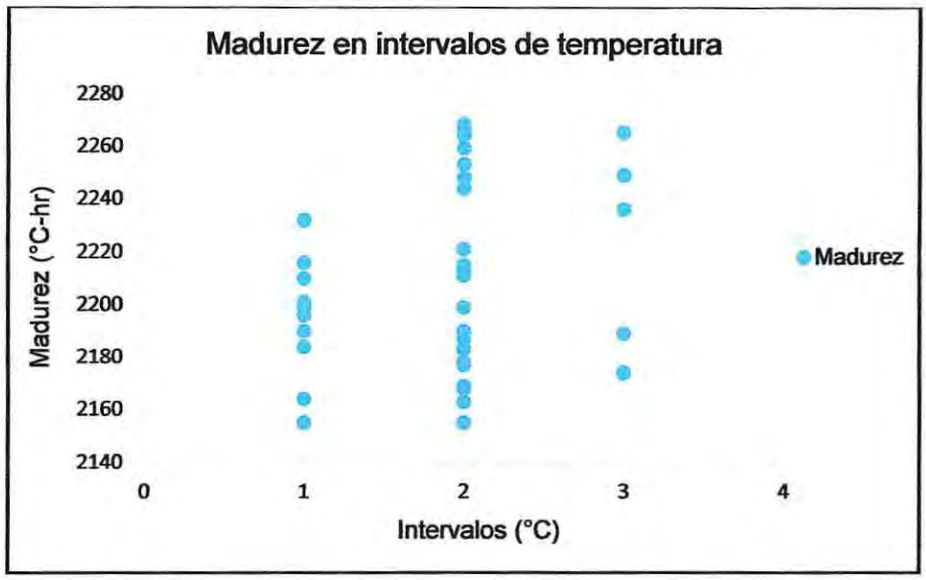

Figura 5.14 - Distribución del desarrollo de madurez según la temperatura en intervalos.

De la distribución por tramos de temperatura descrita anteriormente, se puede apreciar que los datos no muestran una tendencia clara. En el tramo 1, el promedio del índice de madurez es de 2195 (°C-hr), en el tramo dos, la madurez media es de 2210 (°C-hr), por último en el tercer tramo la madurez obtenida es de 2223 (°C-hr).

A partir de la distribución realizada anteriormente, se realizó un diagrama de cajas para representar de mejor forma los datos obtenidos y realizar un mejor análisis de los resultados (Figura 5.15).

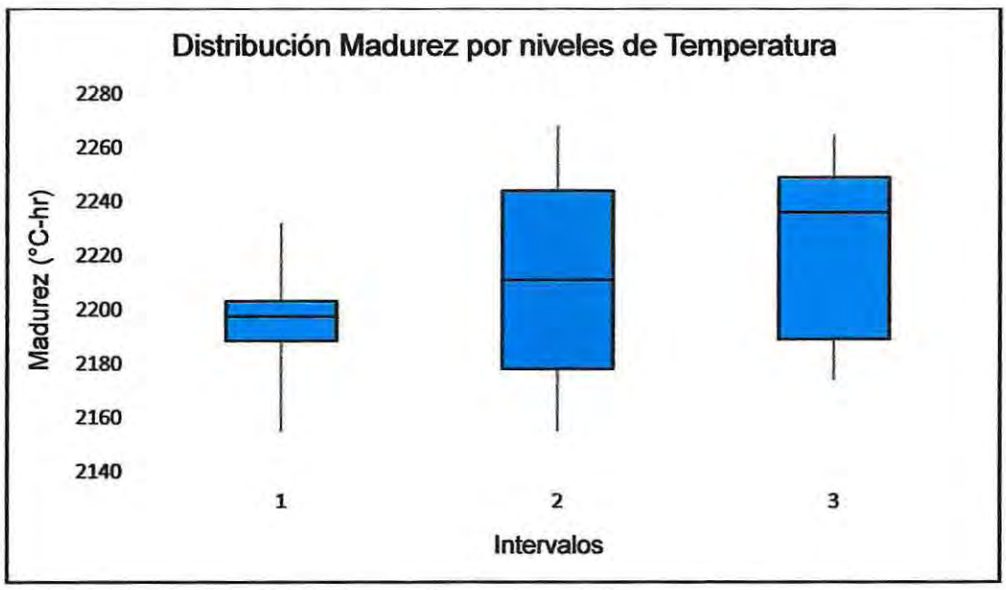

Figura 5.15 - Diagrama de cajas según distribución del desarrollo de madurez según el nivel de temperatura.

5.3.2 Efecto de la humedad en el desarrollo de la madurez

Al igual que el procedimiento descrito en el ítem anterior, se realizaron las mismas consideraciones en la distribución del desarrollo de la madurez, pero en este caso, considerando el nivel de humedad presente en las muestras estudiadas.

En la Figura 5.16 no se aprecia una tendencia clara de los valores del índice de madurez obtenidos, realizar un análisis a partir de esta distribución no es factible.

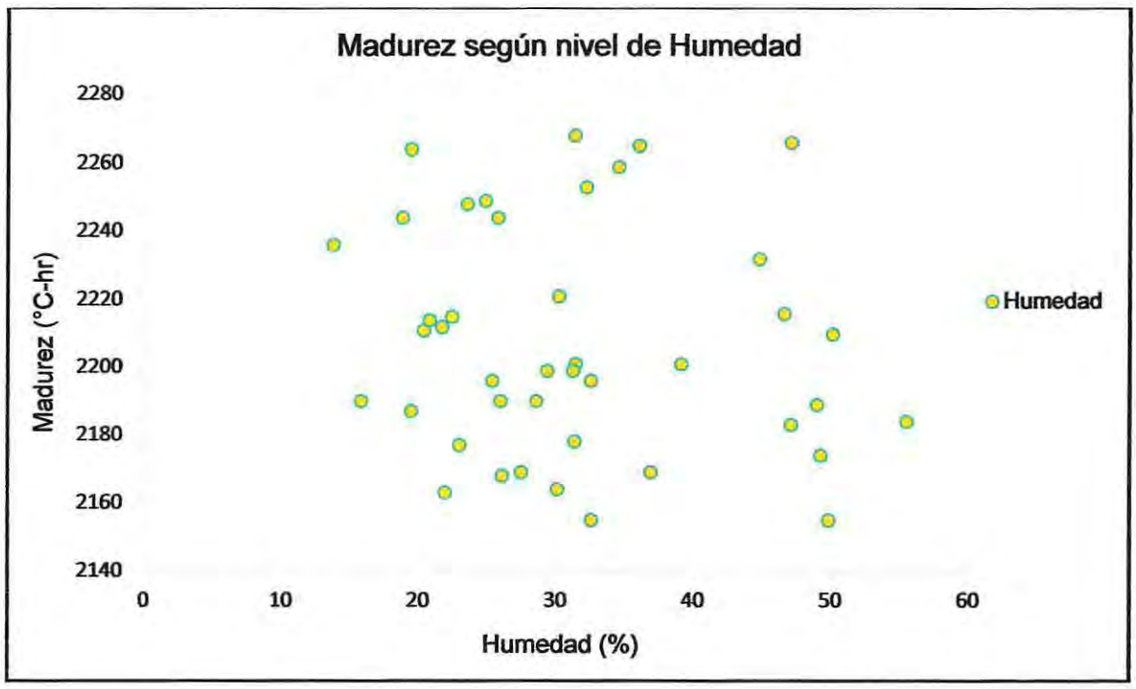

Figura 5.16 - Distribución del desarrollo de la madurez según el nivel de humedad.

Considerando que las muestras estudiadas no reflejan resultados claros, el índice de madurez obtenido se separó por tramos de porcentajes de humedad obtenido en la muestras. De esta manera, se representa de mejor forma la distribución de las muestras en estudio.

Los tramos de porcentaje de humedad establecidos son:

A. Humedad promedio entre 13% a 30%.
B. Humedad promedio entre 30% a 48%.
C. Humedad promedio entre 48% a 56%.

Para establecer estos intervalos de humedad promedio, se consideraron las máximas y mínimas correspondiente a los resultados de humedad promedio de las muestras estudiadas.

En la Figura 5.17 se muestra los resultados obtenidos de la separación del índice de madurez, en los tramos recién descritos de humedad promedio.

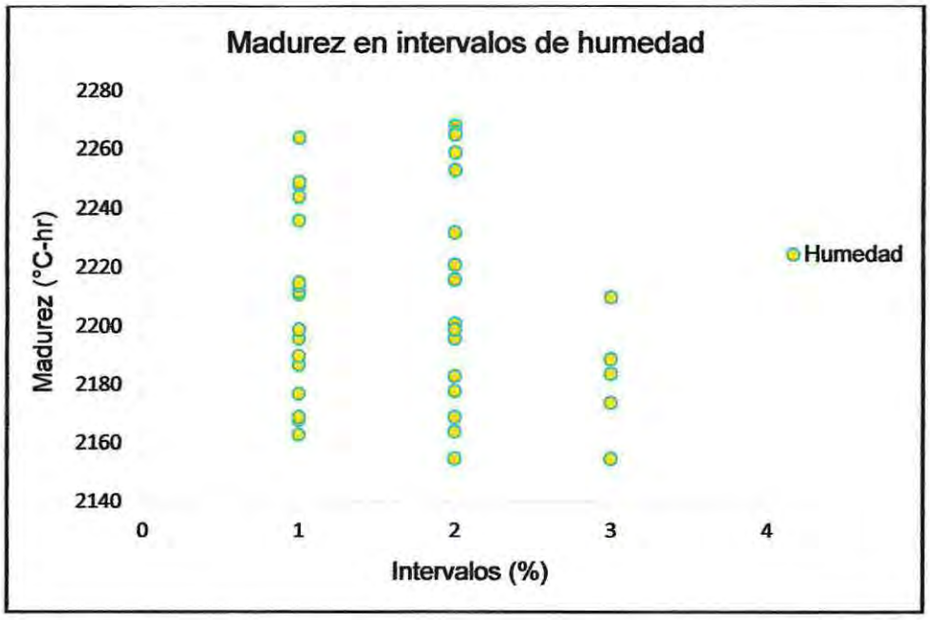

Figura 5.17 - Distribución del desarrollo de madurez según la humedad en intervalos.

Al observar la distribución obtenida en la Figura 5.17, no se aprecia una tendencia clara de los valores mostrados por medio de la separación por tramos de los resultados. El índice de madurez promedio obtenido en el tramo 1, es de 2209 (°C-hr), en el segundo tramo, el índice medio corresponde a 2199 (°C-hr), finalmente en el último tramo la madurez correspondiente es de 2182 (°C-hr).

Según la distribución obtenida en la Figura 5.17, se realizó un diagrama de cajas de las muestras en estudio para analizar de forma adecuada los resultados obtenidos (Figura 5.18).

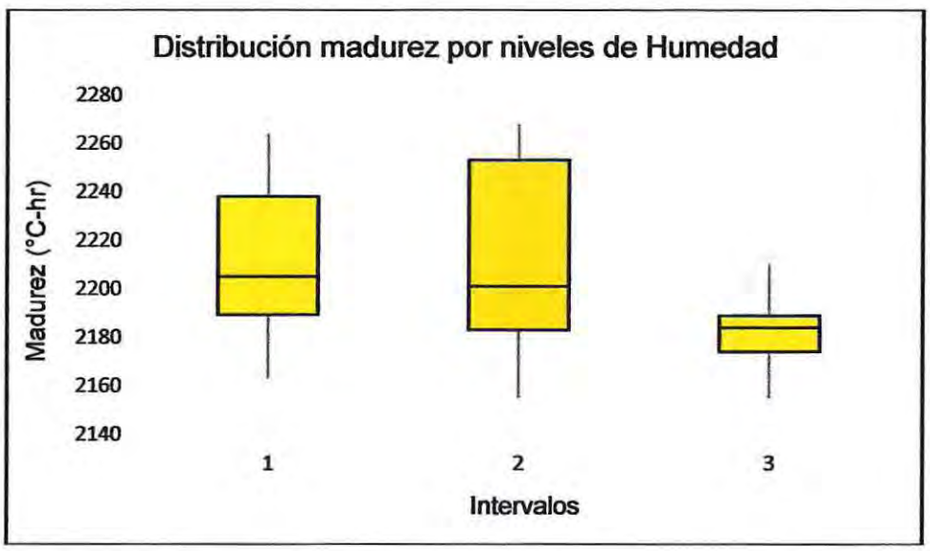

Figura 5.18 - Diagrama de cajas según distribución del desarrollo de madurez según el nivel de humedad.

5.3.3 Análisis de las variables involucradas en el desarrollo de la madurez

Considerando los resultados obtenidos anteriormente, en la Tabla 5.8 se presenta el análisis de varianza efectuado a las variables estudiadas.

Tabla 5.8 - Análisis de varianza en el desarrollo de madurez según los niveles de temperatura y humedad.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	F	F critico
Humedad (%)	3731	2	1865	1,9	3,284918
Temperatura (°C)	3055	2	1528	1,5	3,284918
Interacción T y W	6712	4	1678	1,7	2,658867
Error	32794	33	994	-	-
Total	46292	41	-	-	-

Respecto a los resultados obtenidos en la tabla anterior, el factor resultante de la interacción de ambas variables en estudio es menor que el factor crítico, como resultado no hay una interacción significativa entre el desarrollo de madurez, la humedad y temperatura de las muestras estudiadas. Por otro lado, al analizar sólo la temperatura, como $F_{2,27} = 1,9$, se concluye que la temperatura no es significativa dentro del desarrollo de la madurez; el mismo caso ocurre si se considera solo el factor de humedad en el desarrollo de la madurez.

Los resultados y comportamiento de las variables estudiadas en el análisis de varianza de las muestras, se puede deber a diversos factores propios del proyecto estudiado, este análisis será presentado en las conclusiones de este trabajo.

Con respecto a la distribución de las muestras en estudio, presentada en el ítem anterior, estas no reflejan una tendencia clara del comportamiento de la temperatura y humedad en el desarrollo de la madurez; pero si se puede apreciar la variabilidad de las muestras estudiadas, las conclusiones finales respecto a los resultados serán presentadas en siguiente capítulo.

El en Anexo C de este trabajo, se describen los parámetros y la metodología de trabajo del análisis de varianza de dos factores detallado en este ítem.

5.4 Análisis de factores propios del proyecto estudiado

Para efectuar un correcto control de resistencia en un pavimento de hormigón, a través de la aplicación del método de madurez, se deben considerar las condiciones descritas en el capítulo 4 de este trabajo. Al analizar los factores propios involucrados en el proyecto estudiado en este trabajo, se demuestra que esta metodología es aplicable a cualquier proyecto de pavimentación en hormigón.

El factor climático y ambiental analizado en este trabajo, no fue predominante para el desarrollo de la madurez en los pavimentos estudiados, debido que en el periodo climático extremo (mayo a septiembre) predominante de la zona, el proyecto se paralizó y no se efectuó ningún trabajo en obra por las condiciones ambientales presentes.

Otro de los factores predominantes en la zona geográfica de realización del proyecto, es la intensidad del viento, en este trabajo se desestimó este factor, debido que los pavimentos fueron cubiertos para evitar daños superficiales en las losas constituidas. Es importante señalar, que en cualquier otro proyecto de pavimentación en hormigón, se debe considerar esta variable, siempre que en sus bases no existan procedimientos que desestimen su influencia en el desarrollo de la madurez. El efecto del viento puede producir cambios en el desarrollo de la madurez según el espesor de la losa de pavimento, como resultado, las mediciones efectuadas en terreno pueden no ser representativas de las condiciones reales del pavimento producto de altas intensidades de viento.

Otro de los factores mencionados anteriormente, es la correcta manipulación de los sensores de madurez incorporados en los pavimentos. En el estudio de este trabajo, se presentaron problemas con las lecturas, colocación y mantenimiento de alguno de los sensores, producto que no existe experiencia en la implementación de esta metodología como control de resistencia de pavimentos de hormigón. Para realizar un adecuado control de resistencia mediante este método, se describió la metodología completa en el capítulo 3.

Los parámetros y recomendaciones generales en el proceso de control de resistencia en pavimentos de hormigón, que permiten la aplicación general de esta metodología en cualquier proyecto de pavimentación en hormigón, se describen en el capítulo 7.

5.5 Control de calidad del hormigón en obra mediante la madurez.

Uno de los aspectos más importantes de la implementación de la metodología de madurez en pavimentos de hormigón, es la capacidad de determinar la calidad del hormigón utilizado en obra. La metodología de madurez se utiliza para determinar la resistencia en terreno de un pavimento determinado, sin embargo, esta estimación de resistencia solo se basa en el historial de temperaturas y la relación de resistencia-madurez establecida para el pavimento. Considerando lo anterior, no existe garantía de que el hormigón utilizado en obra mantiene las características y la dosificación, con la cual se determinó la relación de resistencia-madurez para la mezcla de diseño de hormigón.

Es necesario controlar periódicamente la calidad del hormigón utilizado en la constitución de los pavimentos, de esta manera, se asegura que las características y dosificación de la mezcla de hormigón utilizado es la correcta. Si se asegura que el hormigón utilizado en obra, es el mismo que con el cual se estableció la relación de resistencia-madurez, se puede efectuar el correcto control de resistencia en terreno a través de madurez; cualquier alteración de la mezcla de hormigón utilizado, desestima la obtención de resistencias por medio de este método.

Para efectuar el control de calidad del hormigón en obra, en este trabajo se establecieron los siguientes paramentos:

Al momento de hormigonar un tramo de pavimento, en conjunto con la incorporación del sensor de madurez en el pavimento, se toma 4 muestras frescas de hormigón, las cuales se ensayaron a las edades de 3, 7 y 28 días. En una de las muestras, se incorporó un sensor de madurez para registrar el índice de madurez en las edades estipuladas.

Se analizaron los resultados considerando la curva de calibración de madurez utilizada para el control de resistencia; la relación resistencia-madurez fue establecida en base a la mezcla de hormigón visada.

En la Tabla 5.9 se muestran tres muestras de pavimentos, donde se realizó un control de calidad del hormigón colocado en terreno.

Tabla 5.9 - Control de calidad del hormigón de muestras de pavimento.

Muestra	Tramo	Edad (Días)	Madurez (°C - Hr)	Resistencia (MPa)
A	96523-96611 Derecha	3	2045	3,47
		7	3847	4,73
		28	13894	6,45
B	96210-96269 Derecha	3	1892	2,48
		7	4041	3,71
		28	13912	5,62
C	95235-95270 Derecha	3	2145	2,95
		7	4215	3,81
		28	13817	5,24

Para el análisis de los resultados observados en el Tabla 5.9 se considera la curva de calibración de madurez utilizada para el control de resistencia en los pavimentos del proyecto en estudio. Como se mencionó en los capítulos anteriores, esta curva de madurez, se elaboró a partir de la dosificación de diseño de la mezcla de hormigón presente en el capítulo 4. De acuerdo al control de calidad del hormigón efectuado en estos tramos de pavimentos, los resultados deberían estar dentro de los rangos aceptables, si las condiciones del hormigón utilizado mantienen las características del diseño de la mezcla de hormigón con la cual se trabajó. En la figura 5.19 se muestran los resultados de este análisis de control de calidad del hormigón.

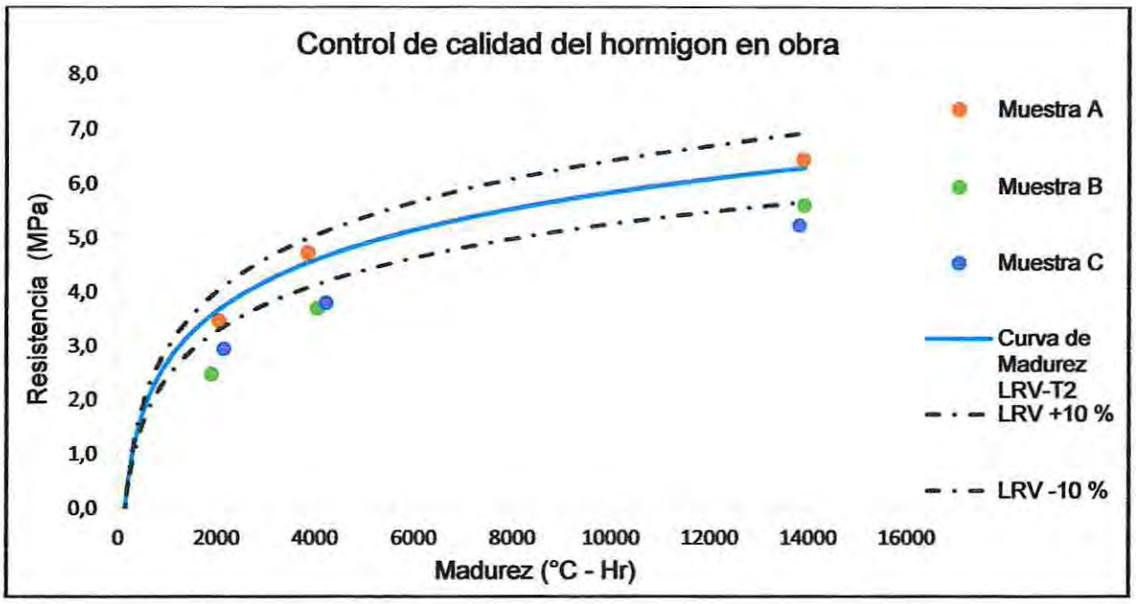

Figura 5.19 - Control de calidad pavimentos en estudio.

De acuerdo a los resultados observados en la figura anterior, al analizar la calidad de las muestras de hormigón tomadas en los tramos de pavimento en estudio, se considera:

El hormigón utilizado en la Muestra A correspondiente al sector 96523-96611 Derecha, corresponde al hormigón de diseño utilizado en este trabajo, como resultado, cumple con las características y mantiene la dosificación visada. La obtención de resistencias a partir de la curva de calibración de madurez, es totalmente representativa y los resultados obtenidos son confiables y seguros.

En la Muestra B, del tramo 96210-96269 Derecha, el hormigón cumple el día 28 con las especificaciones del hormigón, pero en el día 3 y 7 se encuentra fuera del rango de aceptación, como resultado, el hormigón utilizado para la pavimentación de este sector no cumple con las características del hormigón estudiado en el proyecto, y no es posible determinar la resistencia en terreno del pavimento, por medio de la curva de madurez.

Considerando los resultados de la Muestra C, se desestima totalmente la obtención de resistencia en el pavimento mediante madurez, debido que las características del hormigón estudiado, no cumple con la dosificación utilizada en el proyecto.

En el caso que la calidad del hormigón se encuentre sobre el rango de aceptación establecido para la curva de calibración de madurez utilizada, es posible obtener la resistencia del pavimento a través de madurez, debido que se está subestimando la resistencia real en terreno y los resultados obtenidos serán conservadores. Considerando que los resultados obtenidos serán aceptables para la calidad del hormigón, se puede utilizar la curva de madurez con seguridad, sin embargo, si se considera la representatividad exacta de los resultados y los costos asociados a la construcción del pavimento, la curva de madurez utilizada para determinar la resistencia del pavimento es desestimada, ya que no cumple con las características del hormigón estudiado.

Cualquiera de los casos en que la calidad del hormigón en obra, no cumpla con los rangos de aceptación de la curva de madurez, no será posible evaluar la resistencia del pavimento mediante la aplicación de la relación de resistencia-madurez obtenida. Se deberá revisar las características del hormigón y la producción de la planta premezcladora, de esta manera, identificar los factores que producen alteraciones en la dosificación de hormigón; si no es posible, se deberá realizar una nueva relación de resistencia-madurez y elaborar una nueva curva de calibración de madurez para las características del hormigón actual.

Según los análisis presentados anteriormente, la metodología de madurez permite establecer diferencias entre la curva de madurez utilizada en un proyecto y la calidad del hormigón utilizado en obra, así establecer si las partidas de hormigón de un pavimento, corresponden a las características solicitadas y estudiadas. De esta manera, se puede conocer a las 48 horas si el hormigón medido está dentro de los rangos aceptables, permitiendo controlar la variabilidad de dosificaciones de las empresas premezcladoras proveedoras del hormigón.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

En este trabajo se han presentado todos los aspectos asociados a la implementación de la metodología de madurez, en el control de resistencia en pavimentos de hormigón. Se efectuó un seguimiento y evaluación al contrato Reposición Ruta 60-CH, debido que no existe algún procedimiento o norma que regularice en Chile la aplicación de esta metodología, como resultado, era necesario evaluar esta metodología aplicada en terreno para obtener resultados concluyentes. Considerando los alcances establecidos para evaluar la aplicación del método de madurez en pavimentos de hormigón, en este capítulo se consideran los aspectos más importantes para describir los resultados obtenidos.

Las conclusiones y recomendaciones establecidas para la aplicación de esta metodología, combinan el estudio experimental descrito en este trabajo con fundamentos teóricos, los cuales facilitarán la aplicación al momento de implementar el método de madurez en cualquier proyecto de pavimentación en hormigón. En base a los resultados obtenidos, los cuales fueron descritos en los capítulos anteriores, como también, la bibliografía recopilada en este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- La ecuación obtenida a partir de la elaboración de la curva de calibración de madurez utilizada en este trabajo,

$$R\ (MPa) = 1{,}3674\ Ln\ [\ M\ (°C - hr)] - 6{,}7449$$

  puede ser utilizada, para determinar la resistencia en terreno a partir de mediciones directas de madurez en el pavimento del proyecto estudiado, teniendo especial cuidado, que las características y condiciones de la mezcla de hormigón utilizada en la pavimentación, se mantengan iguales y sin alteraciones; de no ser así, se debe establecer una nueva relación de resistencia-madurez para efectuar el control de resistencia en terreno.

  De acuerdo a lo observado en este trabajo, la madurez está directamente relacionada al desarrollo de la temperatura inicial de la resistencia, por lo tanto, no existe alguna función de madurez que pueda describir distintas mezclas de hormigón. Cada mezcla de hormigón tiene su propia relación de resistencia-madurez, en efecto, esta relación debe ser previamente desarrollada, para el correcto control de resistencia en pavimentos de hormigón.

- Con respecto a las resistencias obtenidas mediante la aplicación de la metodología de madurez, de las muestras en estudio, el **95%** de ellas cumplió antes del séptimo día con la condición mínima de apertura a tránsito de **3,75 MPa**. El **5%** restante, cumplió al séptimo día de efectuada la pavimentación. Al considerar que en el método tradicional se realizan ensayes a los 7 días de efectuado la pavimentación, para verificar si cumplen con el 75% de la resistencia máxima requerida; el **100%** de las muestras estudiadas cumplen con la apertura a tránsito en el séptimo día, a través de la aplicación del método de madurez.

- Al estudiar la apertura a tránsito a temprana edad (3 a 5 días), el **88%** de las muestras analizadas cumple con la resistencia mínima para la habilitación a tránsito, lo que significa un resultado altamente aceptable, en comparación con la metodología tradicional utilizada actuablemente.

Por otro lado, al comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de madurez, con los resultados obtenidos por medio del control actual de resistencia en pavimentos de hormigón; solo el **26%** de las muestras en estudio cumplió con las condiciones de apertura a tránsito, lo que difiere con el **100%** obtenido por la metodología de madurez. Si se considera solo el control tradicional de resistencia, de 186 muestras analizadas, sólo el **35%** de ellas cumple con las condiciones de apertura a tránsito en el séptimo día.

- La resistencia requerida para la apertura al tránsito en los pavimentos de hormigón obtenidas en este trabajo a través de la metodología propuesta, en casi la totalidad de los casos, se obtuvo a edades inferiores de las resistencias resultantes en laboratorio utilizando la práctica tradicional de control de resistencia, según los fundamentos teóricos recopilados en este trabajo, los resultados son los esperados, ya que las estimaciones se realizaron de forma segura con resultados óptimos y confiables.

- De acuerdo al análisis de varianza realizado a las variables estudiadas, los factores de humedad y temperatura, no afectan significativamente en el desarrollo de la madurez de las muestras estudiadas; la interacción de estas variables, tampoco resulta significativa en el desarrollo de la madurez. Al analizar la temperatura, la variación entre la temperatura máxima y mínima, es de **10.7 °C**, las temperaturas de las muestras estudiadas mantienen una tendencia constante y no representan cambios significativos en el desarrollo de la madurez.

  Los resultados obtenidos para el caso del nivel de humedad, la diferencia entre las humedades máximas y mínimas de las muestras estudiadas, corresponden al **42%**. El comportamiento del desarrollo de la madurez en las muestras analizadas, se debe que las condiciones climáticas y ambientales presentes en la ejecución del proyecto, fueron constantes, debido que el proyecto se paralizaba en época de invierno por las condiciones extremas presentes en zona geográfica.

- Donde se hallaron resultados significativos, fue en la variabilidad de las muestras según el nivel de temperatura y humedad. En el caso de la humedad, a medida que aumentaba la temperatura de las muestras estudiadas, la variabilidad de la madurez disminuía. Al analizar el factor de la temperatura, se concluyó que la variabilidad del desarrollo de la madurez de las muestras estudiadas, aumentaba a medida que el nivel de temperatura de las muestras era mayor.

- Otro de los factores que afecta el desarrollo de la madurez, el más susceptible a cambios o alteraciones que puedan poner en duda la confiabilidad de la madurez, es la manipulación errónea de los sensores de madurez. En este estudio, en los pavimentos donde se encontraron errores de manipulación de los sensores, se desestimó el uso del control de resistencia en el pavimento según la madurez

- Para la ubicación lateral de los sensores de madurez, se estableció la consideración de colocarlos **60 cm** alejados de los bordes exteriores de la losa, así evitar, que la influencia de la temperatura exterior cercana a la losa, altere los resultados y la madurez obtenida corresponda al desarrollo real de la resistencia del pavimento.

- En el desarrollo de este trabajo se implementó la metodología de madurez como una herramienta de control de calidad del hormigón utilizado en obra, de acuerdo a los resultados obtenidos, el método de madurez demostró ser una herramienta efectiva para evaluar la calidad de los hormigones utilizados en el proyecto estudiado. La metodología de madurez permite verificar cuando un hormigón colocado en obra, no corresponde al hormigón solicitado para la ejecución de un proyecto, de esta forma, cualquier variación o alteración proveniente de las plantas premezcladoras proveedoras de un proyecto se pude identificar en **48 horas** como mínimo, lo que permite al constructor tomar decisiones críticas en la ejecución del proyecto.

- De acuerdo a la metodología establecida en este trabajo para determinar el control de resistencias en pavimentos de hormigón mediante el método de madurez, es posible obtener resistencias en pavimentos de hormigón de manera confiable y segura, con resultados óptimos y totalmente representativos de las condiciones reales a las que son expuestos los pavimentos en terreno. A partir del desarrollo de este trabajo, se logró determinar una metodología única para ser implementada en cualquier proyecto de pavimentación en hormigón sin importar sus condiciones y características, así lograr un control efectivo del desarrollo de resistencias en los pavimentos.

CAPÍTULO 7

Comentarios y Recomendaciones

El uso de la curva de calibración de madurez obtenida en este estudio, es únicamente viable para las condiciones y desarrollo general del contrato "Reposición ruta 60-CH sector Juncal – Portillo (Tramo 4, DM. 95.000,00 – DM. 104.980,49), Comuna de Los Andes, provincia de Los Andes, Región de Valparaíso". Cualquier condición similar o con las mismas características del proyecto en estudio replicadas en otro contrato, no es condición necesaria para el uso de la curva de madurez obtenida.

La curva de calibración de madurez es única para una determinada dosificación de mezcla de hormigón, aplicando la metodología planteada en este trabajo, se puede constituir la curva de madurez para cualquier dosificación requerida, así establecer la relación de resistencia-madurez y efectuar el control de resistencia en pavimentos.

El método de madurez es una herramienta muy útil cuando se desea determinar la resistencia de cualquier pavimento de hormigón a edades tempranas y tardías, al utilizar esta metodología como control de resistencia, no se deben extraer testigos de los pavimentos ya confeccionados, por lo que no se alteran los elementos. También se obtiene el historial de evolución de la resistencia a través del tiempo sin efectuar un control permanente en terreno, esto se debe, que los sensores almacenan la información del desarrollo de la madurez de una muestra.

Uno de los parámetros más importantes en la aplicación de esta metodología, es el control periódico y constante de la dosificación utilizada en el diseño de la mezcla de hormigón, controlar los componentes y características de la mezcla utilizada, previene alteraciones que invaliden el control efectuado.

Para asegurar una lectura adecuada de los sensores de madurez, se requiere calcular el datum de temperatura establecido en la norma ASTM C1074, cuando exista la presencia de climas muy fríos o muy cálidos, con variaciones extremas de temperatura y humedad. De esta forma se asegura la obtención de resultados confiables.

Cuando se requiera, se puede utilizar más de un sensor de madurez incorporado al pavimento, para estimar con mayor precisión el índice de madurez, el resultado final de la muestra analizada, será el promedio de madurez de los sensores utilizados. Para evitar las fallas en los sensores como las encontradas en este trabajo, se recomienda utilizar la demarcación de los sensores de madurez con algún elemento contundente o señalética, de esta forma, se evita el daño de los sensores por las condiciones climáticas naturales de este tipo de obras, y los daños producidos por personas.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, la aplicación de esta metodología en el control de resistencia, es altamente recomendable, producto que determina de manera más eficiente y segura, la resistencia en pavimentos de hormigón en comparación con la metodología actual utilizada en el control de resistencia. Como no se cuenta con alguna norma en Chile que regule la aplicación de este método, se recomienda utilizar esta metodología en conjunto con los métodos tradicionales, así efectuar un control de calidad de los pavimentos estudiados, hasta que se regularice su aplicación.

Se puede optar por métodos destructivos o no destructivos, para validar la curva de calibración de madurez utilizada para el control de resistencia en pavimentos de hormigón. De acuerdo a las condiciones y características del proyecto, se puede utilizar alguno de los métodos descritos.

Para el desarrollo de cualquier país, las vías de conexión terrestres tienen gran importancia estratégica y económica, los altos costos asociados a la construcción de vías de calidad para la conectividad de un país, hacen que sea indispensable lograr disminuciones en los tiempos de construcción y mejoras en procesos de control de calidad. La evolución actual de los métodos de control de calidad en pavimentos de hormigón, hacen obsoleto los procedimientos de control de resistencia utilizados actualmente en Chile, por lo que se deben implementar nuevas metodologías para ser incorporadas en el Manual de Carreteras, de esta manera, controlar la calidad de los pavimentos de hormigón, en base a las condiciones reales a las cuales son expuestos al momento de su elaboración.

Referencias Bibliográficas

Aguilar, O., Rodríguez, W., y Sermeño, M., 2009, "Determinación De La Resistencia Del Concreto a Edades Tempranas Bajo La Norma Astm C 1074, En Viviendas De Concreto Coladas En El Sitio", Universidad De El Salvador, Facultad De Ingeniería Y Arquitectura El Salvador, pp. 81-107.

Ansari, F. and Luke, A., 1996, "High Early Strength Concrete for Fast-track Construction and Repair," Report to NJDOT, March 29.

Ansari, F., 1999, "Development of Maturity Protocol for Construction of NJDOT Concrete Structures", Final Report to New Jersey Deportation of Transportation.

Byfors, J., 1980, "Plain Concrete at Early Ages", Swedish Cement and Concrete Research Institute Report 3:80, 464 p.

Brown, T.L. and LeMay, H.E., 1988, "Chemistry: The Central Science", 4th Ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 494-498.

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

Carino, N. J., 1982, "Maturity Functions for Concrete", Proceedings, RILEM International Conference on Concrete at Early Ages (Paris), Ecole Nationale des Ponts et Chausses, Paris, Vol. I, pp. 123-128.

Carino, N.J., 1984, "The Maturity Method: Theory and Application", Journal of Cement, Concrete, and Aggregates (ASTM), Vol. 6, No. 2, Winter, pp. 61-73.

Carino, N. j., Tank, R. C. J., 1988, Amer. Concr. Inst. Title N°89-M21; March-April.

Carino, N.J., H.S y Voltz, C.K., 1991, "Early Age Temperature Effects on Concrete Strength Prediction by the Maturity Method, J. Amer. Concrete Inst".

Carino, N.J., 1992, "Recent Developments in Nondestructive of Concrete," in Advances in Concrete Technology, V.M. Malhotra, Ed., Energy, Mines and Resources, Ottawa, MSL 92-6(R), pp. 281-328.

Dalimier, M., Saade, J., y Fernández, L., 1999, "Primer Experiencia en Argentina con Recubrimientos Delgados de Hormigón en Habilitación Temprana: Procedimiento Constructivo, Control de Calidad y Evaluación Preliminar de su Desempeño", Buenos Aires, Argentina.

Haas, R., W. R. Hudson, And J. P. Zaniewski, Modern, 1993, "Pavement Management", Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.

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

Nurse, R. W., 1949, "Steam Curing of Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol. I, No. 2, 1949, pp. 79-88.

Nykanen, A., 1956, "Hardening of Concrete at Different Temperatures, Especially Below the Freezing Point, Proceeding, RILEM Symposium on Winter Concreteing", Danish Institute for Building Research Copenhagen, Session BII, Copenhagen.

Maltrolta, V. M., 1971, "Maturity concept and the Estimation of Concrete Strength, Information Circular IC 277, Department of Energy Mine resources, Canada.

McIntosh, J. D., 1949, "Electrical Curing of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 1, No. 1, January 1949, pp. 21-28.

Miranda, R., 2010, "Deterioros en Pavimentos Flexibles y Rígidos", Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia, Chile, pp. 1-14.

Morales, J., 2004, "Técnicas de rehabilitación de pavimentos de concreto utilizando sobre capas de refuerzo", Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Perú, pp. 3-9.

Pineda, M. Edgar, 1987, "Método de diseño y análisis comparativo de costos entre pavimentos rígidos y flexibles", Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, Guatemala.

Plowman, J.M, 1986, "Maturity and the Strength of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 8 (22), pp. 13-22.

Roy, D. M., and Idorn, G. M., 1982, "Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars and Concrete," Journal of the American Concrete Institute, Vol. 79, No. 6, November-December, pp. 444-457.

Saul, A. G. A., 1951, "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure," Magazine of Concrete Research, Vol. 2, No. 6, March, pp. 127-140.

Stanley, T., Gonzales, P., y Moreno, N., 2003, "Evaluación Del Grado De Madurez Con Cementos Nacionales", XVI Jornadas Chilenas Del Hormigón, pp. 8-15.

Torres, R., 2007, "Análisis Comparativo de Costos entre el Pavimento Rígido y el Pavimento Flexible", Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala, pp. 1-12.

Velásquez, J., Arteaga, G., y Castillo, J., 2012, "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", Universidad De El Salvador, Facultad Multidisciplinaria Oriental, El Salvador, pp. 18-108.

Otros

Curso Laboratorista Vial, Volumen VI, "El hormigón y sus componentes", Laboratorio Nacional de Vialidad, 2012

Departamento de Gestión Vial 2012, "Dimensionamiento y Características Red Vial Nacional – Año 2012": pp. 5 – 8.

Diseño y Análisis de Experimentos, Douglas C. Montgomery, Universidad Estatal de Arizona, Segunda Edición, 2004.

Informe de Visita Ruta 60-CH, Sector Juncal-Portillo, Tramo Dm 95.000,00 al Dm 104.980,49; Comuna de Los Andes, Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, Chile, 2013.

Instrucciones de operación del IntelliRock II, Engius "Constructive Intelligence", Agosto, 2005, www.engius.com.

NCH 170 Of. 85. "Hormigón Requisitos Generales.

Norma ASTM C 1074-04 "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method".

Manual de Carreteras Volumen N° 5, "Especificaciones técnicas generales de construcción", Dirección de Vialidad del ministerio de Obras Públicas, Chile, 2013.

Manual de Carreteras Volumen N° 8, "Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control", Dirección de Vialidad del ministerio de Obras Públicas, Chile, 2013.

ANEXOS

ANEXO A

Ensayes y datos de estudio

ANEXO A.1 – Dosificación del diseño de mezcla de hormigón

a) Gravilla ¾"

Granulometría. 8.202.3 MC-V8

Tabla A.1 – Granulometría gravilla ¾"

Peso muestra total	8788	(gr)
Tamaño máximo absoluto de la muestra	20	(mm)
Tamaño máximo nominal de la muestra	20	(mm)
Peso muestra lavada seca	8753	(gr)

Tamiz		**Retenido**		**Pasa**
Nch (mm)	**ASTM (inch)**	**Peso (gr)**	**(%)**	
40	1 1/2"			
25	1"			
20	3/4"			100
12,5	1/2"	3483	39,6	60
1	3/8"	3305	37,6	23
5	N° 4	1897	21,6	1
2,5	N° 8			
1,25	N° 16			
0,63	N° 30			
0,315	N° 50			
0,16	N° 100			
Residuo		66		

Material fino menor que 0,08 mm. 8.202.4 MC-V8

Tabla A.2 – Material fino gravilla ¾"

Peso muestra inicial	8788	(gr)
Peso muestra final	8753	(gr)
Diferencia	35	(gr)
Fino por lavado	0,4	(%)

Densidad Aparente Suelta. 8.202.19 MC-V8

Tabla A.3 – Densidad aparente gravilla ¾"

Volumen medida		5022	(lt)
Masa medida (recipiente)		3049	(gr)
masa material + masa medida	1	10309	(gr)
	2	10342	(gr)
Masa promedio		10326	(gr)
Masa muestra suelta		7277	(gr)
Densidad Aparente Suelta		1450	(kg/m3)

Densidad de la Grava. 8.202.20 MC-V8

Tabla A.4 – Densidad de la grava gravilla ¾"

Peso	X	2969	2615	(gr)
Peso bajo agua	Y	1831	1613	(gr)
Peso seco	Z	2934	2581	(gr)
	(X-Y)	1138	1002	(gr)
Den. Real seca		2578	2576	(kg/m3)
	(Z-Y)	1103	968	(gr)
Densidad Neta		2660	2666	(kg/m3)
Absorción		1,19	1,32	(%)
Den. Real seca		2580		(kg/m3)
Densidad Neta		2660		(kg/m3)
Absorción		1,25		(%)

Cubicidad de partículas. 8.202.6 MC-V8

Tabla A.5 – Cubicidad de partículas gravilla ¾"

Muestra	**(gr)**
Peso muestra total	737,0
Peso material chancado	415,2
Peso material rodado	314,4
Peso laja chancada	7,4
Peso laja rodada	-
Cubicidad total	**(%)**
Chancado Total	57
Porcentaje material rodado	43
Porcentaje laja	1

b) Arena Media

Granulometría. 8.202.3 MC-V8

Tabla A.6 – Granulometría arena media

Peso muestra total	1109,9	(gr)
Tamaño máximo absoluto de la muestra	5	(mm)
Tamaño máximo nominal de la muestra	5	(mm)
Peso muestra lavada seca	1078,4	(gr)

Tamiz		**Retenido**		**Pasa**
Nch (mm)	**ASTM (inch)**	**Peso (gr)**	**(%)**	
40	1 1/2"			
25	1"			
20	3/4"			
12,5	1/2"			
1	3/8"			100
5	N° 4	176,6	15,9	84
2,5	N° 8	169,2	15,2	69
1,25	N° 16	193,0	17,4	52
0,63	N° 30	227,4	20,5	31
0,315	N° 50	195,4	17,6	13
0,16	N° 100	94,1	8,5	5
Residuo		22,1		

Material fino menor que 0,08 mm. 8.202.4 MC-V8

Tabla A.7 – Material fino arena media

Peso muestra inicial	1109,9	(gr)
Peso muestra final	1078,4	(gr)
Diferencia	31,5	(gr)
Fino por lavado	2,8	(%)

Densidad Aparente Suelta. 8.202.19 MC-V8

Tabla A.8 – Densidad Aparente arena media

Volumen medida		3001	(lt)
Masa medida (recipiente)		3234	(gr)
masa material + masa medida	1	8291	(gr)
	2	8302	(gr)
Masa promedio		8297	(gr)
Masa muestra suelta		4763	(gr)
Densidad Aparente Suelta		1590	(kg/m3)

Densidad de la arena. 8.202.21 MC-V8

Tabla A.9 – Densidad aparente arena media

Matraz + agua	A	649,3	657,4	(gr)
PSSS	B	194,7	197,3	(gr)
Peso seco	C	192,3	194,6	(gr)
Matraz+Agua+Muestra	D	768,4	778,3	(gr)
Den. Real seca		2550		(kg/m3)
Densidad Neta		2630		(kg/m3)
Absorción		1,30		(%)

c) Grava 1 ½"

Granulometría. 8.202.3 MC-V8

Tabla A.10 – Granulometría grava 1 ½"

Peso muestra total	16904	(gr)
Tamaño máximo absoluto de la muestra	40	(mm)
Tamaño máximo nominal de la muestra	40	(mm)
Peso muestra lavada seca	16826	(gr)

Tamiz		**Retenido**		**Pasa**
Nch (mm)	**ASTM (inch)**	**Peso (gr)**	**(%)**	
40	1 1/2"			100
25	1"	4784	28	72
20	3/4"	9110	54	18
12,5	1/2"	2902	17	1
1	3/8"			
5	N° 4			
2,5	N° 8			
1,25	N° 16			
0,63	N° 30			
0,315	N° 50			
0,16	N° 100			
Residuo		30		

Material fino menor que 0,08 mm. 8.202.4 MC-V8

Tabla A.11 – Material fino grava 1 ½"

Peso muestra inicial	16904	(gr)
Peso muestra final	16826	(gr)
Diferencia	78	(gr)
Fino por lavado	0,5	(%)

Densidad Aparente Suelta. 8.202.19 MC-V8

Tabla A.12 – Densidad aparente grava 1 ½"

Volumen medida		9896	(lt)
Masa medida (recipiente)		5271	(gr)
masa material + masa medida	1	20166	(gr)
	2	20112	(gr)
Masa promedio		20139	(gr)
Masa muestra suelta		14868	(gr)
Densidad Aparente Suelta		1,5	(kg/m3)

Densidad de la Grava. 8.202.20 MC-V8

Tabla A.13 – Densidad de la grava 1 ½"

Peso	X	5583	5709	(gr)
Peso bajo agua	Y	3515	3594	(gr)
Peso seco	Z	5530	5653	(gr)
	(X-Y)	2068	2115	(gr)
Den. Real seca		2674	2673	(kg/m3)
	(Z-Y)	2015	2059	(gr)
Densidad Neta		2744	2746	(kg/m3)
Absorción		0,96	0,99	(%)
Den. Real seca		2674		(kg/m3)
Densidad Neta		2745		(kg/m3)
Absorción		0,98		(%)

Cubicidad de partículas. 8.202.6 MC-V8

Tabla A.14 – Cubicidad de partículas grava 1 ½"

Muestra	**(gr)**
Peso muestra total	3118,4
Peso material chancado	2003,1
Peso material rodado	1115,4
Peso laja chancada	-
Peso laja rodada	-
Cubicidad total	**(%)**
Chancado Total	62
Porcentaje material rodado	38
Porcentaje laja	-

ANEXO A.2 – Verificación de dosificación de hormigón

a) Gravilla ¾"

Granulometría. 8.202.3 MC-V8

Tabla A.15 – Granulometría gravilla ¾"

Peso muestra total	8354	(gr)
Tamaño máximo absoluto de la muestra	20	(mm)
Tamaño máximo nominal de la muestra	20	(mm)
Peso muestra lavada seca	8320	(gr)

Tamiz		**Retenido**		**Pasa**
Nch (mm)	**ASTM (inch)**	**Peso (gr)**	**(%)**	
40	1 1/2"			
25	1"			
20	3/4"			100
12,5	1/2"	4123	49,6	50
1	3/8"	3088	37,0	13
5	N° 4	1020	12,2	1
2,5	N° 8			
1,25	N° 16			
0,63	N° 30			
0,315	N° 50			
0,16	N° 100			
Residuo		68		

Material fino menor que 0,08 mm. 8.202.4 MC-V8

Tabla A.16 – Material fino gravilla ¾"

Peso muestra inicial	8662	(gr)
Peso muestra final	8645	(gr)
Diferencia	17	(gr)
Fino por lavado	0,2	(%)

Densidad Aparente Suelta. 8.202.19 MC-V8

Tabla A.17 – Densidad aparente gravilla ¾"

Volumen medida		5022	(lt)
Masa medida (recipiente)		3055	(gr)
masa material + masa medida	1	10744	(gr)
	2	10668	(gr)
Masa promedio		10706	(gr)
Masa muestra suelta		7651	(gr)
Densidad Aparente Suelta		1520	(kg/m3)

Densidad de la Grava. 8.202.20 MC-V8

Tabla A.18 – Densidad de la gravilla ¾"

Peso	X	2503	2770	(gr)
Peso bajo agua	Y	1573	1742	(gr)
Peso seco	Z	2476	2745	(gr)
	(X-Y)	930	1028	(gr)
Den. Real seca		2662	2670	(kg/m3)
	(Z-Y)	903	1003	(gr)
Densidad Neta		2742	2737	(kg/m3)
Absorción		1,09	0,91	(%)
Den. Real seca		2670		(kg/m3)
Densidad Neta		2740		(kg/m3)
Absorción		1,00		(%)

Cubicidad de partículas. 8.202.6 MC-V8

Tabla A.19 – Cubicidad de partículas gravilla ¾"

Muestra	**(gr)**
Peso muestra total	852,1
Peso material chancado	502,8
Peso material rodado	342,6
Peso laja chancada	6,7
Peso laja rodada	-
Cubicidad total	**(%)**
Chancado Total	60
Porcentaje material rodado	40
Porcentaje laja	0

b) Arena 3/8"

Granulometría. 8.202.3 MC-V8

Tabla A.20 – Granulometría arena 3/8"

Peso muestra total	1294,0	(gr)
Tamaño máximo absoluto de la muestra	5	(mm)
Tamaño máximo nominal de la muestra	5	(mm)
Peso muestra lavada seca	1268,5	(gr)

Tamiz		**Retenido**		**Pasa**
Nch (mm)	**ASTM (inch)**	**Peso (gr)**	**(%)**	
40	1 1/2"			
25	1"			
20	3/4"			
12,5	1/2"			
1	3/8"			100
5	N° 4	256,1	19,8	80
2,5	N° 8	215,3	16,6	64
1,25	N° 16	182,9	14,1	50
0,63	N° 30	175,3	13,5	36
0,315	N° 50	214,7	16,6	19
0,16	N° 100	163,9	12,7	7
Residuo		60,1		

Material fino menor que 0,08 mm. 8.202.4 MC-V8

Tabla A.21 – Material fino arena 3/8"

Peso muestra inicial	1294,0	(gr)
Peso muestra final	1268,5	(gr)
Diferencia	25,5	(gr)
Fino por lavado	2,0	(%)

Densidad Aparente Suelta. 8.202.19 MC-V8

Tabla A.22 – Densidad aparente arena 3/8"

Volumen medida		3001	(lt)
Masa medida (recipiente)		3535	(gr)
masa material + masa medida	1	8710	(gr)
	2	8752	(gr)
Masa promedio		8731	(gr)
Masa muestra suelta		5196	(gr)
Densidad Aparente Suelta		1730	(kg/m3)

Densidad de la arena. 8.202.21 MC-V8

Tabla A.23 – Densidad de la arena 3/8"

Matraz + agua	A	649,6	648,7	(gr)
PSSS	B	187,6	193,1	(gr)
Peso seco	C	185,3	190,5	(gr)
Matraz+Agua+Muestra	D	767,1	769,9	(gr)
Den. Real seca		2650		(kg/m3)
Densidad Neta		2740		(kg/m3)
Absorción		1,30		(%)

c) Grava 1 1/2"

Granulometría. 8.202.3 MC-V8

Tabla A.24 – Granulometría grava 1 ½"

Peso muestra total	20476	(gr)
Tamaño máximo absoluto de la muestra	40	(mm)
Tamaño máximo nominal de la muestra	40	(mm)
Peso muestra lavada seca	20464	(gr)

Tamiz		**Retenido**		**Pasa**
Nch (mm)	**ASTM (inch)**	**Peso (gr)**	**(%)**	
40	1 1/2"			100
25	1"	6780	33,1	67
20	3/4"	11258	55,0	12
12,5	1/2"	2378	11,6	0
1	3/8"			
5	N° 4			
2,5	N° 8			
1,25	N° 16			
0,63	N° 30			
0,315	N° 50			
0,16	N° 100			
Residuo		48		

Material fino menor que 0,08 mm. 8.202.4 MC-V8

Tabla A.25 – Material fino grava 1 ½"

Peso muestra inicial	20476	(gr)
Peso muestra final	20464	(gr)
Diferencia	12	(gr)
Fino por lavado	0,1	(%)

Densidad Aparente Suelta. 8.202.19 MC-V8

Tabla A.26 – Densidad aparente grava 1 ½"

Volumen medida		9896	(lt)
Masa medida (recipiente)		5268	(gr)
masa material + masa medida	1	20420	(gr)
	2	20442	(gr)
Masa promedio		20431	(gr)
Masa muestra suelta		15163	(gr)
Densidad Aparente Suelta		1530	(kg/m3)

Densidad de la Grava. 8.202.20 MC-V8

Tabla A.27 – Densidad grava 1 ½"

Peso	X	5406	5800	(gr)
Peso bajo agua	Y	3378	3624	(gr)
Peso seco	Z	5341	5740	(gr)
	(X-Y)	2028	2176	(gr)
Den. Real seca		2634	2638	(kg/m3)
	(Z-Y)	1963	2116	(gr)
Densidad Neta		2721	2713	(kg/m3)
Absorción		1,20	1,03	(%)
Den. Real seca		2636		(kg/m3)
Densidad Neta		2717		(kg/m3)
Absorción		1,12		(%)

Cubicidad de partículas. 8.202.6 MC-V8

Tabla A.28 – Cubicidad de partículas grava 1 ½"

Muestra	**(gr)**
Peso muestra total	3118,5
Peso material chancado	2003,1
Peso material rodado	1115,4
Peso laja chancada	-
Peso laja rodada	-
Cubicidad total	**(%)**
Chancado Total	64
Porcentaje material rodado	36
Porcentaje laja	-

ANEXO A.3 – Resultados de residencia metodología tradicional

Tabla A.29 - Resistencias de muestras en estudio obtenidas mediante metodología tradicional

Muestra	Sector Muestreo	Resistencia [Mpa]		
		7 Días	14 Días	28 Días
1	95080-95140 Derecha	3,2	-	5,2
4	95175-95200 Derecha	3,2	-	4,1
7	95155-95200 Izquierda	3,7	-	3,9
10	104741-104846 Izquierda	3,2	-	5,0
15	104500-104560 Izquierda	5,0	-	4,6
19	103707-103810 Derecha	2,6	-	4,6
22	103830-103940 Izquierda	4,2	-	5,8
23	103940-104015 Izquierda	3,2	-	4,8
25	100890-100922 Izquierda	2,6	-	4,8
26	104980-104996 Izquierda	3,3	-	5,0
29	103700-103770 Izquierda	3,1	-	5,9
31	100922-100982 Izquierda	2,8	-	5,4
33	100982-101087 Izquierda	4,0	-	5,3
34	101087-101184 Izquierda	3,0	-	4,9
37	101262-101368 Izquierda	2,6	-	4,9
41	104880-104980 Izquierda	4,5	-	4,7
47	102602-102715 Izquierda	3,5	-	4,7
51	101462-101538 Izquierda	2,7	-	4,1
55	101615-101671 Izquierda	2,1	-	4,3
57	102695-102786 Derecha	3,2	-	5,0
63	102740-102786 Derecha	4,5	-	6,0
67	103400-103456 Izquierda	4,8	-	4,7
74	102960-103029 Izquierda	2,6	-	5,0
81	102290-102324 Izquierda	4,1	-	5,3
83	100164-100232 Derecha	3,1	-	5,7
89	102490-102525 Izquierda	4,5	-	5,4
92	104440-104482 Derecha	2,8	-	5,6
96	104480-104528 Derecha	4,1	-	5,0
106	101343-101437 Derecha	4,1	-	4,7
109	101437-101468 Derecha	3,7	-	5,4
114	103817-103874 Derecha	5,2	-	4,3
116	101637-101688 Derecha	3,4	-	4,7
179	100592-100640 Izquierda	3,3	3,6	-
180	96798-96874 Derecha	2,7	3,2	-
181	99208-99276 Derecha	3,3	3,6	-
182	96874-96925 Derecha	3,0	3,6	-
183	99276-99303 Derecha	2,5	3,5	-
184	99303-99355 Derecha	2,7	3,4	-
185	96925-96975 Derecha	2,9	3,0	-
186	99355-99407 Derecha	2,1	3,1	-
187	96611-96670 Derecha	2,8	3,5	-
188	99407-99504 Derecha	2,5	3,5	-

ANEXO A.4 – Resultados implementación metodología de madurez

Tabla A.30 – Resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de madurez

Muestra	Cumplimiento apertura tránsito			Variables en estudio					
	Día	Madurez [°C - Hs]	Resistencia [Mpa]	T prom. [°C]	W prom. [%]	T máx [°C]	T min [°C]	W máx [%]	W min [%]
1	4	2190	3,77	11,1	45	14,7	8,2	67	29
4	4	2265	3,82	14,0	31	17,5	10,7	57	15
7	4	2249	3,81	15,2	50	18,5	12,4	78	25
10	4	2248	3,81	10,0	56	13,5	7,3	90	27
15	4	2187	3,77	11,1	47	14,5	8,1	80	25
19	4	2244	3,81	9,8	30	13,8	6,3	59	12
22	4	2189	3,77	13,2	21	16,9	10,1	45	6
23	4	2244	3,81	12,7	22	16,4	9,4	45	6
25	4	2174	3,76	13,1	19	16,9	9,7	43	5
26	4	2236	3,80	13,1	19	16,9	9,7	43	5
29	4	2190	3,77	12,3	26	15,6	9,0	54	9
31	4	2264	3,82	11,8	24	15,5	8,3	51	9
33	4	2169	3,76	11,3	22	15,0	7,6	47	8
34	4	2266	3,82	10,9	20	14,4	7,2	39	8
37	5	2183	3,77	11,1	19	15,2	7,2	36	6
41	4	2177	3,76	11,0	25	14,2	8,0	46	10
47	5	2168	3,76	9,2	26	12,5	5,9	50	11
51	5	2214	3,79	9,0	23	12,9	5,5	45	9
55	5	2199	3,78	9,5	27	13,3	6,0	48	14
57	5	2215	3,79	9,2	30	12,6	6,2	51	16
63	4	2268	3,82	9,1	29	12,6	6,3	49	13
67	4	2178	3,77	9,6	29	13,2	6,7	47	13
74	4	2163	3,76	11,9	26	15,9	8,7	39	16
81	5	2221	3,79	10,5	33	14,1	7,6	53	18
83	5	2169	3,76	8,6	39	12,0	5,6	65	18
89	6	2155	3,75	6,4	37	10,2	3,2	68	14
92	5	2210	3,79	6,9	25	11,0	3,4	53	8
96	5	2184	3,77	7,6	22	11,5	4,3	42	8
106	5	2196	3,78	6,9	33	10,1	4,2	50	14
109	5	2201	3,78	6,1	31	9,6	3,3	49	13
114	4	2253	3,81	9,3	16	14,1	5,4	26	7
116	4	2259	3,82	11,5	14	16,5	7,8	23	6
179	4	2155	3,75	9,3	32	13,2	6,1	61	13
180	5	2212	3,79	8,7	31	12,5	5,5	61	13
181	5	2211	3,79	8,7	31	12,5	5,5	61	13
182	6	2199	3,78	7,9	35	11,9	4,4	67	13
183	5	2216	3,79	7,2	36	11,3	3,7	70	13
184	6	2164	3,76	4,5	50	8,2	1,1	81	27
185	7	2190	3,77	5,2	47	8,9	1,6	77	25
186	7	2201	3,78	5,2	47	8,9	1,6	77	25
187	5	2232	3,80	5,5	49	9,6	1,5	77	26
188	4	2196	3,78	5,9	49	9,7	2,1	72	30

ANEXO B

ASTM C 1074 - 04 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 prácticas 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

2.1 Estándares ASTM:

C 39/C 39M 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)
C 109/C 109M Método de Ensayo para Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Usando Especímenes Cúbicos de 2 pulgadas o 50 mm).
C 192/C 192M Práctica para la Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo, en el Laboratorio.
C 403/C 403M Método de Ensayo para Tiempo de Fraguado de Mezclas de Concreto Mediante Resistencia a la Penetración.
C 511 Especificación para Gabinetes de Humedad, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento de Agua Usados en el Ensayo de Cementos y Concreto.
C 684 Método de Ensayo para Elaboración, Curado Acelerado y Ensayo de Especímenes de Concreto a Compresión.
C 803/C 803M Método de Ensayo para Resistencia a la Penetración del Concreto Endurecido.
C 873 Método de Ensayo para Resistencia a Compresión de Cilindros de Concreto Colados en el Lugar, en Moldes Cilíndricos.
C 900 Método de Ensayo para Resistencia a la Extracción de Concreto Endurecido.
C 918 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) post-tensionado de acero de refuerzo; (3) terminación de la protección del concreto en clima frio; (4) apertura de carretera, al tráfico.
5.2 Esta práctica puede ser usada pare 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 per 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:

$$M(t) = E(Ta - To)\,\Delta t \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Dónde:

M (t) = factor temperatura-tiempo a la edad t (grados-día, grados-hora).
Δt = un intervalo de tiempo, días, horas.
Ta = temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo Δt, ° C.
To = temperatura de referencia, ° C.

6.3 La otra función de madurez es usada para calcular la edad equivalente a una temperatura especificada como sigue:

$$t_e = \Sigma\, e^{-Q(1/Ta - 1/Ts)}\,\Delta t \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Dónde:

te = edad equivalente a una temperatura especificada Ts, días o horas.
Q = energía activada dividida por la constante del gas, K.
Ta=temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo Δt, K.
Ts = 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, To, y la activación de la energía dividida por la constante del gas, Q, son dados en el Apéndice X1. Los valores apropiados de To y Q, para una mezcla de concreto específica, puede ser determinada de acuerdo a los procedimientos dados en el Anexo A1.

7. Aparatos

7.1 Se requiere un dispositivo para monitorear y registrar la temperatura interna del concreto como una función del tiempo. Los dispositivos aceptados incluyen termocuplas o termistores conectados a un colector (strip-chart) o dispositivos digitales embebidos que midan la temperatura y registren y almacenen la información. El intervalo de tiempo registrado será ½ h o menos para las primeras 48 h y 1h o menos para después. El dispositivo que registre la temperatura debe ser preciso dentro de ±1°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.

8.7 Cuando sea especificado, se permitirá una relación entre esfuerzo a flexión vrs índice de madurez. Prepare al menos 15 vigas de acuerdo con la práctica 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).

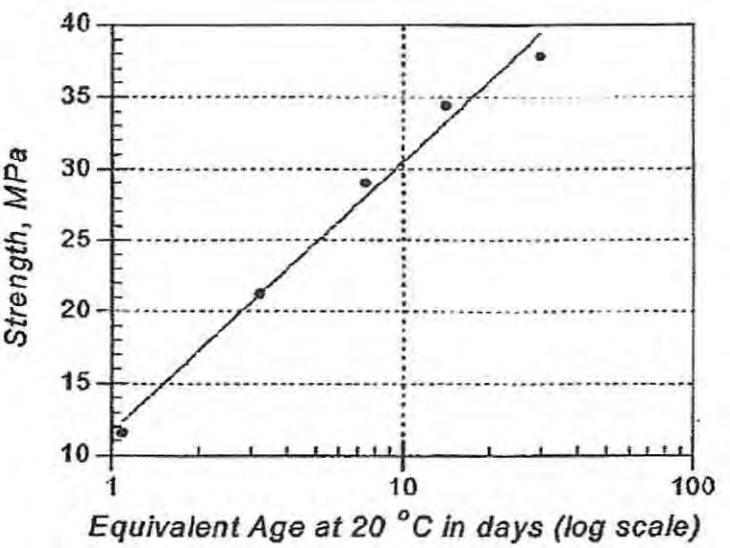

FIG. 3 Example of Compressive Strength as a Function of Logarithm of Equivalent Age

ANEXOS

(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 estudio (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 estudio (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 reciproco de la resistencia en el eje y, y el reciproco de la edad en el eje x. Para cada temperatura de curado, plotear el reciproco de la resistencia promedio de

cubos a lo largo del eje y, y el reciproco 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.

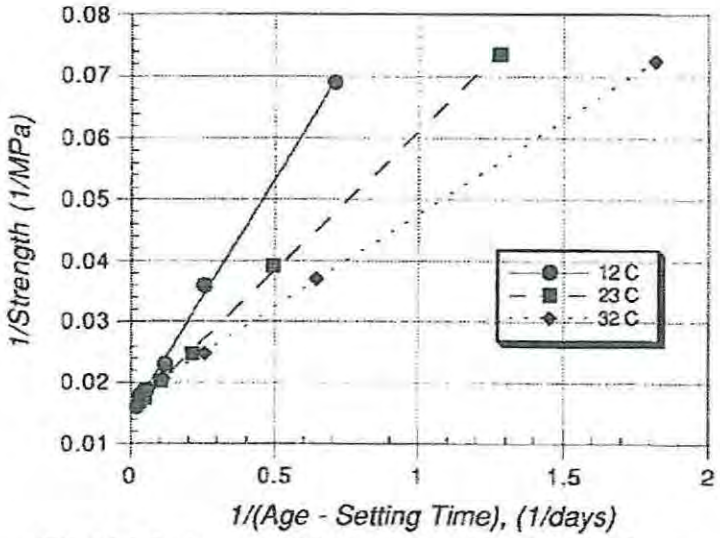

FIG. A1.1 Reciprocal of Strength Versus Reciprocal of Age Beyond Time of Final Setting

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:

$$S = S_u \frac{k\,(t-t_0)}{1+k\,(t-t_0)} \quad \text{(A1.1)}$$

Donde:

S = resistencia a compresión promedio en cubos a la edad t.
t = edad de ensayo
Su = resistencia limitada
to = edad cuando la resistencia desarrollada es asumida a empezar
k = la razón constante.

El programa de computadora calculará la mejor tendencia de los valores Su, to, 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 reciproco de la resistencia (eje y) contra el reciproco de la edad (eje x). Determine el intercepto con el eje y. El inverso del intercepto es la resistencia limitada, Su. Repita este procedimiento para cada temperatura de curado.

2) Para cada temperatura de curado, use la información resistencia edad en los cuatro ensayos de edad temprana y el valor de Su para calcular el valor de A para cada resistencia, donde A es dada por la siguiente ecuación.

$$A = \frac{S}{(S_u - S)} \quad \text{(A1.2)}$$

3) Para cada temperatura de curado, plotear el valor de A contra la edad. Determine la pendiente de la mejor tendencia para cada temperatura de curado. Estas pendientes son los valores de k.

A.1.2 Determinación de la Temperatura de Referencia.

A.1.2.1 Plotee los valores de k como una función de la temperatura de los baños de agua (Fig. A1.2). Determine la mejor tendencia a través de los tres puntos y el intercepto de la línea con el eje de la temperatura. Este intercepto es la temperatura de referencia, To (datum), que será usada en el cálculo del factor temperatura-tiempo de acuerdo con la Ecuación 1.

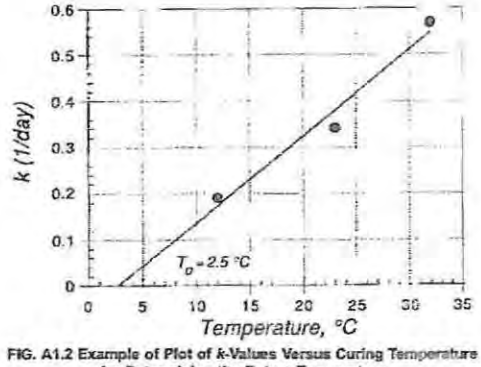

FIG. A1.2 Example of Plot of *k*-Values Versus Curing Temperature for Determining the Datum Temperature

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.

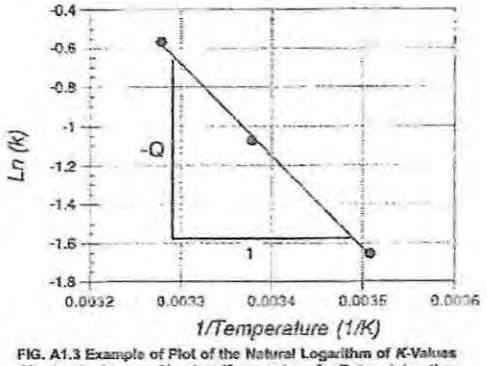

FIG. A1.3 Example of Plot of the Natural Logarithm of *K*-Values Versus the Inverse Absolute Temperature for Determining the Value of *Q* used in Calculating Equivalent Age

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:

$$Mc = Md - (To - Td)\, t \qquad (X1.1)$$

Dónde:

Mc = el factor temperatura- tiempo corregido, grados- días o grados – horas.
Md = el factor temperatura- tiempo mostrado por el instrumento, grados-días.
To = la temperatura de referencia apropiada para el concreto, °C
Td = 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, Ts. 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.

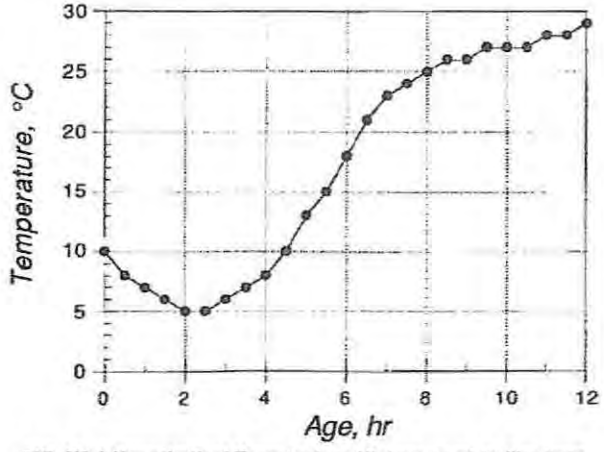

FIG. X2.1 Hypothetical Temperature History used to Illustrate Computations of Temperature-Time Factor and Equivalent Age

X2.2 Cálculo del Factor temperatura-Tiempo

X2.21 El valor de la temperatura de referencia, To, 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.