

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA PARA PAVIMENTOS DE HORMIGÓN CON FIBRA

CARLOS FELIPE LOBOS BERNAL

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía

Carlos Wahr Daniel

Mayo de 2019

RESUMEN

El hormigón es un material con alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tracción. La adición de fibras de distintos tipos permite mejorar su matriz convirtiéndolo en un material más dúctil con una fisuración más controlada. Para fines estructurales se pretende que la que la adición de fibra proporcione un aumento de la durabilidad a la fatiga de los elementos o una reducción de refuerzos tradicionales.

En el año 2012, el Laboratorio Nacional de Vialidad publica un instructivo que describe un método de diseño empírico-mecanicista, el cual permite la incorporación de fibras a los pavimentos de hormigón basado en las ecuaciones de daño por fatiga del proyecto NCHRP 1-37^a (MEPDG, AASHTP, EEUU), que considera la respuesta mecánica de los materiales y de la estructura de pavimentos ante la aplicación de cargas de tráfico y climáticas.

Con la implementación de estos métodos, es importante conocer la influencia de la fibra en la predicción del desempeño de pavimentos de hormigón, por lo que es necesario determinar la influencia de las fibras en parámetros de relevantes a la hora de diseñar pavimentos de hormigón. Varios estudios realizados han clasificado al CET como dato de entrada extremadamente sensible, debido a que afecta las tensiones críticas de la losa, agrietamiento y abertura de juntas.

Este estudio se realizó para determinar el valor del CET bajo normativa estándar AASTHO T366-11, de 7 tipos de hormigones con contenido de fibra entre 0 a 4 kg/m³, comparando los resultados con otras propiedades mecánicas del hormigón y determinando la influencia de adición de las fibras; también se realizan diseños de pavimentos para las 7 mezclas, utilizando los valores obtenidos de los ensayos mediante software que permita evaluar el desempeño de los hormigones caracterizados.

ABSTRACT

Concrete is a material that is highly strong in compression but very weak in traction. The incorporation of different types of fibers, it is possible to improve its mold, making this material more adaptable, with controlled cracking. Furthermore, for structure matters, this fiber addition promotes durability and reduces fatigue of materials and added reinforcement.

In 2012, the National Viability Laboratory published a instructive with a Mechanistic-Empirical pavement design method, which allows the incorporation of fibers to concrete pavement, based on equations of damage from fatigue of material staken from Project NCHRP 1-37a (MEPDG, AASHTP, EEUU), which takes into account the mechanical response of materials and the pavement structure when exposed to traffic and weather elements.

With the implementation of these methods, it is important to know the influence of the fiber to predict the performance of the concrete pavements, therefore being able to determine the significant parameters for the composition of the pavement. Various studies have classified CET as highly sensitive input data, because it affects the slab critical stresses, cracking and joint opening among others.

This study was made to determine the value of CET (following AASTHO T366-11 standard test procedure) on seven types of concrete, adding fiber content going from 0 to 4%, representative of mixes used all over the country. The resulting mixes were reviewed, comparing their properties to other mechanical properties of concrete, consequently establishing the level of influence of the different fiber additions. Taking these results, seven different concrete pavement designs were created, evaluating their performance through a software.

GLOSARIO

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials.
ACI	: American Concrete Institute.
ASTM	: American Society for Testing and Materials.
BSI	: British Standard Institution.
CTE	: Coefficient of Thermal Expansion.
EC	: Módulo de Elasticidad.
FHWA	: Federal Highway Administration.
FRC	: Fiber Reinforcement Concrete.
GEMDP	: Guía empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos.
IRI	: Índice de Rugosidad Internacional.
LNv	: Laboratorio Nacional de Vialidad.
LTPP	: Long Term Pavement Performance.
LEMCO	: Laboratorio de Ensayes de Materiales y Control de Obras, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María.
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer.
MOR	: Módulo de Ruptura.
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program.
USACE	: United States Army Corps of Engineers.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	ii
ABSTRACT	iii
GLOSARIO.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	7
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	8
1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO.....	9
1.4 METODOLOGIA DE TRABAJO.....	9
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	10
2. REVISIÓN EN LA LITERATURA	11
2.1 HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS.....	11
2.1.1 Antecedentes	11
2.1.2 Características de las Fibras	16
2.1.3 Clasificación de las fibras	17
2.1 PAVIMENTOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS.....	21
2.2.1 Antecedentes	21
2.2.2 Uso de pavimentos de hormigón con fibra en el país.....	26
2.2.3 Ventajas y Desventajas	28
3. TRABAJO EN LABORATORIO.....	30
3.1 INTRODUCCIÓN.....	30
3.2 DESCRIPCIÓN EN LA CONFECCIÓN DE LAS MUESTRAS.....	31
3.3 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	37
3.3.1 Compresión Cilíndrica	37
3.3.2 Flexotracción	40
3.3.3 Coeficiente de Expansión Térmica	43
3.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	48

3.5	ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO	51
3.5.1	CET y la Resistencia a la Compresión Cilíndrica	51
3.5.2	CET y Módulo de Ruptura	53
3.5.3	Resistencia a la Compresión Cilíndrica y Módulo de Ruptura.....	55
4.	DISEÑO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN CON FIBRA BASADO EN ECUACIONES DE DAÑO POR FATIGA EMPÍRICO-MECANICISTAS	58
4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.....	58
4.2	MODELOS DE DETERIOROS	60
4.2.1	Agrietamiento	60
4.2.2	Escalonamiento	63
4.2.3	IRI.....	65
4.3	PARAMETROS DE DISEÑO	65
4.3.1	Parámetros de Diseño del Tipo de Pavimento	66
4.3.2	Tráfico	70
4.3.3	Propiedades del Hormigón	74
4.3.4	Suelo	78
4.3.5	Clima.....	79
5.	ANALISIS DE LOS HORMIGONES MEDIANTE SOFTWARE.....	81
5.1	PARAMETROS DE INGRESO DEL SOFTWARE	81
5.1.1	Parámetros de Diseño	81
5.1.2	Parámetros de Tráfico	82
5.1.3	Parámetros del Hormigón	82
5.1.4	Parámetros del Suelo	84
5.1.5	Parámetros del Clima	84
5.2	RESULTADOS DE LOS DISEÑOS	85
5.2.1	Predicciones de Agrietamiento Transversal.....	85
5.2.2	Predicciones Escalonamiento.....	91
5.2.3	Predicciones del IRI.....	96
5.2.4	Análisis de resultados de los diseños	101

6	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	103
7	REFERENCIAS	105
8	ANEXOS	109
	ANEXO A – CALIBRACIONES	109
	ANEXO B – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE FIBRA ESTRUCTURAL	111
	ANEXO C – DOSIFICACIONES Y GRANULOMETRIAS DE HORMIGONES SELECCIONADOS	111
	ANEXO D – REGISTRO PROCESO DE SATURACION	117
	ANEXO E – PARÁMETROS DE INGRESO DE SOFTWARE GEMDP	118
	ANEXO F – RESULTADOS ENSAYOS CET EQUIPO GILSON	125

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Propiedades técnicas de las fibras [Fernández Cánova, 2003].	21
Tabla 2.- Proyectos de pavimentos de hormigón con fibra en Chile [Jeria y Sanhueza, 2016].	28
Tabla 3.- Matriz de selección del estudio.....	31
Tabla 4.- Resultados de resistencia promedio a la compresión cilíndrica.	48
Tabla 5.- Resultados de resistencia promedio a la flexotracción.	48
Tabla 6.- Relación Compresión/Flexión.....	49
Tabla 7.- Coeficientes de variación para ensayos de compresión cilíndrica y flexotracción.	49
Tabla 8.- Resultados parciales coeficiente de expansión térmica (CET).	50
Tabla 9.- ANOVA para relación CET obtenido y Resistencia a la Compresión Cilíndrica.	52
Tabla 10.- ANOVA para relación CET obtenido y el Módulo de Ruptura.	53
Tabla 11.- ANOVA para relación CET obtenido y el Módulo de Ruptura [Bravo, 2015].	54
Tabla 12.- ANOVA para relación Resistencia a la Compresión Cilíndrica y el Módulo de Ruptura.	55
Tabla 13.- Tabla comparativa de ensayos por tipo de probeta [elaboración propia].	57

Tabla 14.- Vida de Diseño Recomendado según clasificación del Pavimento.	66
Tabla 15.- Tipo de Borde y su efecto en términos de soporte y circulación de tráfico.	67
Tabla 16.- Valores Recomendados de Porcentaje Máximo Admisible de Losas Agrietadas según la Clasificación de la Vía [Covarrubias y Binder, 2013].	68
Tabla 17.- Confiabilidad según la clasificación de la vía [Covarrubias y Binder, 2013].	70
Tabla 18.- Tipos de Tráfico [Covarrubias y Binder, 2013].	71
Tabla 19.- Valores por defecto de las distancias entre el borde, la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos.	74
Tabla 20.- Desviación Estándar según tipo de Borde	74
Tabla 21: Parámetros de Diseño	81
Tabla 22: Parámetros de Tráfico	82
Tabla 23: Parámetros de hormigón	83
Tabla 24: Parámetros variables del hormigón	83
Tabla 25: Parámetros del suelo.....	84
Tabla 26: Parámetros del Clima	84
Tabla 27: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M1	101
Tabla 28: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M2	101
Tabla 29: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M3	101
Tabla 30: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M4	102
Tabla 31: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M5	102
Tabla 32: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M6	102
Tabla 33: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M7	102

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Curvas típicas de Esfuerzo - Deformación para hormigón reforzado con fibras [elaboración propia].	13
Figura 2: Disposición idealizada fibra-fisura [Ruiz, López y Martínez, 2015].	15
Figura 3.- Fibras Metálicas [Mulheron, 2015].	18
Figura 4.- Fibras Sintéticas [Barrera, Iaiani y Sota, 2000].	18
Figura 5.- Fibras de Vidrio [Barrera, Iaiani y Sota, 2000].	19
Figura 6.- Fibras Naturales [Barrera, Iaiani y Sota, 2000].	19
Figura 7: Fisura por Contracción [Souza,2011].	25
Figura 8: Fisura Superficial - Map Cracking [FHWA,2003]	25
Figura 9: Curva de Carga-Deformación [elaboración propia].	27
Figura 10: Camión Mixer despachado por Cemento Melón [elaboración propia].	32
Figura 11: Asentamiento del cono de Abrams [elaboración propia].	33
Figura 12: Preparación de moldes en terreno [elaboración propia].	34
Figura 13: Corte de núcleos de hormigón [elaboración propia].	35
Figura 14: Máquina Rectificadora de Hormigón Automática [Existente en LEMCO].	36
Figura 15: Prensa de Ensayo utilizada para la Compresión Cilíndrica [Existente en LEMCO].	39
Figura 16: Ensayo de 2 cargas aplicadas en los límites del tercio central [NCh1038, 2009].	41
Figura 17: Prensa de Ensayo utilizada para la Flexotracción [Existente en LEMCO].	42
Figura 18: Proceso de probetas para obtener núcleos perforados a ensayar [elaboración propia].	44
Figura 19: Equipo de medición utilizado [Existente en LEMCO].	46
Figura 20.- Regresión lineal de CET obtenido y Resistencia a la Compresión Cilíndrica.	51
Figura 21: Regresión lineal de CET obtenido y Resistencia a la Compresión Cilíndrica [Bravo, 2015].	52
Figura 22.- Regresión lineal de CET obtenido y el Módulo de Ruptura.	53
Figura 23: Regresión lineal de CET obtenido y el Módulo de Ruptura [Bravo, 2015].	54

Figura 24.- Regresión lineal de Resistencia a la Compresión Cilíndrica y el Módulo de Ruptura.....	55
Figura 25.- Relación entre Resistencia a la Compresión Cilíndrica y el Módulo de Ruptura.	56
Figura 26.- Diagrama de Flujo del Método utilizado	60
Figura 27.- Distribución lateral típica de un pavimento de hormigón.....	72
Figura 28.- Distribución lateral típica de un pavimento con solera en el borde. ...	73
Figura 29.- Distribución Lateral del tráfico para un pavimento con sobreancho. ...	73
Figura 30.- Efecto de la desviación estándar durante la producción de hormigón.	75
Figura 31.- Retracción típica del hormigón en el tiempo.	77
Figura 32: Predicción de Agrietamiento M1.....	86
Figura 33: Predicción de Agrietamiento M2.....	86
Figura 34: Predicción de Agrietamiento M3.....	87
Figura 35: Predicción de Agrietamiento M4.....	87
Figura 36: Predicción de Agrietamiento M5.....	88
Figura 37: Predicción de Agrietamiento M6.....	88
Figura 38: Predicción de Agrietamiento M7.....	89
Figura 39: Predicción de Escalonamiento M1	91
Figura 40: Predicción de Escalonamiento M2	92
Figura 41: Predicción de Escalonamiento M3	92
Figura 42: Predicción de Escalonamiento M4	93
Figura 43: Predicción de Escalonamiento M5	93
Figura 44: Predicción de Escalonamiento M6	94
Figura 45: Predicción de Escalonamiento M7	94
Figura 46: Predicción IRI Promedio M1.....	96
Figura 47: Predicción IRI Promedio M2.....	97
Figura 48: Predicción IRI Promedio M3.....	97
Figura 49: Predicción IRI Promedio M4.....	98
Figura 50: Predicción IRI Promedio M5.....	98
Figura 51: Predicción IRI Promedio M6.....	99
Figura 52: Predicción IRI Promedio M7	99

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

Según estadísticas de la Dirección Nacional de Vialidad a fines del año 2015, la red vial nacional está constituida por 80583.1 Km, los cuales se agrupan en cuatro tipos de superficie de rodado: Asfalto, Hormigón, ripio y caminos de tierra. Del total de la red vial, alrededor de un 2.3% corresponden a pavimentos de hormigón, constituyendo el grupo de menor participación en proyectos ejecutados, esto puede ser atribuido a los altos costos iniciales relacionado con este tipo de soluciones, y a que paralelamente los pavimentos asfálticos se perfeccionan tanto técnica como operacionalmente mejorando directamente su desempeño.

Sin embargo, en años recientes los pavimentos de hormigón han vuelto a tomar relevancia. Esto a raíz del uso de nuevas metodologías de diseños que consideran el uso de fibras, permitiendo la entrega de mayor durabilidad, mínimo o ningún mantenimiento durante el periodo de vida de diseño y a un costo comparable a las soluciones que predominan en los diseños actuales.

El hormigón es un material con alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tracción. La adicción de fibras estructurales permite mejorar su matriz convirtiéndolo en un material más dúctil y de fisuración más controlada. Con fines estructurales, se pretende que la adición de fibras proporcione mayor energía de rotura, provocando directamente un cambio relevante en la resistencia a la fatiga y aumento en la durabilidad de los elementos o reducción de refuerzos.

Los diseños que incorporan el uso de fibra en el país se rigen por ecuaciones de daño por fatiga empírico-mecanicistas, basándose en la respuesta mecánica de los materiales y de la estructura de pavimentos ante la aplicación de las cargas de tráfico y climáticas diseño; por lo tanto, para comprender el marco de aplicación de estas soluciones de pavimentos, se deben conocer en detalle todos los parámetros que se incluyen en este tipo de diseños.

De acuerdo con lo anterior, es relevante estudiar y conocer las variaciones de los parámetros del hormigón que inciden principalmente en el diseño, como lo son la resistencia a la compresión cilíndrica, resistencia a la flexotracción y principalmente el coeficiente de expansión, sus influencias, sus variaciones y su relación entre ellos.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general es determinar el coeficiente de expansión térmica en hormigones con y sin fibra, constituyendo 7 mezclas en total, y estudiar al mismo tiempo la influencia de la adición de fibras en los desempeños de las mezclas mediante un software basado en las ecuaciones de daño por fatiga empírico-mecanicistas, usadas actualmente para este tipo de diseños.

Para llevar a cabo el objetivo general se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el coeficiente de expansión térmica, la resistencia a la compresión cilíndrica y la resistencia a la flexotracción de las mezclas caracterizadas.
- Realizar comparaciones entre los valores de resistencia a la compresión cilíndrica, resistencia a la flexotracción y coeficiente de expansión térmica de las probetas ensayadas, para luego determinar la influencia de adición de las fibras en los parámetros medidos.
- Analizar los resultados obtenidos para todas las probetas ensayadas en laboratorio.
- Realizar diseños de pavimentos de 7 tipo de hormigones con contenido de fibra entre 0 a 4 kg/m³, utilizando los valores obtenidos de los ensayos mediante software que permita evaluar el desempeño de los hormigones caracterizados.
- Analizar los resultados obtenidos para las corridas del programa de los diseños propuestos.

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO

Este estudio está limitado por los siguientes alcances:

- En este trabajo se ocupa el software Optipave 2, método de diseño de pavimentos de hormigón sin armaduras y sin barras de traspaso de carga, que está basado en las ecuaciones de daño por fatiga empírico-mecanicistas.
- Los resultados obtenidos de las mezclas caracterizadas son exclusivamente representativos del tipo de hormigón especificado.
- Los procedimientos de diseño descritos corresponden a pavimentos rígidos nuevos de hormigón simple con juntas, cualquier otro tipo de pavimento no es considerado

1.4 METODOLOGIA DE TRABAJO

Para asegurar el cumplimiento de los objetivos del presente estudio se procederá a efectuar las siguientes tareas:

Etapas I: Revisión Bibliográfica.

- a) Uso de la fibra en hormigones, su desarrollo y características fundamentales, también se estudiará su clasificación y se revisará información disponible respecto de los tipos y valores más usados.
- b) Efectos de la adición de fibras en pavimentos de hormigón, su desarrollo a través del tiempo y características fundamentales, estudiando los principales efectos que tienen en el desempeño y como se caracterizan dentro del uso actual en el país.
- c) Revisión del diseño de pavimentos de hormigón con fibras aplicados en Chile mediante las ecuaciones de daño por fatiga empírico-mecanicistas, específicamente sobre las propiedades del hormigón que influyen en el diseño y los valores a seleccionar para la ejecución del diseño propiamente tal.

Etapa II: Trabajo en laboratorio.

- a) Trabajo de laboratorio, en donde se confeccionaron probetas cilíndricas y prismáticas de 7 tipos de hormigones con contenido de fibra entre 0 a 4 kg/m³.
- b) Determinación de resistencia a la compresión cilíndrica.
- c) Determinación de resistencia a la flexotracción.
- d) Determinación del coeficiente de expansión térmica.

Etapa III: Análisis de resultados.

- a) Realización de diseños de pavimentos de hormigón mediante el software Optipave 2 y el software de la MEPDG, tomando en cuenta los valores de las propiedades medidas en laboratorio.
- b) Análisis y comparación de resultados de los diseños de pavimentos de hormigón.
- c) Conclusiones.

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Este trabajo se estructura de la siguiente forma:

- Capítulo 1 : *Introducción.*
- Capítulo 2 : *Revisión de la literatura.*
- Capítulo 3 : *Trabajo en laboratorio.*
- Capítulo 4 : *Diseño de pavimentos de hormigón con fibra basado en ecuaciones de daño por fatiga empírico-mecanicistas.*
- Capítulo 5 : *Análisis de los hormigones mediante software.*
- Capítulo 6 : *Conclusiones y Comentarios.*
- Anexos.

2. REVISIÓN EN LA LITERATURA

2.1 HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

2.1.1 Antecedentes

El primer hormigón reforzado con fibra moderno (FRC) fue el fibrocemento, que se introdujo aproximadamente en 1900, sin embargo los estudios teóricos serios solamente comenzaron a principios de 1960 con el trabajo de Romualdi y sus colegas [p. *Romualdi y Batson 1963; Romualdi y Mandel 1964*].

Los FRC han sido exhaustivamente estudiados, es así como el American Concrete Institute (ACI), la American Society for Testing Materials (ASTM), la United States Army Corps of Engineering (USACE), la British Standard Institution (BSI), entre otros, han publicado numerosas normas y métodos de experimentación al respecto; Las principales aplicaciones son losas, hormigón proyectado y elementos prefabricados, así como una serie de aplicaciones especiales. Hasta ahora, la mayor parte de la producción de FRC ha sido para aplicaciones "no estructurales", con la fibra añadida principalmente para el control del agrietamiento debido a la contracción plástica o por secado.

El hormigón es un material con alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tracción; la adición de fibras de distintos tipos permite mejorar su matriz convirtiéndolo en un material más dúctil con una fisuración más controlada, y para fines estructurales se pretende que la que la adición de fibra proporcione un aumento de la durabilidad a la fatiga de los elementos o una reducción de refuerzos tradicionales. El hormigón con fibras se considera un hormigón hecho a partir de cementos hidráulicos, conteniendo áridos finos, o finos y gruesos, agua y fibras discretas discontinuas cuya misión es contribuir a la mejora de determinadas características de los hormigones [ACI, 1996].

Los FRC como concepto es semejante al del hormigón armado convencional, ya que los refuerzos en ambos casos participan en mayor grado cuando el hormigón eventualmente comienza a agrietarse. La diferencia radica en que, en lugar de unas

pocas barras de diámetros relativamente grandes y orientadas según una dirección determinada, en el FRC, el refuerzo se constituye por una gran cantidad de fibras de menor diámetro y con orientaciones aleatorias.

Las fibras son objetos sólidos largos con una relación de aspecto extremadamente alta y un conjunto único de propiedades direccionales. También son flexibles con una rigidez de flexión muy baja. A pesar de esta combinación de direccionalidad, alta relación de aspecto y flexibilidad es casi imposible encontrar una aplicación duradera y de alta resistencia para las fibras sin protegerlas del entorno circundante. Pueden ser fácilmente dañados por fricción o incluso manejo sencillo. El papel de las fibras en el hormigón está limitado típicamente a proporcionar resistencia y rigidez mientras que la matriz mantiene las fibras en su ubicación prevista, las protege, transfiere tensiones entre las fibras y proporciona la rigidez. Esto significa que las propiedades de la interfaz entre las fibras y la matriz juegan un papel importante en cómo se transfiere la tensión entre ellas, afectando la forma y cómo se comporta bajo cargas sostenidas. Una interfaz fuerte asegura que toda la carga se transfiere haciendo que el compuesto tenga alta rigidez y resistencia. Por otra parte, una interfaz débil puede no permitir tal transferencia de carga completa, disminuyendo la resistencia y la rigidez del material compuesto.

Las fibras, al añadirse en el hormigón, se dispersan a lo largo en todo el volumen de la mezcla, por lo que la mezcla suele ser anisotrópica con diferentes propiedades de material en diferentes direcciones. Tal anisotropía es causada por la alineación de las fibras en el material compuesto. Por ejemplo, si las fibras están solamente alineadas en una dirección, el compuesto se llama unidireccional con propiedades a lo largo de la dirección de las fibras diferentes de aquellas en cualquier otra dirección. Si las fibras están alineadas en dos direcciones perpendiculares, entonces las propiedades en esas dos direcciones son diferentes de las propiedades en todas las otras direcciones. Dependiendo del volumen de fibras en cada dirección, las propiedades en ambas direcciones pueden no ser las mismas. El concepto de anisotropía y, en particular, las capacidades de diseñar para la anisotropía ha hecho de los materiales compuestos lo que son hoy en día; No sólo es fácil conseguir un diseño óptimo, sino que también son una respuesta económica a los escenarios críticos de carga. Desde una óptima perspectiva de diseño, un diseño de material

anisotrópico puede proporcionar ciertas propiedades sólo en las direcciones requeridas. Dado que una propiedad como la rigidez puede equipararse cualitativamente con el costo, tal diseño óptimo también reducirá el costo; El adicionar fibras no condiciona la naturaleza de los componentes del hormigón por lo que estos deben ser los adecuados para que el hormigón alcance y mantenga las características requeridas.

Una característica importante a la hora de definir el aporte del uso de las fibras es la tenacidad la cual se define como el área bajo una curva Esfuerzo – Deformación. En la Figura 1 se puede ver que, al agregar fibras de manera adecuada al hormigón se incrementa en forma importante la tenacidad del material: es decir, el hormigón reforzado con fibras es capaz de soportar cargas bajo flexiones mucho mayores que aquellas a las cuales aparece el primer agrietamiento en la matriz.

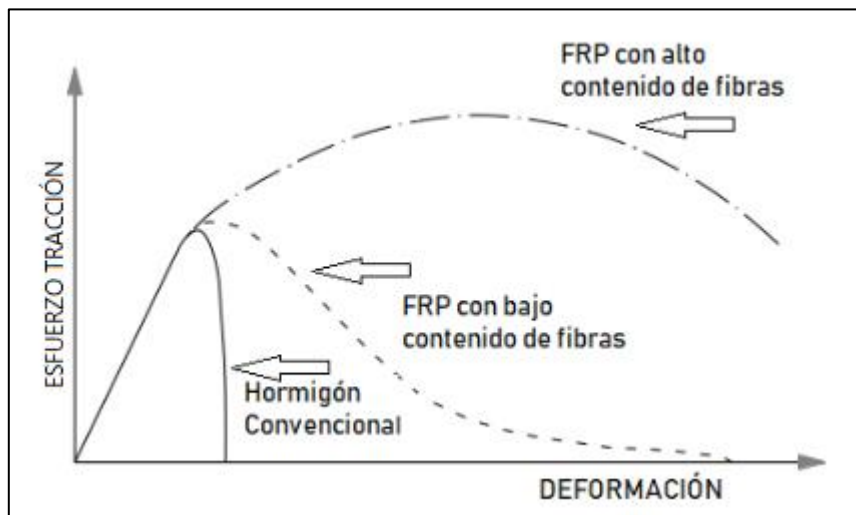


Figura 1.- Curvas típicas de Esfuerzo - Deformación para hormigón reforzado con fibras [elaboración propia].

Para lograr que las fibras cumplan el objetivo inicial y proporcione los beneficios esperados, requiere una elección y dosificación adecuada, de las longitudes de la fibra y de las propiedades que estas confieren al hormigón, ya que de esta forma se utilizan con mayor eficiencia aquellas propiedades intrínsecas de los tipos de fibra, donde priman unas propiedades sobre otras en función de las distintas aplicaciones del hormigón reforzado con fibra.

La necesidad principal de la adición de fibras en el hormigón es aumentar la resistencia del hormigón y también reducir la propagación de la grieta que depende principalmente de los siguientes parámetros.

- a) Dosis de la fibra: Una alta dosis de fibras otorga una mayor resistencia postfisuración y menor dimensión de fisuras, desde que las fibras puedan absorber las cargas adicionales ocasionadas por la fisura.
- b) Módulo de elasticidad de la fibra: Un alto valor del módulo de elasticidad causaría un efecto similar a la dosis de fibra, pero, en la práctica, cuanto mayor sea el módulo, mayor será la probabilidad de que haya un arrancamiento de las fibras.
- c) Adherencia entre la fibra y la matriz: Las características de resistencia, deformación y patrones de rotura de una gran variedad de compuestos cimentados reforzados con fibras dependen fundamentalmente de la adherencia fibra-matriz. Una alta adherencia entre la fibra y la matriz reduce el tamaño de las fisuras y amplía su distribución por el compuesto.
- d) Resistencia de la fibra: Aumentando la resistencia de las fibras, aumenta también la ductilidad del compuesto, desde que no ocurra la rotura en las ligaciones de adherencia. La resistencia de la fibra dependerá, en la práctica, de las características postfisuración deseadas, así como la dosis de fibra y de las propiedades de adherencia fibra-matriz.
- e) Deformidad de la fibra: La ductilidad se puede aumentar con la utilización de las fibras que presenten alta deformación de rotura. Esto se debe al hecho de que compuestos con fibras de alto grado de deformidad consuman energía bajo la forma de estiramiento de la fibra.
- f) Compatibilidad entre la fibra y la matriz: La compatibilidad química y física entre las fibras y la matriz absorben agua pueden ocasionar una excesiva pérdida de trabajabilidad del hormigón. Además, las fibras que absorben agua sufren una variación de volumen y, la adherencia fibra-matriz queda comprometida.

La Figura 2 presenta una disposición idealizada de la fibra en relación con la fisura, seguida de una ecuación en donde el cociente entre la resistencia a la tracción (f_t) de la fibra y la resistencia de adherencia fibra-matriz (f_a) en la rotura es proporcional a la relación l/d , donde “ l ” es la longitud y “ d ” el diámetro de la fibra.

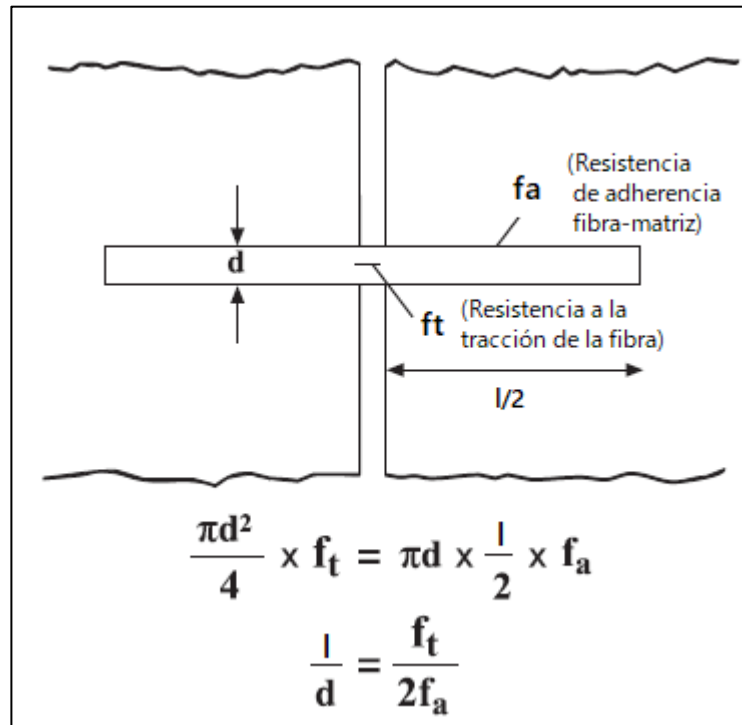


Figura 2: Disposición idealizada fibra-fisura [Ruiz, López y Martínez, 2015].

Se considera relevante tener en cuenta que, si la fibra tiene una resistencia alta a la tracción, la resistencia de adherencia necesariamente deberá tener un valor comparable a la resistencia de manera que impida ser arrancada de la matriz, o por otro lado mantener una relación l/d que permita cumplir la condición anterior.

Para que el uso efectivo de las fibras en el hormigón endurecido se debe tener en consideración las siguientes características:

- Las fibras deben ser significativamente más rígidas que la matriz, es decir, un módulo de elasticidad más alto.
- El contenido de fibras por volumen debe ser adecuado.
- Debe existir una buena adherencia entre la fibra y la matriz.
- La longitud de las fibras debe ser suficiente.
- Las fibras deben tener una alta relación de aspecto, es decir, deben ser largas con relación a su diámetro.

2.1.2 Características de las Fibras

Las fibras empleadas en el refuerzo de mezclas de hormigón son fibras discontinuas, rígidas o flexibles, que presentan una distribución discreta y uniforme dentro de la matriz que confiere al material cierto grado de isotropía y homogeneidad. La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de múltiples factores, sin embargo, los principales factores corresponden al tipo de fibra y de sus propiedades características.

Las principales características de las fibras utilizadas en hormigones son:

- Propiedades geométricas: longitud, sección transversal, relación de aspecto, forma.
- Propiedades físico – químicas: rugosidad de la superficie, densidad, estabilidad química, resistencia al fuego.
- Propiedades mecánicas: rigidez, resistencia, ductilidad, elongación a la rotura.

Dentro de las propiedades geométricas se considera como parámetro importante dentro de las características a requerir la relación de aspecto, definido como “la longitud de la fibra dividida para su diámetro equivalente”. El diámetro equivalente se define como: “el diámetro de un círculo con un área igual a la de la sección transversal de las fibras”.

La relación de aspecto varía según la dimensión del elemento estructural a construirse, puesto que la distribución de fibras no es uniforme, y por lo tanto una concentración apreciable de las fibras en la mezcla, ocasionaría una variación en las propiedades mecánicas del hormigón. Una relación de aspecto entre 100 y 200 es a menudo usada con el fin de obtener mezclas homogéneas, y que por tanto, proporciones mejores características de trabajabilidad.

La efectividad del refuerzo matriz-fibras, exige a las fibras las siguientes propiedades:

- Una resistencia a tracción significativamente mayor que la del hormigón.

- Una adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.
- Un módulo de elasticidad significativamente mayor que el del hormigón.

Las fibras que comúnmente se están utilizando para reforzar el hormigón, pueden ser clasificadas en dos tipos.

- Fibras de Módulo de Elasticidad Alto y de grandes esfuerzos, tales como fibras metálica y vidrio, las cuales producen mezclas de gran rigidez y resistencia.
- Fibras de Módulo de Elasticidad Bajo y de gran alargamiento, tales como el nylon, polipropileno y el polietileno, las cuales confieren gran capacidad de absorción de energía hasta su rotura.

2.1.3 Clasificación de las fibras

Las fibras como refuerzo pueden clasificarse según diferentes consideraciones, no obstante, se emplean principalmente dos tipos de clasificación.

- 1) Clasificación por material.
- 2) Clasificación por funcionalidad, geometría y funcionalidad.

Clasificación por material

De acuerdo con la especificación estándar para hormigones con fibra ASTM C1116/C1116M-10, las fibras se clasifican en 4 categorías de materiales las cuales se indican a continuación.

- Fibras Metálicas: Secciones de metal que tienen una relación de aspecto (relación entre la longitud y el diámetro) que va desde 20 hasta 100. Estas fibras son de acero (en general de bajo contenido de carbón),



Figura 3.- Fibras Metálicas [Mulheron, 2015].

→ Fibras Sintéticas: Secciones que se distribuyen aleatoriamente dentro del hormigón que pueden estar compuestas por acrílico, Aramid, carbón, polipropileno, poliestileno, nylon, poliéster, etc.



Figura 4.- Fibras Sintéticas [Barrera, Iaiani y Sota, 2000].

→ Fibras de Vidrio: Secciones de fibra de vidrio resistente al álcali



Figura 5.- Fibras de Vidrio [Barrera, Iaiani y Sota, 2000].

→ Fibras Naturales: Secciones de origen como coco, sisal, madera, caña de azúcar, yute, bambú, etc. Cuyos diámetros varían entre 0.5 y 0.2 mm, con valores de absorción superiores al 12%.



Figura 6.- Fibras Naturales [Barrera, Iaiani y Sota, 2000].

Clasificación por funcionalidad, geometría y funcionalidad

- Microfibras: Estas fibras están destinadas a evitar la fisuración del hormigón en estado fresco o antes de las 24 horas. Se dosifican en el hormigón para volúmenes entre 0.3 a 0.15 % del mismo, las más frecuentes son las fibras de polipropileno cuya dosificación en peso oscila entre 0.3 a 1.2 Kg/m³ de hormigón. Se trata de dosificaciones extremadamente bajas pero muy eficientes que previenen la fisuración del hormigón por retracción plástica. Estas fibras tienen diámetros entre 0.023 a 0.050 mm. Pueden ser monofilamento o fibriladas. Las micro fibras al tener diámetros tan pequeños se califican con un parámetro denominado denier. Denier es el peso en gramos de 9000 metros de una sola fibra.

- Macrofibras: Estas fibras están destinadas a prevenir la fisuración en estado endurecido, a reducir el ancho de la fisura si ésta se presenta y a permitir el adecuado funcionamiento de la estructura fisurada. Las dosificaciones más frecuentes oscilan entre 0.2 a 0.8 % del volumen del hormigón. Las macrofibras más usadas son las sintéticas y las metálicas cuyos diámetros varían entre 0.05 a 2 mm. La relación de aspecto (L/d) de las macrofibras varía entre 20 a 100. Las dosificaciones en términos de peso varían así de acuerdo con la densidad del material, las fibras de acero requieren entre 20 a 50 kg/m³ de hormigón y las fibras sintéticas (polipropileno) entre 2 a 9 kg/m³. Las macrofibras actúan en estado endurecido, es decir antes de las 24 horas no tienen mayor efecto. Las macrofibras metálicas o sintéticas no alteran la resistencia a la compresión y lo hacen de una manera muy leve sobre las resistencias a la tensión y flexión.

Tabla 1.- Propiedades técnicas de las fibras [Fernández Cánova, 2003].

Tipo de fibra	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo de elasticidad (Gpa)	Densidad (Kg/m³)	Alargamiento de rotura (%)
Acero	500 - 3000	210	7800	3,5
Acero inoxidable	2100	160	7860	3
Nylon	900	4	1100	13,0 - 15,0
Polipropileno	400 - 800	5 - 25	900	8,0 - 20,0
Poliéster	700 - 900	8,2	1400	11,0 - 13,0
Carbono	3000	200-500	1900	0,5
Vidrio	2000	60	2700	3,6
Hormigón	42952	30	2300	-

Observando la tabla se aprecian las diferencias entre las propiedades de cada tipo de fibra y las del hormigón, especialmente significativas la resistencia a tracción y el alargamiento de rotura. En ese sentido, es destacable el alargamiento de rotura en las fibras metálicas que poseen altos valores. Las fibras sintéticas en todas sus variantes son las más utilizadas en pavimentos de hormigón con fibra; el presente estudio se basa en mezclas con fibras sintéticas, por esta razón se hace más énfasis en este tipo de fibras.

2.1 PAVIMENTOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

2.2.1 Antecedentes

El hormigón reforzado con fibra (FRC) se ha utilizado en la construcción de pavimentos y losas rígidas durante varias décadas [Rice 1972; Parker 1974; Pakard y Ray 1984; Rollings 1986; Van Dam 1995]. Las fibras estructurales discretas mejoran la resistencia a la rotura del hormigón y el límite de ancho de grieta. En el pasado, se agregaron fibras estructurales pavimentos de hormigón para reducir el espesor requerido de la losa y aumentar el espaciado permitido de las juntas. Desafortunadamente, las reducciones excesivas de espesor asociadas a los tamaños de la losa, o las capas de FRC unidas al pavimento de hormigón, han dado lugar a fallas prematuras de las losas [Rollings, 1993]. Las dificultades típicas de las losas eran roturas de esquina, grietas reflectantes, corte tardío de las juntas, movimientos

excesivos de las juntas y daño del sellador de juntas. El alabeo de la losa que resultó de los contenidos altos contenidos de cemento, la contracción del hormigón, gradiente térmico, y los porcentajes de volumen agregado más bajos parecían ser uno de los problemas comunes en las fallas de la losa [Rollings, 1993]. Las lecciones aprendidas de estas fallas anteriores indican que los efectos del alabeo no pueden ignorarse en los pavimentos FRC.

Los desarrollos en la tecnología de mezcla durante las últimas décadas han permitido un proceso más simple en la colocación de FRC. La investigación también ha solidificado la idea de que cada tipo de fibra funciona de forma diferente para una mezcla de concreto simple y esto debe tenerse en cuenta al diseñar y especificar el uso de FRC, si bien las mejoras en las propiedades estructurales de las losas de hormigón reforzado con fibra que se han documentado en la literatura, no han reflejado una incorporación importante en las guías de diseño y las especificaciones para pavimentos de hormigón, los ingenieros han adoptado lentamente las fibras en aplicaciones de pavimento de hormigón enfocándose principalmente en el diseño del espesor de la losa, necesitando un método de prueba estándar aceptado para determinar la tenacidad a la flexión del FRC, ya que sin poder cuantificar la reducción en el grosor o el tamaño de losa permisible para un tipo y contenido de fibra dado, no se puede completar un análisis de costo-beneficio adjunto. Finalmente, se necesitó un método de prueba estándar aceptado para determinar la tenacidad a la flexión del FRC, de manera que las suposiciones de diseño originales puedan tener algún grado de verificación.

Gran parte de los primeros datos publicados sobre la prueba de pavimento de FRC y las secciones de campo reflejan el uso de contenidos de volumen de fibra entre 1 y 2 por ciento y un contenido de cemento significativamente más alto que los pavimentos de hormigón no convencionales. Parker (1974) desarrolló curvas de espesor de diseño basadas en las secciones de prueba de hormigón con fibra del Cuerpo de ejército de los Estados Unidos (USACOE), que finalmente se implementaron en el manual de diseño de pavimento rígido del ejército en 1979 [Bordelon y Roesler, 2009]. El método de diseño utilizó el concepto de un criterio de grieta en funcionamiento en lugar de un primer criterio de grieta, que reconoce la

mayor resistencia al agrietamiento donde es posible obtener reducciones del espesor de los FRC entre un 30 y 50 por ciento.

Las aplicaciones recientes de FRC a pavimentos de hormigón con fibra tienen un contenido de fibras menor al 0.5 por ciento por razones económicas, de manejo y de construcción. Las pruebas experimentales de losas en suelo han demostrado la mejora significativa de las capacidades de flexotracción de las losas de FRC sobre las losas de hormigón lisas [*Sham y Burgoyne 1986; Beckett & Humphreys 1989; Beckett et al. 1999; Meda et al. 2003; Roesler et al. 2004, 2006*]. según lo informado originalmente por Parker.

Algunos estudios de laboratorio confirman que FRC es más resistente a la fatiga que el hormigón convencional [*Johnston y Zemp 1991; Ramakrishnan et al. 1989; Jun y Stang 1998*], especialmente en fracciones de mayor volumen, sin embargo, Lee y Barr (2004) muestran que existe poca diferencia entre la fatiga de flexión del concreto liso y con fibra. Algunos de los trabajos más notables y convincentes fueron las investigaciones de Rollings (1986, 1989), que desarrollaron varios algoritmos de fatiga para materiales de FRC de acero basados en los datos a escala real de USACOE. Las curvas de fatiga demostraron claramente una mayor resistencia a la fatiga de FRC sobre el pavimento de hormigón simple dada la misma relación de esfuerzo.

Los resultados de las pruebas de laboratorio sugieren que la resistencia a la fatiga de FRC depende de la fracción de volumen, el tipo de fibra y la geometría de la fibra, cabe señalar que la caracterización de la resistencia a la fatiga de FRC basada únicamente en pruebas bidimensionales de flexión de haz de laboratorio no siempre predice la mayor resistencia al agrietamiento obtenida a partir de la prueba de losa a gran escala [*Roesler et al., 2004, 2008*]. La consecuencia de tal conclusión es que las pruebas de laboratorio para FRC deben tener en cuenta el beneficio adicional (tenacidad) que las fibras imparten a las losas de hormigón simples y que los métodos de diseño de espesor deben incluir este parámetro de rendimiento de tenacidad como insumo.

En la actualidad los pavimentos de hormigón con fibra se han utilizado con éxito en varios países en una amplia de soluciones de pavimentos, aeropuertos, estacionamientos, caminos principales, caminos regionales, etc.

Estas soluciones de diseño se prepararon siguiendo la misma metodología que un pavimento tradicional. sin embargo, a medida que los diseños se fueron desarrollando se necesitó un mayor conocimiento de este tipo de soluciones y a su vez se permitió una investigación sin precedentes.

Los hormigones con fibra han encontrado un nicho en el mercado, ya que además de disminuir los costos operativos, mejoran cuantitativamente el comportamiento de estos, debido a que las adicciones de fibras incrementan sus características de tenacidad, control de fisuración e indirectamente la resistencia tanto a la flexotracción como la compresión cilíndrica.

Las fibras sintéticas no reemplazan íntegramente el refuerzo estructural principal en el hormigón porque agregan poca resistencia. Pero el refuerzo estructural no suministra sus beneficios hasta que el hormigón haya endurecido. Eso es por lo que en algunos proyectos adicionan fibras sintéticas al hormigón como refuerzo secundario. A diferencia del refuerzo estructural, las fibras sintéticas proporcionan beneficios mientras el hormigón es aún plástico. Ellas también aumentan algunas de las propiedades del hormigón endurecido.

Las fisuras por contracción son pequeñas fisuras irregulares que pueden desarrollarse en el hormigón durante las primeras 24 horas después de su colocación (Figura N° 7). No deben confundirse con las fisuras superficiales (Figura N° 8). Dado que las fisuras por contracción usualmente pasan a través de todo el espesor de la losa. Las fisuras son generalmente causadas por cualquier contracción plástica o por secado. La contracción plástica ocurre antes de alcanzar el hormigón su endurecimiento inicial; la contracción por secado ocurre después del endurecimiento del hormigón.



Figura 7: Fisura por Contracción [Souza,2011].



Figura 8: Fisura Superficial - Map Cracking [FHWA,2003]

Todo el hormigón se contrae después de colocado debido a un cambio de volumen causado por pérdida de humedad. Si la contracción se produjo sin ninguna restricción, el hormigón pudo no agrietarse. Pero los elementos de hormigón están siempre sujetos mínimamente a alguna restricción tanto por el peso propio, otra parte

de la estructura, o por acero de refuerzo. El confinamiento además desarrolla retracción diferencial, cuando el hormigón de la superficie se retrae más rápido que el hormigón subyacente. Si las tensiones de tracción causadas por confinamiento exceden la resistencia a tracción del hormigón, el hormigón se fisura.

2.2.2 Uso de pavimentos de hormigón con fibra en el país

En Chile, el uso del hormigón con fibras está aumentando debido a nuevas tecnologías de diseño de pavimentos que permiten optimizar el espesor de estos agregando fibras para el control de fisuras por fatiga, aumentando la capacidad última de carga y la resistencia a la fatiga.

En el año 2012 el LNV publica un instructivo en el cual se difunden nuevas tecnologías y especificaciones técnicas relacionadas al uso de pavimentos de hormigón con fibra estructural, con el cual es posible obtener pavimentos de menor espesor o de mayor duración, pudiendo reducirse el deterioro del pavimento una vez producida la grieta, aumentando la transferencia de carga en las juntas y eliminando la necesidad de confinamiento.

El método incorporado en el instructivo utiliza como propiedad del hormigón con fibra, la resistencia residual según la norma ASTM C1609/C1609M-12, y considerando que la incorporación de fibra en pavimentos de hormigón es una tecnología relativamente reciente y aún en estudio, actualmente se recomienda diseñar los pavimentos de hormigón con fibra considerando un 20% de resistencia residual utilizando, mientras no se dispongan de mayores antecedentes, se recomienda usar fibras sintéticas.

El ensayo de carga – deformación en viga consiste básicamente en cargar una viga en el tercio central que esta simplemente apoyada en sus extremos e ir midiendo deformaciones verticales ante cargas variables.

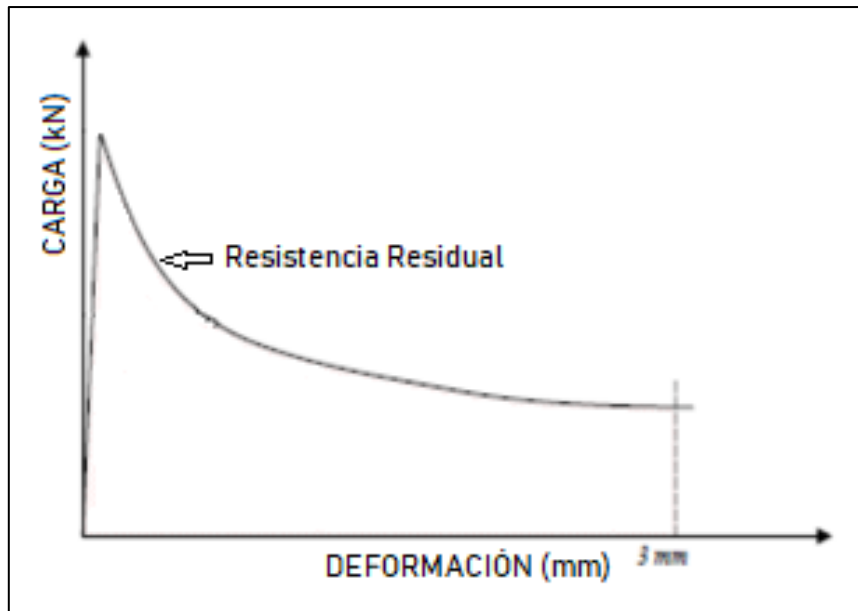


Figura 9: Curva de Carga-Deformación [elaboración propia].

El área bajo la curva corresponde a la tenacidad, capacidad de absorber energía, un hormigón tradicional sin fibras tendrá escasa o nula resistencia residual y por lo tanto su capacidad de seguir tomando energía una vez agrietada será muy baja; Un hormigón con fibras puede aumentar considerablemente su tenacidad tal como lo muestra la figura anterior, sin embargo se ha detectado que a mayor contenido de fibra, mayor es la resistencia residual, pero la trabajabilidad de la mezcla y la homogeneización de esta se dificultan mucho, es por este motivo que se ha recomendado una resistencia residual de 1 MPa lo que se traduce en dosis de fibra sintética entre 2.5 a 3.0 Kg/m³ de fibra [Jeria y Sanhueza, 2016].

Como muestra del creciente interés en este tipo de soluciones, se han realizado varias experiencias en Chile con la incorporación de fibras en el hormigón, a continuación, se muestran los casos más recientes tanto tramos experimentales como pavimentos contratados y ejecutados, incluyendo largo, espesor y características especificadas para la obra.

Tabla 2.- Proyectos de pavimentos de hormigón con fibra en Chile [Jeria y Sanhueza, 2016].

CAMINO	FECHA (año)	LARGO (m)	ESPESOR (cm)	CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIFICACIONES
Mejoramiento Ruta 257 - CH (Ex Ruta Y-79) Cerro Sombrero - Onaissin Tramo I	2011	15000	14	Fibra sintética dosis mínima 2.5 Kg/m ³ Resistencia HF 5.3 (80) R residual $\geq$ 1.2 Mpa en L/150 Diseño para 20 años
Mejoramiento Ruta 257 - CH (Ex Ruta Y-79) Cerro Sombrero - Onaissin Tramo I	2013	43000	15	Fibra sintética dosis mínima 2.5 Kg/m ³ Resistencia HF 5.0 (80) R residual $\geq$ 1.0 Mpa en L/150 Diseño para 20 años
Plaza de la Ciudadanía	2013	~6000	19-22	Fibra sintética dosis mínima 2.5 Kg/m ³ Resistencia HF 5.0 Mpa a 90 días R residual $\geq$ 1.0 Mpa a 28 días
Conservación Camino Mahuidanche - Misión Inglesa	2012	600	9 cm al eje trapezoidal con 11 cm al borde	Fibra sintética Resistencia H35 (90) 40 a 28 días R residual $\geq$ 1.0 Mpa Diseño para 5 años
Reposición Ruta G - 78, Sector El Monte - El Paico - Melipilla	2012	600	12	Fibra sintética Resistencia HF 5.3 (80) 40 a 28 días R residual $\geq$ 1.6 Mpa promedio
Conservación Camino básico intermedio G - 84 San Antonio	2013	500	10	Fibra sintética Resistencia H35 (80) 40 a 28 días R residual $\geq$ 1.0 Mpa promedio

2.2.3 Ventajas y Desventajas

Entre las ventajas técnicas del uso de fibras en el hormigón, en comparación con el hormigón sin fibras, se puede mencionar lo siguiente:

- La fibra contenida en el hormigón controla las microfisuras que se pueden originar durante las primeras 24 horas y detienen su desarrollo a macro fisuras, evitando que comprometan la estructura, permitiendo además que el hormigón desarrolle de mejor forma sus características y propiedades de resistencia a la compresión y flexotracción.
- Los hormigones con fibras presentan una menor velocidad de evaporación de agua, que reduce aún más la posibilidad de fisuramiento.
- La fibra otorga al hormigón es estado fresco, una mayor resistencia a la evaporación de agua manteniendo la trabajabilidad requerida por mayor tiempo.
- En comparación con un hormigón sin fibra, este hormigón es más impermeable, esto significa finalmente un importante aporte a la calidad del

pavimento, sobre todo si sobre él se almacenarán productos que deben conservarse secos para mantener su calidad.

- Debido a la alta capacidad de absorber energía y elasticidad de la fibra, este hormigón presenta una mayor resistencia al impacto y la abrasión, otorgando una mayor vida útil a los pavimentos sometidos a cargas dinámicas.
- Mejora resistencia de agrietamiento.
- Permite reducir espesor de losa de hormigón.
- Capacidad del hormigón de seguir tomando cargas una vez agrietado. En el caso de pavimentos aumenta la capacidad de la losa.
- Aumenta la resistencia residual.
- Mejora el comportamiento a cargas cíclicas.

Entre las desventajas o inconvenientes del uso de fibras en el hormigón, en comparación con el hormigón sin fibras, se puede mencionar lo siguiente:

- Hacen que la mezcla de hormigón fresco pierda un poco de trabajabilidad, por lo que debe proporcionarse una mayor importancia al proceso de vibrado del hormigón.
- Para la terminación superficial, pueden quedar fibras expuestas en la superficie del hormigón, por lo que en algunos casos será necesario quemar con fuego suave.
- Reducción del asentamiento de cono, magnitud que depende fundamentalmente de la cantidad, composición y geometría de la fibra.
- El mezclado del hormigón se torna más dificultoso.
- Falta de homogeneidad en la distribución de fibras, por posible formación de grumos.
- Dificultades en la terminación superficial del hormigón.

3. TRABAJO EN LABORATORIO

3.1 INTRODUCCIÓN

El trabajo en laboratorio consiste en la caracterización de 7 mezclas, determinando resistencia a la compresión cilíndrica y resistencia a la flexotracción para 7, 14 y 28 días y coeficiente de expansión térmica. La selección de los 7 hormigones se realiza de acuerdo con las siguientes consideraciones.

- La fibra de dosis mínima utilizada actualmente para soluciones de hormigón con fibra es de 2.5 Kg/m³, en donde la fibra utilizada es de tipo sintética.
- De acuerdo a instructivos actuales para los pavimentos de hormigón con fibra estructural, se exige cemento hidráulico de alta resistencia, con una dosis de cemento mínimo de 300 Kg/m³ y tamaño máximo absoluto del árido grueso de 40 mm.
- El segundo principal componente del hormigón es el cemento, este por sí solo tiene un elevado valor de CET.
- Considerando que la incorporación de fibra en pavimento de hormigón es una tecnología relativamente nueva, se recomienda diseñar los pavimentos de hormigón con fibra considerando un 20% de resistencia residual.

De acuerdo con las consideraciones anteriores se define la matriz de la tabla 3 donde se muestran los 7 tipos de hormigones seleccionados, con su respectiva identificación en donde la mezcla 2 por ejemplo es especificado con, 320 Kg/m³, tamaño máximo absoluto del árido grueso de 40 mm, docilidad de 6 cm y contenido de fibra de 2.5 Kg/m³, se resume como HD 320 40 – 06 F 2.5, estos valores fueron escogidos con el objetivo de caracterizar tipos de mezclas que se encuentren dentro de los usados actualmente y que sus componentes se adhieran a las exigencias y recomendaciones de la normativa vigente.

Las fibras fueron proporcionadas por la empresa Cave y el resto de los materiales fueron proporcionados por la empresa Cemento Melón, en donde todos los componentes de los hormigones en el estudio fueron mezclados en Planta Melón concón, inclusive en los que se incorporó fibras y para cada una de las mezclas fue entregada una ficha con las especificaciones de la mezcla respectiva.

Tabla 3.- Matriz de selección del estudio.

IDENTIFICACIÓN DE LA MEZCLA	TIPO DE HORMIGÓN	HORMIGÓN
M1	Alta Resistencia	HD 320 40-06
M2	Alta Resistencia con Fibra	HD 320 40-06 F 2.5
M3	Alta Resistencia	HD 360 40-06
M4	Alta Resistencia con Fibra	HD 360 40-06 F 2.5
M5	Alta Resistencia con Fibra	HD 360 40-06 F 4.0
M6	Alta Resistencia	HD 400 40-06
M7	Alta Resistencia con Fibra	HD 400 40-06 F 2.5

3.2 DESCRIPCIÓN EN LA CONFECCIÓN DE LAS MUESTRAS

Los 7 hormigones confeccionados que se establecen en la Tabla 6 fueron muestreados en el laboratorio, provenientes de la central hormigonera (Figura 10), los cuales se despacharon en camión mixer.

El proceso en la confección fue similar para todas las recepciones de las mezclas, en primera instancia el hormigón fue vertido desde el camión en carretillas de acuerdo con la norma Nch1017-2009 respetando los siguientes puntos

- (i) Se regula el flujo de descarga del hormigón mediante la velocidad de rotación del tambor, sin estrangular el flujo con la contrapuerta, (de esta forma se consigue uniformidad en la mezcla).
- (ii) Se efectúa la extracción de muestras en 3 o más intervalos regulares durante la descarga del hormigón sin incluir el principio y el final, (debido a que se considera que el hormigón tiene homogeneidad entre el 10% y el 90% de la descarga).



Figura 10: Camión Mixer despachado por Cemento Melón [elaboración propia].

Posterior a la descarga de la cantidad de hormigón considerado para el llenado de los moldes, se realiza la medición de docilidad del hormigón, utilizando el método de asentamiento del cono de Abrams de acuerdo con la norma [NCh1019,2009] a cargo de un laboratorista Clase C perteneciente al laboratorio LEMCO (Figura 11) verificando el valor especificado.



Figura 11: Asentamiento del cono de Abrams [elaboración propia].

Después de obtener el valor de la docilidad, se confeccionaron las probetas de acuerdo con la norma Nch1017-2009 de la siguiente manera

Moldeado

- (i) Se preparan los moldes previamente (Figura 12), ubicándolos en el patio de laboratorio, asegurándose que el terreno se encuentre limpio y nivelado posterior a esta verificación se aplica liquido desmoldante en los moldes
- (ii) Se prepara también en el patio del laboratorio una piscina para realizar el curado inicial de las probetas, colocándose una cama de arena bajo y dentro de la piscina verificando que esta se encuentre nivelada.
- (iii) Se verifica que se encuentren todos los equipos y accesorios requeridos para la recepción del hormigón, tales como equipo de vibración, carretillas, palas, guantes, llana, etc.

- (iv) Se colocó el hormigón procurando evitar segregaciones y respetando el número de capas según tipo de molde, con 1 capa para los moldes prismáticos y 2 capas para los moldes cilíndricos.
- (v) Se realizó la compactación de las probetas mediante el vibrado interno, con una inserción central en los moldes cilíndricos y 3 inserciones verticales equidistantes a lo largo de la línea longitudinal central, se introduce aproximadamente 2 de la capa subyacente, procurando no tocar las caras ni el fondo del molde con el vibrador, retirando el vibrador tan lento como sea posible, rellenando la capa con tal de mantener lleno el molde.
- (vi) Se enrazó con platacho evitando separar el mortero con el árido grueso, finalizando con un alisado superficial con una llana.
- (vii) Finalmente, se marcaron las probetas su identificación correspondiente.



Figura 12: Preparación de moldes en terreno [elaboración propia].

Siguiendo lo indicado en la norma NCh1017-2009, las probetas ya identificadas se sumergen en agua con cal en la piscina preparada previamente, dejándolas por

más de 20 hrs en el caso de las probetas cilíndricas y 44 hrs para las probetas prismáticas.

Una vez desmoldadas las probetas cilíndricas y prismáticas se vuelven a sumergir esta vez en la piscina de la cámara de curado con agua con cal a una temperatura entre 21 y 25 C°, hasta el momento de su ensayo.

Para el caso de las probetas cilíndricas destinadas para el ensayo del coeficiente de expansión térmica, se extraen núcleos de hormigón con la ayuda de una testiguera de pedestal disponible en el laboratorio, donde posteriormente con la ayuda del personal del LEMCO, se corta el núcleo de hormigón ajustando la probeta a las dimensiones normativas del ensayo con la ayuda de una sierra de corte de hormigón, tal como se muestra en la figura 13.



Figura 13: Corte de núcleos de hormigón [elaboración propia].

Finalmente, las probetas cilíndricas antes de realizar sus respectivos ensayos se ajustan con la ayuda de una rectificadora de cilindros de hormigón adquirida recientemente por el laboratorio LEMCO (Figura 14), para cumplir con sus respectivos criterios de perpendicularidad y planiedad.



Figura 14: Máquina Rectificadora de Hormigón Automática [Existente en LEMCO].

3.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

Se realizaron en total 147 ensayos para las 7 mezclas caracterizadas, siendo 63 para el cálculo de la resistencia de la flexotracción y 63 para el cálculo de la compresión cilíndrica, repartidos en 3 muestras ensayadas para cada corte de tiempo de 7, 14 y 28 días por mezcla y 21 muestras ensayadas 3 por mezcla para la determinación del coeficiente de expansión térmica. La realización de cada ensayo fue íntegramente respaldada bajo los procedimientos indicados en las siguientes normas.

- Ensayo de Compresión de Probetas Cúbicas y Cilíndricas (*NCh 1037, 2009*).
- Ensayo de Tracción por Flexión (*NCh 1038, 2009*).
- Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete (*AASHTO T 336-11*).

Cabe señalar que en la actualidad la medición del coeficiente no se encuentra normalizado bajo normativa chilena, en su lugar se utilizó la normativa de EE. UU. A continuación, se describen los procedimientos de las normas utilizadas.

3.3.1 Compresión Cilíndrica

A través de los procedimientos de este ensayo se determina la resistencia a la compresión cilíndrica de los hormigones caracterizados, para realización del correspondiente ensayo se debe contar con una prensa de ensaye (Figura 15) con los siguientes requerimientos.

- Debe contar con la rigidez suficiente para resistir los esfuerzos del ensayo sin alterar las condiciones de distribución y ubicación de la carga y lectura de resultados.
- Debe contar con un sistema de rótula que permita hacer coincidir la resultante de la carga aplicada con el eje de la probeta.
- La superficie de la placa sobre la que se aplica la carga debe ser lisa y plana, con una desviación máxima de 0,015 mm en 100 mm de planitud, medido en cualquier dirección.

- La dimensión de la arista o del diámetro de las placas de carga debe ser mayor o igual que la arista o diámetro de la probeta.
- La sensibilidad de la prensa será tal que la menor división de la escala de lectura sea inferior o igual al 1% de la carga máxima.
- La exactitud de la prensa debe tener un error de $\pm 1\%$ de la carga.
- La prensa contará con dispositivos de regulación de la carga.

De acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NCh1037-2009, se deben medir dos diámetros perpendiculares entre sí, aproximadamente en la mitad de la altura de la probeta, después medir la altura de la probeta en dos generatrices opuesta y por último determinar la masa de la probeta en kilogramos (kg).

Posteriormente se debe limpiar la superficie de las placas y de las caras de ensayo de la probeta, cuando se verifica esta condición se colocan las probetas cilíndricas con una de sus caras rectificadas, en contacto con la placa de carga inferior.

Si la máquina lo requiere, asentar la placa superior sobre la probeta guiándola suavemente con la mano para poder obtener un apoyo de la placa lo más uniforme posible, luego aplicar la carga en forma continua y sin choques, a una velocidad de $0,25 \text{ Mpa/s} \pm 0,05 \text{ Mpa/s}$ hasta alcanzar una franca rotura de la probeta.



Figura 15: Prensa de Ensayo utilizada para la Compresión Cilíndrica [Existente en LEMCO].

La norma establece el cálculo de la sección de ensayo según la fórmula siguiente:

$$S = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2$$

Finalmente, se calcula la resistencia a compresión expresando siguientes resultados:

$$R = \frac{P}{S}$$

En que:

R = tensión de rotura, expresada en megapascuales (Mpa);

P = carga máxima aplicada, expresada en newton (N);

S = sección de ensayo, expresada en milímetros cuadrados (mm²).

3.3.2 Flexotracción

A través de los procedimientos de este ensayo se determina la resistencia a la flexotracción de los hormigones caracterizados, para realización del correspondiente ensayo se debe contar con una prensa de ensaye (Figura 17) con los siguientes requerimientos.

- Debe tener la rigidez suficiente para resistir los esfuerzos del ensayo sin alterar las condiciones de distribución y ubicación de la carga y lectura de resultados.
- La sensibilidad de la prensa será tal que la menor división de la escala de lectura sea inferior o igual al 1% de la carga máxima.
- La exactitud de la prensa tendrá una tolerancia de $\pm 1\%$ de la carga dentro del rango utilizable de las escalas de lectura.
- En general el rango utilizable se considera comprendido entre el 10% de la lectura máxima en la respectiva escala de lectura.

Para los dispositivos de tracción por flexión, se debe contar con piezas para apoyo de la probeta y piezas para aplicar la carga, con sus correspondientes accesorios, y deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Sus elementos de contacto con la probeta tendrán la superficie cilíndrica (de este modo se logra un contacto rectilíneo).
- Se debe permitir que la carga y sus reacciones se apliquen verticalmente, y deben estar dispuestas de modo que las líneas de contacto sean paralelas entre sí y perpendiculares a la luz de ensayo.
- Contarán con accesorios que permitan fijar y mantener la luz de ensayo.
- Debe tener rotulas ajustables, a fin de evitar excentricidades.
- Tendrán una longitud igual o mayor al ancho, b de las probetas.

De acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NCh1038-2009, se deben acondicionar las probetas obtenidas según lo indicado en la norma NCh1017-2009, posteriormente debe seleccionarse la forma de aplicación de la carga, que en este caso corresponde a la aplicación de 2 cargas aplicadas en los límites del tercio

central, cumpliéndose la condición que la luz del ensayo es mayor o igual a la altura de la probeta confeccionada.

La distancia entre cada línea de apoyo y el extremo más cercano de la probeta a ensayar debe ser mayor o igual que 2,5 cm, posteriormente se trazan rectas finas sobre las cuatro caras mayores, de esta forma se marcan las secciones de apoyo y de carga de forma indeleble y que no alteren el tamaño forma o características estructurales de las probetas, determinando inmediatamente antes del ensayo, la masa de la probeta en kilogramos (kg) y se mide el largo de la probeta en el eje horizontal, aproximadamente en el punto medio de cada cara lateral.

Posteriormente se limpia la superficie de los elementos de apoyo y carga, y las zonas de contacto de la probeta, cuando se verifica esta condición, se coloca la probeta en la prensa de ensayo dejando la cara de llenado en un plano vertical, y haciendo coincidir las líneas de trazado con los elementos de apoyo y de carga correspondiente, donde el contacto entre la probeta y cada elemento de apoyo o de carga debe ser total como se muestra en la figura 16, aceptándose una separación menor o igual que 0,1 mm.

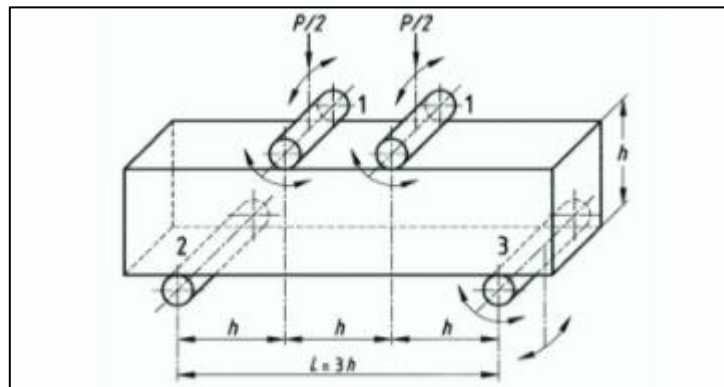


Figura 16: Ensayo de 2 cargas aplicadas en los límites del tercio central [NCh1038, 2009].



Figura 17: Prensa de Ensayo utilizada para la Flexotracción [Existente en LEMCO].

Finalmente, los resultados son expresados de la siguiente forma de acuerdo con el ensayo con cargas $P/2$ en los límites del tercio central de la luz de ensayo.

- i) *Tensión de rotura*: Si la fractura de la probeta se produce en el tercio central de la luz de ensayo, calcular la resistencia a la tracción por flexión como la tensión de rotura según la formula siguiente:

$$R = \frac{P * L}{b * h^2}$$

En que:

R = tensión de rotura, expresada en megapascuales (Mpa);

P = carga máxima aplicada, expresada en newton (N);

L = luz de ensayo de la probeta, expresada en milímetros (mm);

b = ancho promedio de la probeta en la sección de rotura, expresado en milímetros (mm).

h = altura promedio de la probeta en la sección de rotura, expresada en milímetros (mm).

- ii) *Tensión de rotura*: Si la fractura de la probeta se produce fuera del tercio central de la luz de la probeta, en la zona comprendida entre la línea de aplicación de carga y una distancia de 0,05 L de esa línea, calcular la resistencia a la tracción por flexión como la tensión de rotura según la fórmula siguiente.

$$R = \frac{3P * a}{b * h^2}$$

En que:

a = distancia entre la sección de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo de la línea central de la superficie inferior de la probeta, expresada en milímetros (mm).

Si la fractura se produce fuera del tercio central de la luz de ensayo y más allá de la zona indicada en el punto anterior, se debe desechar los resultados del ensayo. Expresar los resultados en megapascuales (Mpa) aproximado a 0,05 Mpa.

3.3.3 Coeficiente de Expansión Térmica

A través de los procedimientos de este ensayo se determina el coeficiente de expansión térmica de los hormigones caracterizados, para realización del correspondiente ensayo se debe contar con un equipo de medición ensaye (Figura 19) con los siguientes requerimientos.

- Debe contar con un dispositivo de medición de cambio de longitud (LVDT), con lectura digital con resolución mínima de 0.00025 mm y un rango adecuado para la prueba.
- El marco de soporte debe diseñarse de modo que no influya en la medición de cambio de longitud, a su vez debe soportar la muestra de manera que esta pueda ajustarse libremente a cualquier cambio de temperatura.

- El dispositivo de medición de temperatura debe ser sumergible con una resolución de 0.1 °C.
- Debe contar con un baño de agua de temperatura controlada con un rango de temperatura de 10 a 50 °C, capaz de controlar la temperatura a 0.1 °C.

De acuerdo con el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 336, se deben acondicionar las muestras a ensayar, consistiendo en núcleos perforados y rectificados con un diámetro nominal de 100 mm de diámetro nominal, extraídos a partir de las probetas confeccionadas siguiendo lo indicado en la norma NCh1017, en donde las muestras deberán ser rectificadas, quedando planas y paralelas, en la figura 18 se muestran las probetas en sus distintas etapas de acondicionamiento.



Figura 18: Proceso de probetas para obtener núcleos perforados a ensayar [elaboración propia].

Antes de realizar el ensayo, debido a que se sabe que el grado de saturación de las muestras influye en el coeficiente de expansión térmica medido, las muestras deben estar en una condición saturada para este procedimiento, acondicionándose por inmersión en agua de cal en un tanque de almacenamiento de agua a 23 ± 2 °C, por lo menos 48 horas y hasta que dos pesadas sucesivas de la muestra a intervalos de 24 horas muestren un aumento en peso no mayor de 0,5 por ciento, los valores de las pesadas de los intervalos, para todas las probetas ensayadas se muestran en el Anexo D.

De acuerdo con el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 336-11, inicialmente se debe adecuar el LVDT en el tanque de agua, asegurándose de mantener la altura del agua constante durante todo el ensayo y establecerse en el mismo nivel que el utilizado para calibrar el equipo, posteriormente se retira del tanque de almacenamiento de agua la probeta en estado de saturación y se mide su longitud a temperatura ambiente con una precisión de 0.1 mm, después de medir la longitud, se coloca la muestra en el aparato de medición asegurándose de que el extremo inferior de la muestra este firmemente colocada; Con la muestra en el marco a temperatura ambiente, se ajusta el cuerpo del LVDT de modo que el núcleo del LVDT esté ubicado en su punto medio.

Los pasos para realizar el ensayo se enumeran a continuación.

- i) Ajustar la temperatura del tanque de agua a 10 ± 1 °C, cuando el agua alcance esta temperatura, permitir que el agua permanezca a esta temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico de la muestra, como lo indica la lectura constante del LVDT tomado cada 10 minutos durante un periodo de media hora. La diferencia entre las lecturas máxima y mínima debe ser menor o igual a 0.00025 mm. Si no se cumple este criterio, se obtendrán lecturas adicionales de 10 minutos hasta que 4 lecturas consecutivas de 10 minutos se encuentren dentro del rango de 0.00025 mm.
- ii) Registrar las lecturas de temperatura del sensor con una precisión de 0.1 ° C. registrando la lectura del LVDT al 0.00025 más cercano.
- iii) Ajustar la temperatura del tanque de agua a 50 ± 1 ° C, cuando el agua alcance esta temperatura, permitir que el agua permanezca a esta temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico de la muestra, como lo indican lecturas constantes del LVDT de tomado cada 10 minutos durante un periodo de media hora.
- iv) Registrar las lecturas de temperatura del sensor con una precisión de 0.1 ° C. registrando la lectura del LVDT al 0.00025 más cercano.
- v) Ajustar la temperatura del tanque de agua a 10 ± 1 °C, cuando el agua alcance esta temperatura, permitir que el agua permanezca a esta temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico de la muestra, como lo

indica la lectura constante del LVDT tomado cada 10 minutos durante un periodo de media hora.

El resultado de la prueba es el promedio de los dos valores de CTE obtenidos de los dos segmentos de prueba, siempre que los dos valores estén dentro de 0.3 micro strain/°C entre sí. Si los dos valores no están dentro de 0.3 micro strain/°C entre sí, uno o más segmentos de prueba adicionales deberían completarse hasta que dos segmentos de prueba con éxito produzcan valores de CTE dentro de 0.3 micro strain/°C entre sí. el resultado de la prueba es el promedio de estos dos valores CTE.

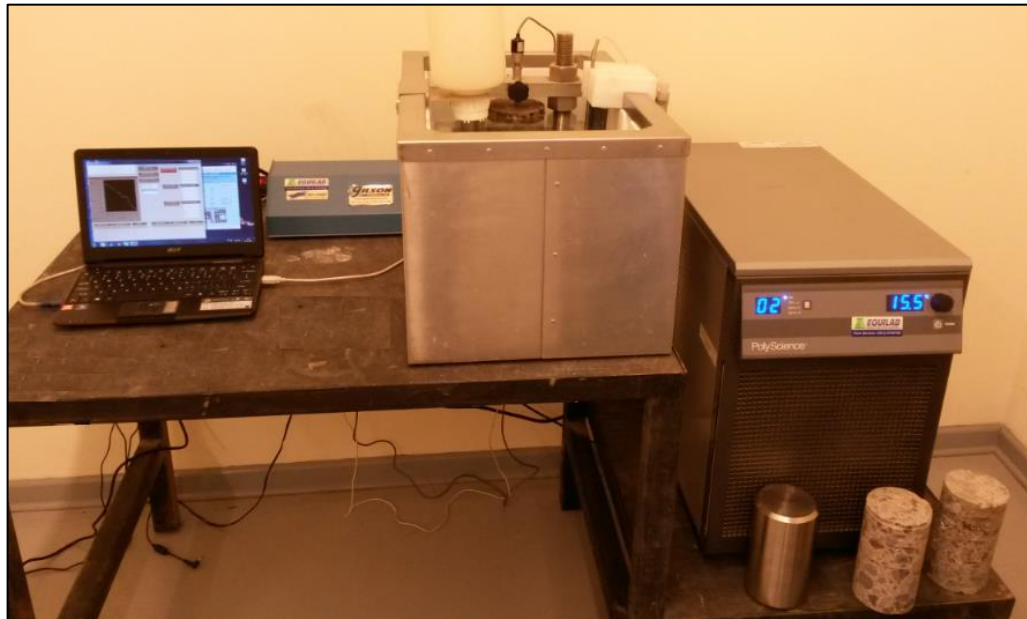


Figura 19: Equipo de medición utilizado [Existente en LEMCO].

Finalmente, se calcula el coeficiente de expansión térmica expresando siguientes resultados:

$$CET = (CET_1 + CET_2)/2;$$

$$CET_i = \left(\frac{\Delta L_a}{L_0} \right) / \Delta T;$$

En que:

ΔL_a = cambio de longitud real de la muestra durante el cambio de temperatura (mm);

L_o = longitud medida de la muestra a temperatura ambiente (mm);

ΔT = cambio de temperatura medido (promedio de los cuatro sensores) ($^{\circ}\text{C}$)
(aumento = positivo, disminución = negativo).

$$\Delta L_a = \Delta L_m + \Delta L_f$$

En que:

ΔL_m = cambio de longitud de la muestra medido durante el cambio de temperatura (mm) (aumento = positivo, disminución = negativo);

L_f = cambio de longitud del aparato de medición medido durante el cambio de temperatura (mm).

$$\Delta L_f = C_f * L_o + \Delta T$$

En que:

C_f = factor de corrección que representa el cambio en la longitud del aparato de medición con la temperatura ($\text{mm}^{-6}/\text{mm}/^{\circ}\text{C}$).

3.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

A continuación, se muestran las tablas de resultados en las cuales se reflejan los valores medios de resistencia a la compresión, resistencia a la flexotracción y coeficiente de expansión térmica, con sus respectivos coeficientes de variación, y adicionalmente el factor de relación entre la compresión y la flexotracción.

Para la resistencia a la compresión cilíndrica y la resistencia a la flexotracción se muestran los resultados promedios (de 3 muestras) de las probetas ensayadas a los 7,14 y 28 días para cada una de las 7 mezclas caracterizadas

Tabla 4.- Resultados de resistencia promedio a la compresión cilíndrica.

ID Mezcla	RESISTENCIA MEDIA A LA COMPRESIÓN CILINDRICA [Mpa]		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
M1	38.4	43.65	46.85
M2	27.2	32.1	36.9
M3	33	36.5	41.05
M4	36.45	41.3	46.45
M5	36.85	40.4	47.05
M6	44.9	51.3	56.95
M7	38.55	44.8	50.15

Tabla 5.- Resultados de resistencia promedio a la flexotracción.

ID Mezcla	RESISTENCIA MEDIA A LA FLEXOTRACCIÓN [Mpa]		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
M1	4.65	4.85	5.1
M2	3.8	4.4	4.5
M3	4	4.4	4.9
M4	4	4.5	5
M5	4.4	4.8	5.2
M6	4.3	4.85	5.3
M7	4.2	4.7	5.1

Tabla 6.- Relación Compresión/Flexión.

ID Mezcla	RELACION Fc'/ MR		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
M1	8.26	9	9.19
M2	7.16	7.3	8.2
M3	8.25	8.3	8.38
M4	9.11	9.18	9.29
M5	8.38	8.42	9.05
M6	10.44	10.58	10.75
M7	9.18	9.53	9.83

Tabla 7.- Coeficientes de variación para ensayos de compresión cilíndrica y flexotracción.

ID MEZCLA	EDAD	COEFICIENTE VARIACIÓN	
		f _c	MR
M1	07 DÍAS	1.34	5.36
	14 DÍAS	2.81	3.89
	28 DÍAS	1.48	6.98
M2	07 DÍAS	4.84	4.92
	14 DÍAS	0.64	4.38
	28 DÍAS	2.58	5.44
M3	07 DÍAS	4.93	5.40
	14 DÍAS	2.96	5.95
	28 DÍAS	4.70	6.25
M4	07 DÍAS	2.97	5.68
	14 DÍAS	3.70	5.90
	28 DÍAS	1.42	3.74
M5	07 DÍAS	3.10	5.11
	14 DÍAS	2.96	5.17
	28 DÍAS	4.78	6.10
M6	07 DÍAS	3.78	4.56
	14 DÍAS	2.70	5.29
	28 DÍAS	3.33	4.64
M7	07 DÍAS	2.80	5.91
	14 DÍAS	2.14	4.37
	28 DÍAS	2.86	4.55

Para el coeficiente de expansión térmica se muestran los resultados de todas las muestras ensayadas, las probetas ensayadas a los 28 días para cada una de las 7 mezclas caracterizadas, descartando 2 mediciones de los resultados finales

una de la mezcla M3 y la restante de la mezcla M6, debido que al cortarlas y posteriormente rectificarlas, el largo de las probetas de las mezclas mencionadas, no quedaron dentro del rango normativo.

Tabla 8.- Resultados parciales coeficiente de expansión térmica (CET).

ID Mezcla	CET				
	P1	P2	P3	Promedio	CV
M1	8.81	8.63	8.88	8.77	1.22
M2	8.3	8.18	8.28	8.25	0.64
M3	8.21	8.3	S/D	8.26	0.55
M4	8.66	8.98	9.15	8.93	2.26
M5	9.05	8.76	9.05	8.95	1.52
M6	9.2	S/D	9.18	9.19	0.11
M7	8.97	9.08	8.84	8.96	1.09

Los valores de coeficientes de variación de todas las muestras de encuentran por debajo o cercanas a un valor aceptable para el ensayo que es de 1.5% [Crawford et al. 2010], por lo cual se consideran los resultados aceptables.

3.5 ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

A continuación se analizan comparativamente los resultados obtenidos en laboratorio del coeficiente de expansión térmica, la resistencia a la compresión cilíndrica y la resistencia a la flexotracción de las mezclas caracterizada; identificando si existen grados de asociación entre las propiedades mecánicas del estudio; Adicionalmente se contraponen los grados de asociación identificados con los resultados obtenidos en una investigación precursora en el país con relación al efecto del CET en pavimentos de hormigón.

3.5.1 CET y la Resistencia a la Compresión Cilíndrica

En la Figura se muestra la regresión lineal para el CET obtenido y la Compresión Cilíndrica por muestra de hormigón.

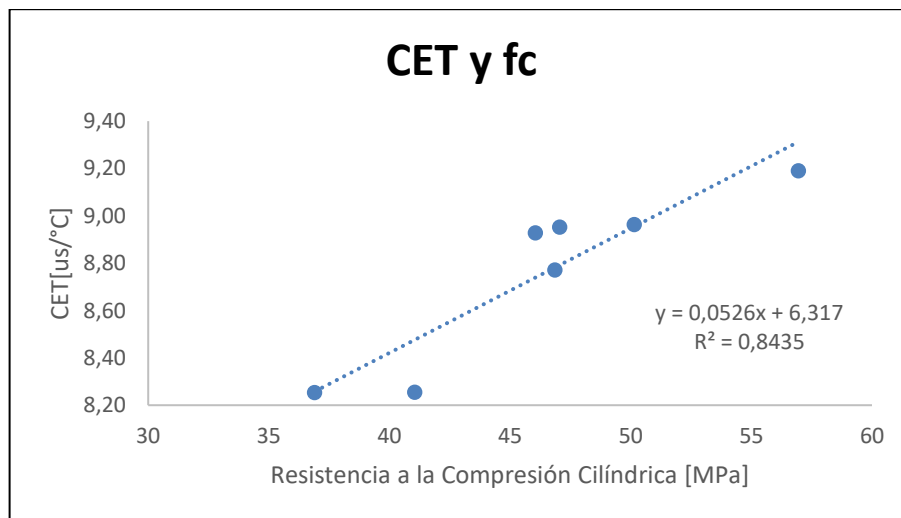


Figura 20.- Regresión lineal de CET obtenido y Resistencia a la Compresión Cilíndrica.

El coeficiente de determinación R^2 es de 0.8435 por lo que el grado de asociación lineal entre las variables es alto.

Un análisis ANOVA entre las variables, que se observa en la Tabla 9, muestra la significancia de la relación existente entre CET obtenido y la resistencia a la

compresión cilíndrica. La hipótesis nula corresponde a que no existe ningún grado de relación.

Tabla 9.- ANOVA para relación *CET obtenido y Resistencia a la Compresión Cilíndrica*.

Regresora	F	α	VALOR P	Ho
fc	243.39	0.1	0.000	Se rechaza

La hipótesis se rechaza y por tanto existe evidencia de que existe una relación entre el CET obtenido y la resistencia a la compresión cilíndrica con confiabilidad sobre el 95%.

Los resultados alcanzados se contraponen a resultados obtenidos en una investigación precursora en el país con relación al efecto del CET en pavimentos de hormigón, los cuales se pueden observar en la figura 21, en donde se realizó una regresión lineal en base a 7 mezclas de hormigón.

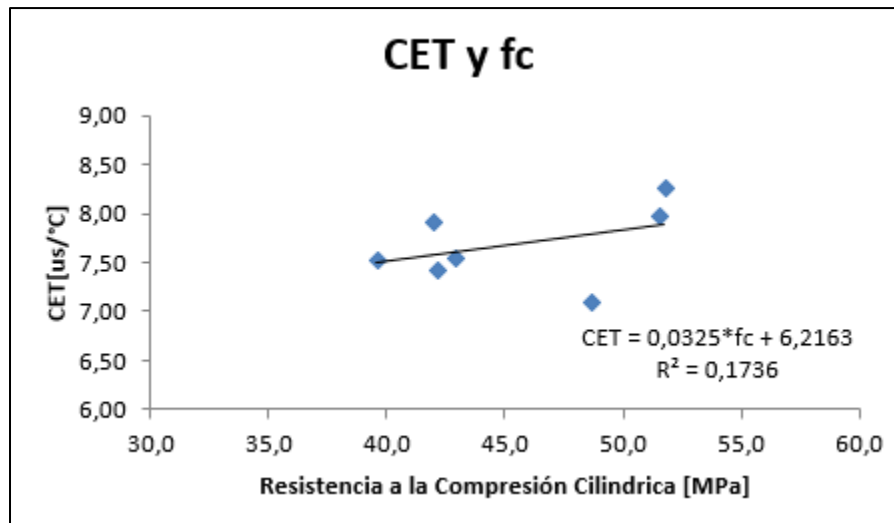


Figura 21: Regresión lineal de CET obtenido y Resistencia a la Compresión Cilíndrica [Bravo, 2015].

A diferencia del alto el grado de asociación lineal que se aprecia en la figura 20, el coeficiente de determinación R^2 en la figura 21 es de 0.17, por lo que el grado de asociación lineal entre las variables es bastante bajo, sin embargo ambos resultados no son comparables debido a las condiciones de curado, si bien tuvieron el mismo curado inicial, el curado posterior no fue el mismo ya que en lugar de efectuar un

curado con inmersión se utilizó curado en cámara, cambiando significativamente la resistencia potencial de las probetas, en donde cabe señalar que el método más confiable es sumergir en agua saturada de cal las probetas recién moldeadas y continuar en laboratorio, en piscina, hasta el momento de su ensayo [Holmgren et al. 2005], método el cual fue usado en esta investigación.

3.5.2 CET y Módulo de Ruptura

En la Figura 22 se muestra la regresión lineal para el CET obtenido y el Módulo de Ruptura por tipo de hormigón.

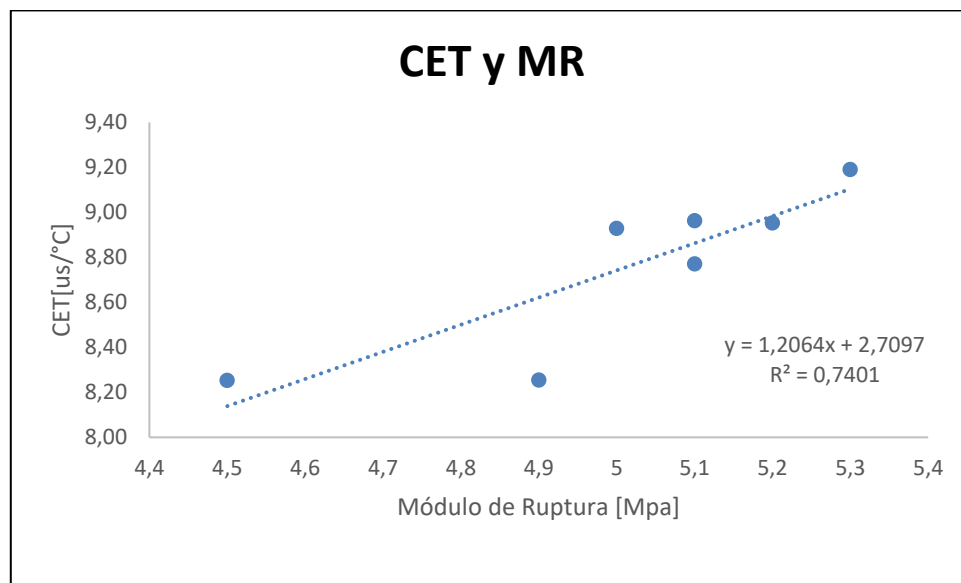


Figura 22.- Regresión lineal de CET obtenido y el Módulo de Ruptura.

El coeficiente de determinación R^2 es de 0.7401 por lo que el grado de asociación lineal entre las variables es alto.

Un análisis ANOVA entre las variables, que se observa en la Tabla 10, muestra la significancia de la relación existente entre el CET obtenido y el Módulo de Ruptura. La hipótesis nula corresponde a que no existe ningún grado de relación.

Tabla 10.- ANOVA para relación CET obtenido y el Módulo de Ruptura.

Regresora	F	α	VALOR P	Ho
MR	487.17	0.1	0.000	Se rechaza

La hipótesis se rechaza y por tanto existe evidencia de que existe una relación entre el CET obtenido y el Módulo de Ruptura con confiabilidad sobre el 95%.

Los resultados alcanzados se comparan a resultados obtenidos en una investigación precursora en el país con relación al efecto del CET en pavimentos de hormigón, los cuales se pueden observar en la figura 23, en donde se realizó una regresión lineal en base a 7 mezclas de hormigón.

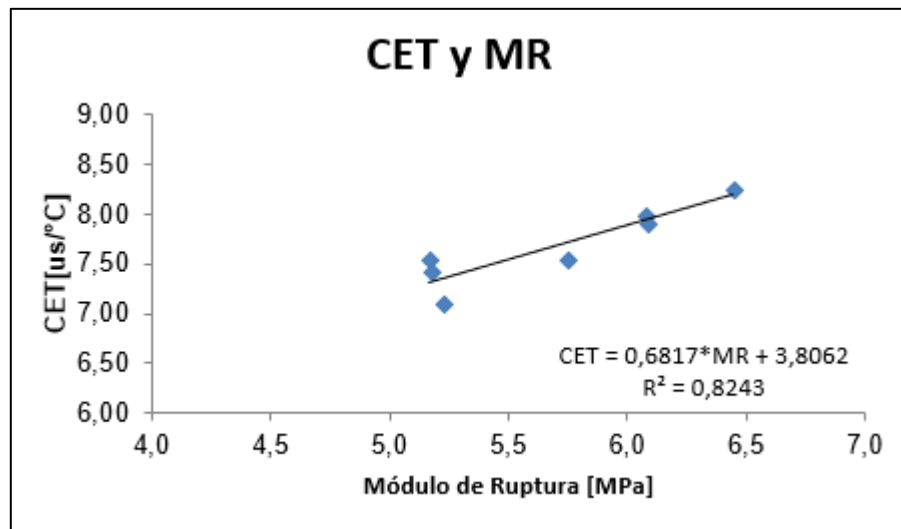


Figura 23: Regresión lineal de CET obtenido y el Módulo de Ruptura [Bravo, 2015].

A diferencia de las probetas cilíndricas, en el curado de las probetas prismáticas las condiciones tanto de curado inicial como el curado posterior fue similar, obteniéndose en ambos casos un coeficiente de determinación R^2 alto, de la misma forma se aprecia en la tabla 11 el análisis ANOVA entre las variables en donde la hipótesis se rechaza y por tanto existe evidencia de que existe una relación entre el CET obtenido y el Módulo de Ruptura con confiabilidad sobre el 95%.

Tabla 11.- ANOVA para relación CET obtenido y el Módulo de Ruptura [Bravo, 2015].

Regresora	F	α	VALOR P	Ho
MR	29,75	0,1	0,0028	Se rechaza

3.5.3 Resistencia a la Compresión Cilíndrica y Módulo de Ruptura

En la Figura se muestra la regresión lineal para la Compresión Cilíndrica y el Módulo de Ruptura por muestra de hormigón.

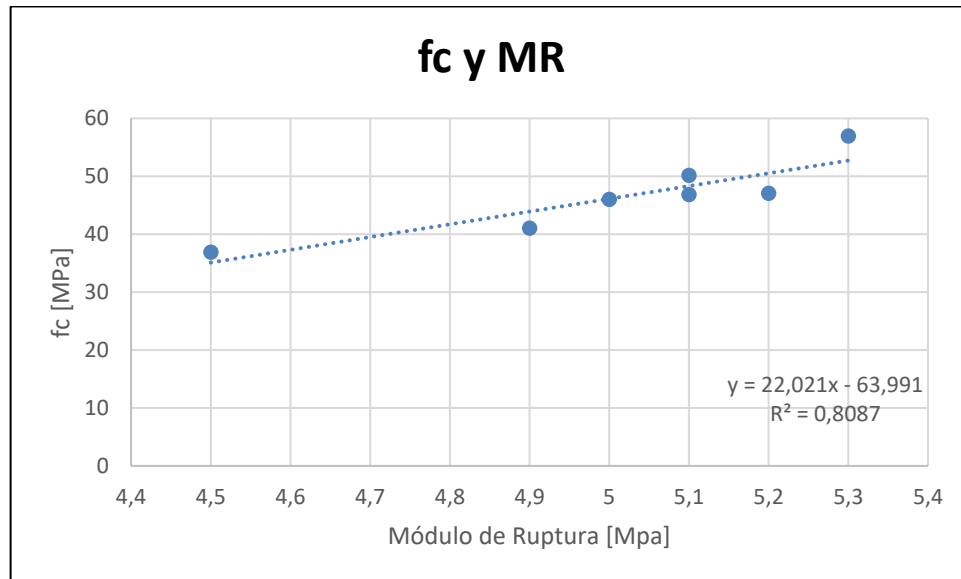


Figura 24.- Regresión lineal de Resistencia a la Compresión Cilíndrica y el Módulo de Ruptura.

El coeficiente de determinación R^2 es de 0.8087 por lo que el grado de asociación lineal entre las variables es alto.

Un análisis ANOVA entre las variables, que se observa en la Tabla 12, muestra la significancia de la relación existente entre el Módulo de Ruptura y Resistencia a la Compresión Cilíndrica. La hipótesis nula corresponde a que no existe ningún grado de relación.

Tabla 12.- ANOVA para relación Resistencia a la Compresión Cilíndrica y el Módulo de Ruptura.

Regresora	F	α	VALOR P	Ho
MR	487.17	0.1	0.000	Se rechaza

La hipótesis se rechaza y por tanto existe evidencia de que existe una relación entre el Módulo de Ruptura y Resistencia a la Compresión Cilíndrica con confiabilidad sobre el 95%.

Existe un mayor grado de asociación entre el CET y la Compresión Cilíndrica, esto ocurre debido que las muestras ensayadas para el coeficiente de expansión térmica fueron extraídas de moldes los cuales tenían las mismas características tanto geométricas como de curado.

Por otro lado, las vigas preparadas para los ensayos de flexotracción si bien tienen un alto grado de asociación, la ganancia de resistencia al transcurrir el tiempo no es igual al de los cilindros, ya que la superficie expuesta es mayor, en el gráfico mostrado a continuación se muestra gráficamente como cambia la relación de la resistencia a compresión cilíndrica y la de flexotracción.

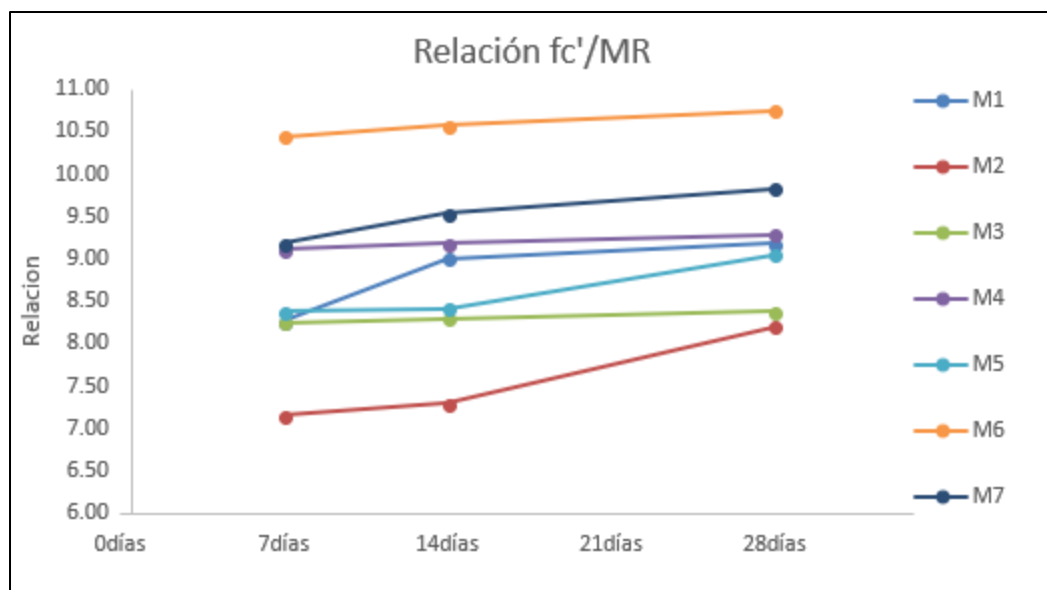


Figura 25.- Relación entre Resistencia a la Compresión Cilíndrica y el Módulo de Ruptura.

Se observa un incremento de la relación correspondiente a la compresión cilíndrica y flexotracción para todas las muestras, esto ocurre principalmente por las características inherentes de cada ensayo, donde la ganancia de resistencia en las

probetas cilíndricas para el ensayo a compresión es mayor que las Vigas preparadas para el ensayo a flexotracción.

También se establece una asociación entre el valor promedio de la relación entre variables y la resistencia de cada muestra de hormigón, donde las muestras con mayores resistencias tanto a compresión cilíndrica como las de flexotracción presentaron una relación en promedio es mayor, por lo tanto, se debe considerar como un factor adicional al grado de asociación el cual tiene alta influencia en el valor del CET.

A continuación, se muestra una tabla comparativa entre las diferencias relevantes entre los parámetros en estudio.

Tabla 13.- Tabla comparativa de ensayos por tipo de probeta [elaboración propia].

Parámetros	Flexotracción	Compresión Cilíndrica
Tipo de Probeta	Viga	Cilindro
Dimensión de Probeta	15 x 15 x 53 cm	15 diámetro x 30 de alto
Curado	Debe ser más riguroso por tener mayor superficie expuesta	Normal
Ensayo	Complejidad Alta por tener zonas específicas de Apoyo	Complejidad Baja
Desviación estándar	ALTA	BAJA

Cabe señalar que estudios realizados por cemento melón determinaron un factor de conversión de 9.1 para resistencias a flexión entre 5.0 a 6.0 [Mpa], donde el factor indicado se encuentra dentro del rango obtenido para las muestras de mayor de resistencia.

4. DISEÑO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN CON FIBRA BASADO EN ECUACIONES DE DAÑO POR FATIGA EMPÍRICO-MECANICISTAS

En este apartado, extraído del instructivo MOP de difusión de nuevas tecnologías y especificaciones técnicas y de la guía de diseño Optipave 2, se describe resumidamente la base de los softwares a utilizar para la realización de diseños de pavimentos de los hormigones caracterizados, correspondiente al procedimiento de diseño empírico-mecanicista para pavimentos de hormigón con fibras, sin armaduras y sin barras de traspaso de carga basado en las ecuaciones de daño por fatiga del proyecto NCHRP 1-37^a (MEPDG, AASHTP, EEUU), en donde se desprenderán los valores que finalmente se utilizaran en las corridas de los programas.

El proceso propiamente tal, requiere una participación activa del diseñador proponiendo un diseño inicial de acuerdo a los recursos disponibles y posteriormente analizar las tensiones críticas que se producen en las losas del pavimento producto de la combinación de las cargas de borde, efectos de temperatura y distintas condiciones de análisis, corroborando que los resultados se encuentren dentro del rango deseado, esto incluye la verificación de 5 mecanismos de falla los cuales son agrietamiento transversal en el tercio central de la losa, agrietamiento longitudinal, agrietamiento de esquina, escalonamiento y el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), si el diseño no satisface los criterios de desempeño. Si el resultado del análisis no cumple con los criterios definidos, la propuesta inicial se modifica, para ser corrida nuevamente hasta que los criterios sean satisfechos.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El proceso general de diseño fibras se ilustra en la figura 26. Los pasos principales se enumeran como sigue:

1. Generar un diseño preliminar para condiciones específicas locales como son el tránsito, clima y fundación, definiendo un arreglo estructural de capas, definiendo propiedades del hormigón y otras propiedades de los materiales, y características de construcción y diseño.

2. Definir los criterios para el desempeño aceptable del pavimento, al final del periodo de diseño.
3. Seleccionar los niveles de confiabilidad deseados para cada indicador de desempeño.
4. Utilizar el software de diseño para lograr:
 - Procesar los datos para obtener valores de datos de tránsito, materiales y climas requeridos en las evaluaciones del diseño durante el periodo completo de diseño.
 - Calcular la respuesta estructural (esfuerzos y deflexiones).
 - Predecir los deterioros clave.
 - Predecir el Índice Internacional de rugosidad (IRI).
 - Utilizar el software de diseño de la guía para lograr:
5. Evaluar el desempeño esperado del diseño preliminar para el nivel de confiabilidad elegido.
6. Modificar el diseño y repetir los pasos 4 al 5 hasta que el diseño cumpla con los criterios establecidos.

Aquellos diseños que cumplan con los criterios de desempeño definidos para el nivel de confiabilidad especificado se consideran factible para adoptar espesores, y pueden ser considerados en adelante para otras evaluaciones.

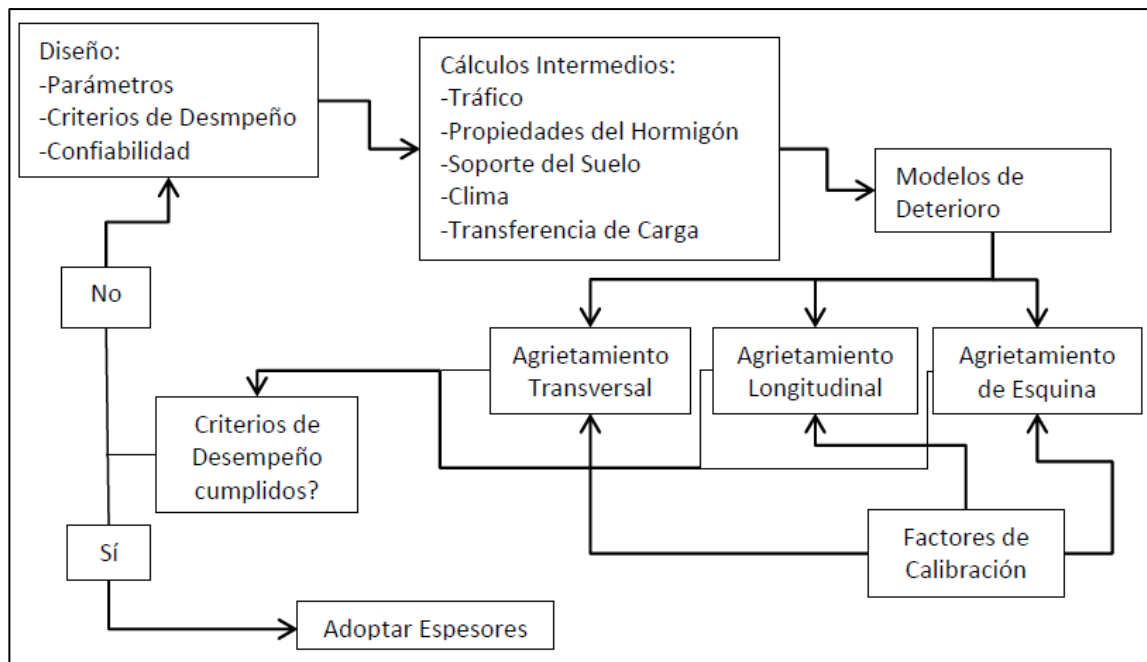


Figura 26.- Diagrama de Flujo del Método utilizado

4.2 MODELOS DE DETERIOROS

4.2.1 Agrietamiento

El método utilizado para la predicción de agrietamientos incorpora el concepto de estructura equivalente y utiliza redes neuronales para obtener las tensiones y deformaciones del material, para así ver el deterioro en los pavimentos.

Se calculan las tensiones generadas en el hormigón para diferentes condiciones (alabeo, espesor, carga, tráfico, tipos de eje, etc.).

Se suma el daño por fatiga generado en cada punto de control. Los datos de entrada son las características de los materiales y el espesor de cada capa.

El agrietamiento obtenido por el software es de tres tipos: transversal, longitudinal y de esquina.

El número de repeticiones de carga admisibles es una función de la tensión y la resistencia del hormigón, según la siguiente ecuación:

$$\log(N_{ijkl}) = 2 \times \left(\frac{C_3 \times \sigma_{ijkl}}{MOR \times C_1 \times C_2} \right)^{-1,22};$$

En que:

N_{ijkl} = Pasadas permitidas para ejes en la posición k, alabeo i (temperatura), nivel de carga j, y tensión crítica en la parte superior e inferior;

σ_{ijkl} = Tensiones principales para ejes en la posición k, alabeo i y carga j, y tensión crítica en la parte superior e inferior;

MOR = Resistencia a la flexión del hormigón;

C_1 = Factor de corrección por geometría de la losa y su espesor; (solo optipave)

C_2 = Factor de corrección estructural de fibra; (solo optipave)

C_3 = Factor de corrección de carga perimetral; (solo optipave)

Donde:

$$C_2 = (1 + R_{3,e})$$

$R_{3,e}$ = Razon equivalente de resistencia residual a 3 mm de flecha en ensay de viga de aire.

$$R_{3,e} = \frac{f_{150}^{150}}{MOR} * 100$$

Con:

f_{150}^{150} = Resistencia residual según norma ASTM C1609/C1609M-12.

Considerando que la incorporación de fibra en pavimentos de hormigón es una tecnología relativamente reciente, se recomienda diseñar los pavimentos de hormigón con fibra considerando un 20% de resistencia residual [LNV, 2012], por lo que finalmente se considera un factor C_2 de 1.2.

Posteriormente utilizando la hipótesis de Miner, se calcula el daño por fatiga para cada posición en la parte superior e inferior de la losa sobre con la siguiente fórmula:

$$FD_k = \frac{n_{ijk}}{N_{ijk}};$$

En que:

FD_k = Daño por fatiga para una posición determinada del eje k;

n_{ijk} = Número de pasadas para la tensión local I para condición i,j,k;

N_{ijk} = Número de pasadas permitidas para la tensión local I para condición i,j,k.

El porcentaje de losas agrietadas se determinan para el 50% de confiabilidad para cada posición superior e inferior, basado en MEPDG daño causado por fatiga en el modelo de agrietamiento [ARA, 2007]:

$$\%Crack_{kl} = \frac{1}{1+FD_{kl}^{-1.98}};$$

En que:

$\%Crack_{kl}$ = Porcentaje de losas agrietadas en posición del eje k;

FD_{kl} = Daño por fatiga con eje en la posición k y ubicación de esfuerzo I Combinando el agrietamiento desde cada posición para determinar el total de fisuras en el pavimento para el 50 por ciento de confiabilidad.

Donde:

$$TCrack_l = MAX(\%Cracks_{kl});$$

$$TTCracks_{50} = TCracks_i + TCracks_{ss} - TCracks_i * TCracks_{ss};$$

En que:

$TTCracks_{50}$ = % total de losas fisuradas, 50% de confiabilidad;

$TCracks_i$ = % losas fisuradas desde la superficie;

$TCracks_{ss}$ = % losas fisuradas desde parte inferior.

La Confiabilidad es determinada con la misma metodología que el MEPDG (ARA 2007) y se presenta a continuación:

$$TCrack_m = TTCracks_{50} \times Z_r \times S_e;$$

$$S_e = (5.3116 \times TTCracks_{50}^{0.3903}) + 2.99;$$

En que:

$TTCracks_m$ = % total agrietadas, m % confiabilidad;

$TCracks_{50}$ = % losas agrietadas, 50% confiabilidad;

Z_r = Coeficiente normal estándar para un nivel de confianza dado;

S_e = Error estándar.

4.2.2 Escalonamiento

El método para la predicción del escalonamiento realiza un cálculo incremental, basado en semestres y el nivel de escalonamiento del periodo anterior, afecta la magnitud del incremento.

El escalonamiento en un semestre es la suma de los incrementos de cada semestre anterior en la vida del pavimento, desde la apertura al tráfico, usando el siguiente modelo [Khazanovich et al, 2004].

$$Fault_m = \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i;$$

$$\Delta Fault_i = C_{34} \times (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 \times DE_i;$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_0 + C_7 \times \sum_{j=1}^m DE_j \times \log (1 + C_5 \times 5.0^{EROD})^{c_6};$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} \times \delta_{curling} \times \left[\log (1 + C_5 \times 5.0^{EROD}) \times \log \left(\frac{P_{200} + WetDays}{p_s} \right) \right]^{c_6};$$

En que:

$Fault_m$ = Escalonamiento promedio en el semestre m, pulg;

$\Delta Fault_i$ = Incremento semestral en escalonamiento promedio durante el semestre i, pulg;

$FAULTMAX_i$ = Máximo escalonamiento promedio para semestre i, pulg;

$FAULTMAX_0$ = Máximo escalonamiento promedio inicial, pulg;

$EROD$ = Factor de erosión de la base/subbase;

DE_i = Diferencial de energía acumulado durante el semestre i;

$EROD$ = Factor de erosión de la base/subbase;

p_{si} = Sobrecarga de la subrasante, libras;

$\delta_{curling}$ = Máxima deflexión mensual, debido al alabeo de temperatura y humedad de la losa;

P_{200} = Porcentaje de material de la base que pasa la #200;

$WetDays$ = Número de días promedio al año con precipitaciones.

C_1 a C_8 y C_{12} , C_{34} son constantes de calibración;

Donde:

$$C_{12} = C_1 + C_2 \times FR^{0.25} ;$$

$$C_{34} = C_3 + C_4 \times FR^{0.25} ;$$

$$C_1 = 1.29 ;$$

$$C_2 = 1.1 ;$$

$$C_3 = 0.001725 ;$$

$$C_4 = 0.0008 ;$$

$$C_5 = 250 ;$$

$$C_6 = 0.4 ;$$

$$C_7 = 1.2 ;$$

FR = Índice de congelamiento de la base (Porcentaje del tiempo en el año en que la base se encuentra bajo los 0°C.

4.2.3 IRI

El Modelo para el cálculo de la predicción del IRI fue calibrado y validado usando LTPP [FHWA,2009] y otros datos en terreno para asegurar que entrega resultados validos bajo cierta variedad de condiciones climáticas y de terreno. El modelo es el siguiente:

$$IRI = IRI_i + C_1CRK + C_2SPALL + C_3TFAULT + C_4SF;$$

En que:

IRI = IRI predicho, pulg/milla;

IRI_i = Rugosidad inicial, medida en términos de IRI, pulg/milla;

CRK = Porcentaje de losas agrietadas;

$SPALL$ = Porcentaje de losas con desconches;

$TFAULT$ = Escalonamiento promedio acumulado por milla, pulg;

SF = Factor de sitio;

$C_4 = 0.013$;

$C_5 = 0.007$;

$C_6 = 0.0008$;

$SF = AGE(1 + 0.5556 FI)(1 + P_{200})/1,000,000.$

Donde:

AGE = Edad del pavimento, años;

FI = Índice de congelamiento, °F-días;

P_{200} = Porcentaje de material fino (material que pasa por la malla N°200).

4.3 PARAMETROS DE DISEÑO

Los parámetros de diseño que se utilizaran en este estudio se pueden dividir en cinco categorías como se muestra a continuación. Cada una de estas categorías será explicada de forma más detallada en los sub-capítulos siguientes.

- Parámetros de Diseño del Tipo de Pavimento.
- Parámetros de Diseño del Tráfico.
- Propiedades del Hormigón.
- Parámetros del Hormigón.
- Parámetros del Suelo.
- Clima.

4.3.1 Parámetros de Diseño del Tipo de Pavimento

Vida de Diseño

La vida de diseño del pavimento es la cantidad de tiempo (en años) en que se espera que un pavimento cumpla con un cierto estándar de calidad, de acuerdo con los criterios definidos en su diseño inicial. El desempeño se predice desde el momento de la apertura al tráfico y puede establecerse dependiendo de la clasificación de la vía, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 14.- Vida de Diseño Recomendado según clasificación del Pavimento.

Clasificación de la Vía	Vida de Diseño (Años)
Rutas Locales y Calles	15 - 20
Calles Principales y vías de mediano tráfico	20
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto tráfico	20 - 40

Largo de Losa

El largo de una losa corresponde al espaciamiento existente entre una junta transversal y la siguiente, depende de la ubicación de construcción del pavimento y las técnicas, equipos y materiales utilizados durante su construcción; el largo de la losa se debe definir antes del cálculo del espesor, para el software a utilizar el rango deseado se encuentra entre 1 y 2,5 m.

Espesor de la Losa de Hormigón

El espesor de la losa de hormigón soportante, que será la carpeta de rodadura, se expresa en milímetros y el espesor puede ir de 60 mm a 240 mm. Este programa de diseño permite evaluar el desempeño de un cierto espesor del pavimento o realizar una iteración que obtiene el espesor mínimo que cumple con el umbral de diseño especificado.

Tipo de Borde

El tipo de borde se refiere a la condición de borde del pavimento, lo cual tiene dos efectos, primero define el soporte lateral que entrega la berma al pavimento en términos de transferencia de carga y por otro lado aleja el tráfico del borde. Se definieron cuatro tipos de borde que se muestran en la tabla 15.

Tabla 15.- Tipo de Borde y su efecto en términos de soporte y circulación de tráfico.

Tipo de Borde	Soporte de la Estructura	¿Aleja el tráfico del Borde?
Borde Libre	Nulo	No
Berma Granular / Asfáltica	Muy Leve	No
Berma de Hormigón	Leve	No
Vereda	Mediano	Si

Sobreechancho en las Losas

El sobreechancho en la losa exterior del pavimento mejora notablemente el desempeño de este al alejar de manera significativa el tráfico del borde ya que aumenta la distancia entre la línea de demarcación externa con el borde del pavimento.

Barras de Transferencia de Carga

El uso de barras de transferencia de carga en juntas transversales permite una mayor y más prolongada transferencia de carga en la junta transversal, mejorando el comportamiento tanto estructural como el escalonamiento. Su uso se recomienda para tráfico altos. (> 15.000.000 EE).

IRI Inicial

Es el IRI en el pavimento, justo antes de realizar la apertura al tráfico.

Porcentaje de Losas Agrietadas

Es el umbral de daño aceptado, dado un nivel de confianza que se espera tenga el pavimento al final de su vida de diseño. El nivel de daño máximo admisible depende de la importancia de la vía. En la siguiente tabla se muestran valores recomendados según el tipo de vía:

Tabla 16.- Valores Recomendados de Porcentaje Máximo Admisible de Losas Agrietadas según la Clasificación de la Vía [Covarrubias y Binder, 2013].

Clasificación de la Vía	Porcentaje Máximo Admisible de Losas Agrietadas
Rutas Locales y Calles	30% - 50%
Calles Principales y vías de mediano tráfico	10% - 30%
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto tráfico	10%

IRI final de diseño

IRI máximo admisible que deberá cumplir el pavimento. En caso de superar ese valor el pavimento deberá ser sometido a algún tratamiento que permita bajar los niveles de IRI. En general el valor máximo permitido es de 2,8 m/km para Chile.

Escalonamiento Promedio Final de diseño

Escalonamiento máximo admisible que deberá cumplir el pavimento. En caso de superar ese valor el pavimento deberá ser sometido a algún tratamiento que permita bajar los niveles de IRI. En general el valor máximo permitido es de 5 mm para Chile.

Confiabilidad

Grado de confiabilidad del diseño, que se controla por el factor de confiabilidad (M) que es función de un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal

(Zr) y de la desviación normal del error combinado (Se) de todos los parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento.

La desviación normal del error combinado (Se), es la dispersión de resultados entre el daño por fatiga calculado y el daño medido real, esto incluye las dispersiones inherentes a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento, entre los cuales tienen una participación preponderante los errores que pudieran darse en la predicción del tránsito solicitante y el grado de variabilidad que presentan los suelos de la subrasante. Cuando el nivel de solicitaciones es muy elevado, la probabilidad de errar por defecto en la predicción es menor, debido a que la pista de diseño se encuentra a niveles cercanos a la saturación; asimismo, entre mayor es la dispersión de los valores representativos de los suelos de la subrasante, existe una probabilidad más alta de fallas. Por último, con el propósito de minimizar los trabajos de mantenimiento durante la vida de servicio de la obra, el nivel de confianza del diseño debe crecer en la medida que aumenta el tránsito.

Este método permite asignar de forma diferente niveles de confiabilidad según el tipo de deterioro y se divide en:

- Confiabilidad Porcentaje de Losas Agrietadas
- Confiabilidad IRI Final de Diseño
- Confiabilidad Escalonamiento Final Promedio

Valores Recomendados según la clasificación de la vía, se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17.- Confiabilidad según la clasificación de la vía [Covarrubias y Binder, 2013].

Clasificación de la Vía	Urbanas	Rurales
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico	85% - 97%	80% - 95%
Calles Principales y vías de Mediano Tráfico	80% - 95%	75% - 90%
Calles de Bajo Tráfico	75% - 85%	70% - 80%
Pasaje	50% - 75%	50% - 75%

4.3.2 Tráfico

Tráfico por ejes equivalentes

Es un parámetro que transforma los diferentes ejes que circulan por una ruta, a un eje simple de rueda doble (E.S.R.D) de 80 KN de peso, considerado como eje patrón (Daño Equivalente). El factor de equivalencia es el cuociente que resulta entre el número de ejes de una configuración y peso, necesarios para originar una determinada pérdida de serviciabilidad, respecto del número de ejes patrón requerido para producir la misma pérdida de serviciabilidad; el valor de este cuociente es el factor de ejes equivalentes.

Tasa de Crecimiento

Crecimiento anual promedio del tráfico, calculado en base al crecimiento que experimentará el pavimento durante su vida.

Tipo de Tráfico

Es el tráfico que modela de mejor forma el tráfico en el proyecto. En caso de que se tenga información precisa del tipo de tráfico que circulará por el pavimento, es posible agregarlo como nuevo tipo de tráfico, a partir de una planilla Excel.

Se definen los tipos de tráfico en función a la información disponible o los supuestos de tráfico a proyectar.

Tabla 18.- Tipos de Tráfico [Covarrubias y Binder, 2013].

Porcentaje de Flujo de Buses	Tipo de Camiones		Grupo TTC
	Múltiples Remolques	Remolque Simple y de una unidad	
Nulo a Bajo (<2%)	Relativamente alto número de camiones con múltiples remolques (>10%)	Predominio de remolque simple	5
		Alto porcentaje de camiones de remolque simple, pero con algunos camiones de una unidad	8
		Tráfico de camiones mixto, con alto número de camiones con remolque simple	11
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	13
		Predominio de camiones de una unidad	16
	Número moderado de camiones con múltiples remolques (2 a 10%)	Predominio de remolque simple	3
		Tráfico de camiones mixto, con alto porcentaje de camiones con remolque simple	7
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual porcentaje de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	10
		Predominio de camiones de una unidad	15
		Predominio de remolque simple	1
Bajo a Moderado (entre 2 y 25%)	Bajo a Nulo (<2%)	Predominio de remolque simple con bajo número de camiones de una unidad	2
		Predominio de remolque simple con bajo a moderado número de camiones de una unidad	4
		Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones con remolque simple	6
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	9
		Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones de una unidad	12
		Predominio de camiones de una unidad	14
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	17

Distribución Lateral de Tráfico

El efecto que produce la ubicación con respecto al borde del pavimento es significativo, por lo tanto, es importante modelar el pavimento, con distintas posiciones de los vehículos, con respecto al borde del pavimento. La posición en que pasa un cierto vehículo tiene una distribución normal con media 45 cm desde la línea de demarcación del pavimento y una desviación estándar de 25 cm.

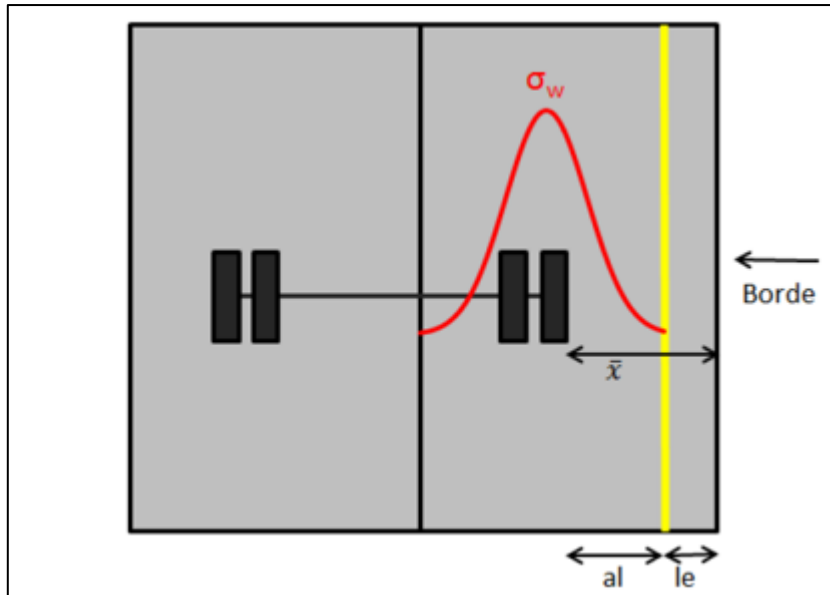


Figura 27.- Distribución lateral típica de un pavimento de hormigón.

Efecto de Soleras y Sobreancho en la distribución lateral del tráfico

Al utilizar losas con sobreancho o soleras en el borde, aumenta de forma significativa la distancia en que los vehículos se desplazan con respecto al borde del pavimento, comparado a los otros tipos de borde; La solera aumento la distancia entre la línea de demarcación del pavimento y la rueda exterior del vehículo ($al + lc$) y además disminuye la desviación estándar de la distribución del tráfico.

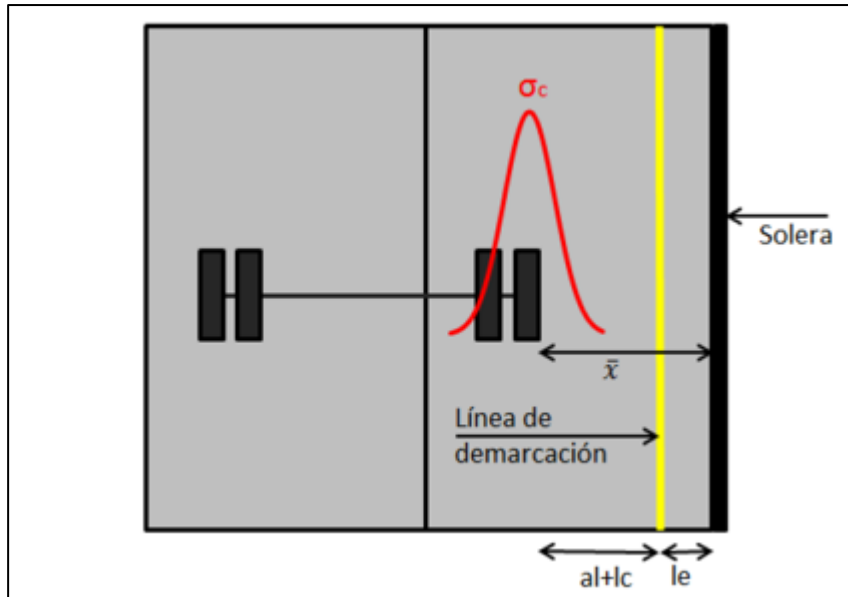


Figura 28.- Distribución lateral típica de un pavimento con solera en el borde.

El efecto del sobreancho en una losa es similar al de la solera, al aumentar la distancia media del borde. Esto ocurre debido a un aumento en la distancia entre el borde del pavimento y la línea de demarcación ($L_e + L_w$)

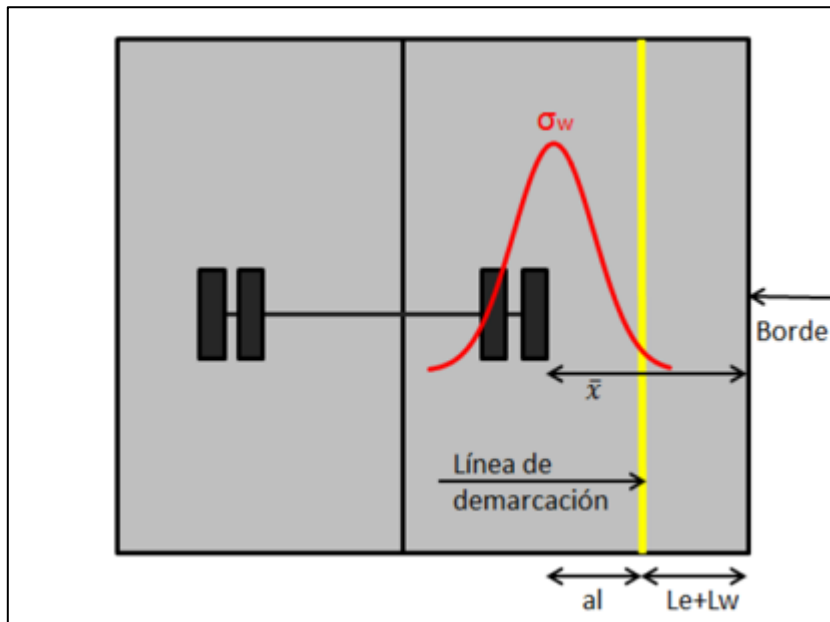


Figura 29.- Distribución Lateral del tráfico para un pavimento con sobreancho.

Los valores por defecto de la distancia entre el borde, la línea de demarcación y la rueda externa del vehículo se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19.- Valores por defecto de las distancias entre el borde, la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos.

Tipo de Borde	Distancia entre el borde y la línea de demarcación	Distancia entre la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos	Distancia entre el borde y la rueda externa de demarcación
Borde Libre, Berma de Hormigón, Berma granular/asfáltica	150 mm	450 mm	600 mm
Solera de Borde	150 mm	550 mm	700 mm
Losa con Sobreancho	300 mm	450 mm	750 mm

Los valores por defecto de la desviación estándar se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 20.- Desviación Estándar según tipo de Borde

Tipo de Borde	Desviación Estándar por defecto de distancia lateral de tráfico
Borde Libre, Berma de Hormigón, Berma granular/asfáltica	250 mm
Solera de Borde	200 mm
Losa con Sobreancho	250 mm

4.3.3 Propiedades del Hormigón

Resistencia del Hormigón

La resistencia del hormigón se mide por lo general a partir del ensayo de flexotracción (LNV 83), sin embargo, este método permite obtener la resistencia a la flexotracción por medio de la resistencia de probetas cúbicas o cilíndricas utilizando factores de correlación. Se deberá especificar la resistencia característica e incorporar el efecto de la dispersión de resistencias normales en la fabricación del hormigón.

Confiabilidad de la Mezcla de Hormigón

Nivel de confianza de la mezcla de hormigón. Generalmente se utiliza un 80%.

Desviación Estándar de Diseño del Hormigón

Desviación que tiene el proceso de fabricación del hormigón. Se recomienda 0,4 Mpa.

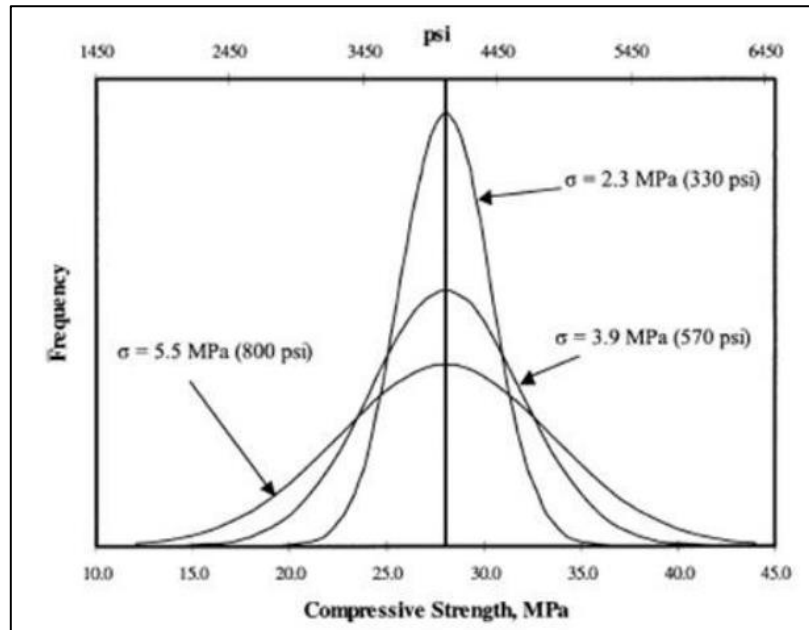


Figura 30.- Efecto de la desviación estándar durante la producción de hormigón.

Aumento de Resistencia 28-90 Días

Corresponde al incremento porcentual en la resistencia a la flexotracción que ocurre desde el día 28 al día 90 en las losas de hormigón. El valor de este depende de cada mezcla, pero se recomienda utilizar por defecto un valor de 1.1 (10%).

Módulo de Elasticidad del Hormigón

El módulo de elasticidad del hormigón utilizado se puede obtener ya sea a través de ensayo de laboratorio o por medio de correlaciones con la resistencia a compresión. En caso de no tener certeza de este valor, se recomienda utilizar la siguiente formula que correlaciona resistencia a la compresión con módulo de elasticidad.

$$E_c = 57600 \sqrt{f'_c}$$

Dónde:

E_c : Módulo de elasticidad [Psi].

$\sqrt{f'_c}$: Resistencia a la Compresión Cilíndrica [Psi].

Resistencia Residual de Hormigón con fibra

El método permite el diseño de pavimento de hormigón con fibra estructural con lo cual es posible obtener pavimentos de menor espesor o de mayor duración. Además, la fibra reduce el deterioro del pavimento una vez producida la grieta, aumenta la transferencia de carga en las juntas y elimina la necesidad de confinamiento lateral.

Considerando que la incorporación de fibra en pavimentos de hormigón es una tecnología relativamente reciente, se recomienda diseñar los pavimentos de hormigón con fibra considerando un 20% de resistencia residual como valor conservador, es decir si por ejemplo se considera una resistencia de diseño de 5.0 (Mpa) se utiliza como valor mínimo una resistencia residual de 1.0 (Mpa).

Peso Específico del Hormigón

Es el peso de la mezcla de hormigón por unidad de volumen. Se recomienda un valor de 2400 Kg/m³.

Módulo de Poisson

Es la razón entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial, causada por una carga en el sentido axial. Su valor por defecto es de 0.15 y varía entre 0.1 y 0.25.

Coeficiente de expansión Térmica

El coeficiente de expansión térmica es una medida de la expansión o contracción de un material al ser sometido a cambios de temperatura. Se determina el valor por ensayo de laboratorio.

Retracción del Hormigón a 365 Días

La retracción del hormigón es un parámetro de gran importancia que afecta la transferencia de carga que habrá entre dos juntas. Como se ve en la imagen, esta retracción va aumentando a medida que el hormigón se va endureciendo, hasta un punto es irreversible ya que no disminuye si se sigue saturando la mezcla. Por defecto la retracción a 365 días se determina aumentando en un 30% este valor final. Se utiliza por defecto 0.0007 (700 $\mu\epsilon$).

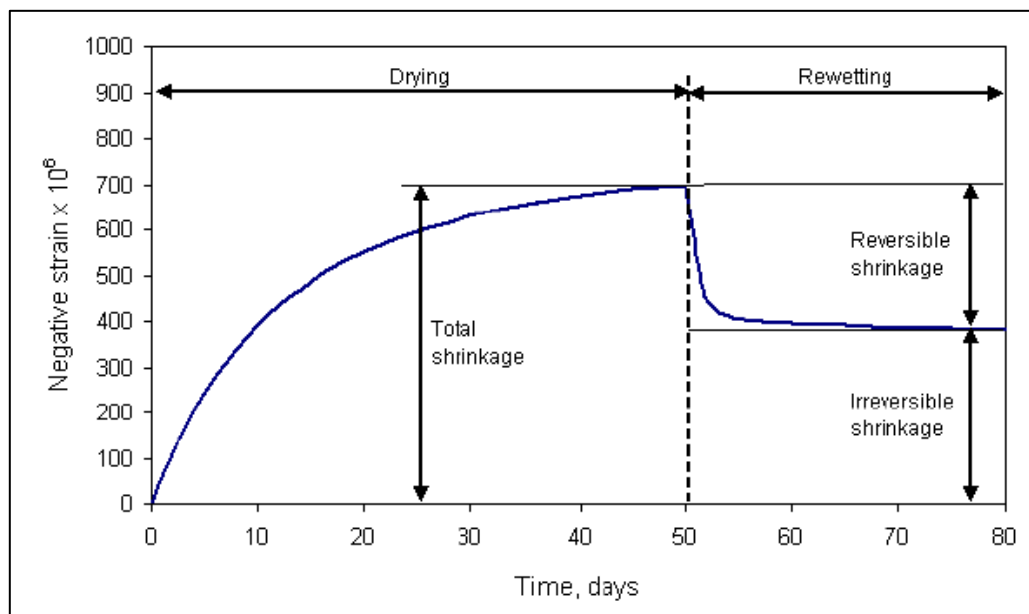


Figura 31.- Retracción típica del hormigón en el tiempo.

Contenido de Aire

Porcentaje de aire contenido en la mezcla de hormigón.

Relación Agua/cemento

Cantidad de agua utilizada por unidad de cemento en la mezcla de hormigón.

4.3.4 Suelo

Numero de Capas

Sin considerar la subrasante como capa, se debe ingresar el número de tipos de suelo, hasta un máximo de seis.

Módulo Resiliente de la Capa

A cada capa se le ingresa el módulo resiliente. Para la subrasante, se debe ingresar el módulo durante el invierno y el programa calcula el valor de verano.

Módulo de Poisson

El módulo de poisson de cada capa, debe ser ingresado. El programa trae incorporado una tabla, con el valor recomendado según el tipo de suelo.

Espesor de la Capa

De acuerdo con el diseño propuesto, se ingresar cada espesor por capa definida.

Resistencia a la erosión

La resistencia a la erosión que tenga la capa que soporta el pavimento, tiene un impacto significativo en la aparición de deterioros en el pavimento, especialmente con el escalonamiento. La resistencia a la erosión se subclasifica en cinco niveles.

- Nivel 1: Materiales extremadamente resistentes a la erosión.
- Nivel 2: Materiales muy resistentes a la erosión.
- Nivel 3: Materiales resistentes a la erosión.
- Nivel 4: Materiales poco resistentes a la erosión.

→ Nivel 5: Materiales muy erosionables

Coeficiente de Fricción Pavimento – Base

Coeficiente de Fricción presente entre la losa de hormigón y la capa soportante, lo que afecta la transferencia de carga del pavimento. Para el caso de suelos granulares, se recomienda usar 0,65 mientras para una base tratada con cemento 0,8.

4.3.5 Clima

El clima se ingresa a través de bases de datos de las diferentes localidades del país las cuáles entregan ciertas distribuciones de diferenciales de temperatura entre la parte inferior y superior de la losa. El programa software incorpora 12 climas. En caso de que ningún clima sea aplicable a la zona en que se construirá el pavimento y no se tenga información, se deberán utilizar los 4 climas genéricos:

- Húmedo – Heladizo.
- Húmedo – No Heladizo.
- Seco – Heladizo.
- Seco – No Heladizo.

Gradiente de Construcción

El gradiente de construcción es una estimación del alabeo inicial que se produce en la losa debido a retracciones deferenciales entre la parte superior y la parte inferior de esta. Este gradiente se expresa como el gradiente térmico que existiría para tener la losa plana. El valor depende gran parte de la época del año cuando se construye, y del clima de la zona. Debido a que no existe mucha información con respecto a este valor, se recomienda utilizar los siguientes valores según la zona en que se construirá el pavimento [Covarrubias y Binder, 2009].

- Zonas Húmedas sin viento -5 [°C].
- Zonas Húmedas con viento y zonas secas sin viento -10 [°C].

- Zonas Secas con viento y Altura -15 [°C].
- Condiciones extremas de evaporación de agua -20 [°C].

Temperatura Media de Invierno

Corresponde a la temperatura media del aire de los 6 meses de menor temperatura del año.

Temperatura Media de Verano

Corresponde a la temperatura media del aire de los 6 meses de mayor temperatura del año.

Temperatura Fraguado de Hormigón

Es la temperatura máxima de construcción del hormigón durante el fraguado durante las primeras 24 horas.

Número de Días al año con Precipitaciones

Número de días en un año promedio, en que se registran precipitaciones.

Índice de Congelamiento de la Base

Porcentaje del tiempo en el año que la base se encuentra a una temperatura inferior a 0°C.

5. ANALISIS DE LOS HORMIGONES MEDIANTE SOFTWARE

En este capítulo se realizan diseños de pavimentos de hormigón con y sin fibra mediante el software Optipave 2, basado en ecuaciones de daño por fatiga empírico-mecanicistas, en donde se resumirán los parámetros de ingresos propiamente tal y a modo comparativo se presentaran los resultados de diseños realizados con el software de la Guía empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos con sus respectivos parámetros de ingreso (Anexo E), con el fin de analizar el desempeño de los hormigones caracterizados.

5.1 PARAMETROS DE INGRESO DEL SOFTWARE

5.1.1 Parámetros de Diseño

Se resumen los parámetros de ingreso en la siguiente tabla, de acuerdo con los inputs que solicita el programa, con el objetivo de proponer diseños que en la actualidad representen estos tipos de soluciones de pavimentos de hormigón, para ello se escogerán las características en mayor medida a diseños ejecutados con anterioridad y en conjunto con lo que indica la normativa actual.

Tabla 21: Parámetros de Diseño

Vida de Diseño	20	años
Largo de Losa	1,75	m
Espesor de Losa	230	mm
IRI Inicial	1,6	m/Km
IRI Final	2,8	m/Km
Porcentaje de Losas Agrietadas	10	Kg/m ³
Escalonamiento Promedio	5	mm
Confiabilidad	85	%

5.1.2 Parámetros de Tráfico

Se resumen los parámetros de ingreso en la siguiente tabla, de acuerdo con los inputs que solicita el programa, con el objetivo de proponer diseños que en la actualidad representen estos tipos de soluciones de pavimentos de hormigón, para ello se escogerán las características en mayor medida a diseños ejecutados con anterioridad y en conjunto con lo que indica la normativa actual.

Tabla 22: Parámetros de Tráfico

Tasa de Crecimiento Anual de Tráfico	20	años
Clasificación del Tipo de Tráfico	FHWA TTC 8	-
Distancia de la Huella a Línea de Demarcación	450	mm
Desv. Estándar de la Distribución Lateral del Trafico	250	mm
TMDA Inicial (Ambos Sentidos)	3118	-
Porcentaje de Tráfico en Dirección de Diseño	50	%
Porcentaje de Tráfico en Pista de Diseño	90	%

5.1.3 Parámetros del Hormigón

Se resumen los parámetros de ingreso en la siguiente tabla, de acuerdo con los inputs que solicita el programa, con el objetivo de proponer diseños que en la actualidad representen estos tipos de soluciones de pavimentos de hormigón, para ello se escogerán las características en mayor medida a diseños ejecutados con anterioridad y en conjunto con lo que indica la normativa actual.

Tabla 23: Parámetros de hormigón

Edad de Ensayo	28	días
Confiabilidad Diseño de Hormigón	80	%
Desv. Estándar de la Diseño de Hormigón	3,3	MPa
Aumento de Resistencia 28 a 90 Días	1,1	-
Modulo de Elasticidad del Hormigón	29000	MPa
Peso Específico del Hormigón	2400	Kg/m³
Módulo de Poisson	0,15	-
Retraccion del Hormigón a los 365 Días	700	microstrain
Contenido de Aire	0,15	%
Resistencia Residual (Solo con fibras)	0.2*MOR	MPa

Para las corridas del software se utilizan los parámetros de hormigón de la tabla anterior, en donde se incorporan para cada uno de los diseños a realizar los valores que se presentan a continuación en la Tabla 24, constituyendo los valores de la resistencia mecánica representada por la resistencia a la flexotracción, ya que es lo que la normativa actual exige, y el coeficiente de expansión térmica; adicionalmente se adjuntan los valores de A/C y los valores de resistencia residual, si corresponde, asumiendo un valor conservador del 20% de la resistencia mecánica, de acuerdo a lo recomendado en la actualidad, como el programa de la GEMDP no tiene un parámetro de entrada para la incorporación de las fibras, el efecto se incorporara en la ecuación de fatiga de la misma forma que lo considera el software optipave, considerando un factor de 1,2 de acuerdo a lo descrito en la sección 4.2.1.

Tabla 24: Parámetros variables del hormigón

ID Mezcla	FLEXOTRACCIÓN (Mpa)	CET (10 ⁶ /°C)	RELACION A/C	RESISTENCIA RESIDUAL (Mpa)
M1	5,1	8,77	0,49	-
M2	4,5	8,25	0,49	0,90
M3	4,9	8,26	0,44	-
M4	5	8,93	0,44	1,00
M5	5,2	8,95	0,44	1,04
M6	5,3	9,19	0,40	-
M7	5,1	8,96	0,40	1,02

5.1.4 Parámetros del Suelo

Se resumen los parámetros de ingreso en la siguiente tabla, de acuerdo con los inputs que solicita el programa, con el objetivo de proponer diseños que en la actualidad representen estos tipos de soluciones de pavimentos de hormigón, para ello se escogerán las características en mayor medida a diseños ejecutados con anterioridad y en conjunto con lo que indica la normativa actual.

Tabla 25: Parámetros del suelo

N° de Capas	1	-
Modulo Resiliente de la Base	300	MPa
Modulo Resiliente de la Subrasante	80	MPa
Resistencia a la erosión de la Base	3	mm
Coefficiente de Friccion Pavimento-Base	0.65	-
Material Fino Bajo la Malla N° 200	8	%

5.1.5 Parámetros del Clima

Se resumen los parámetros de ingreso en la siguiente tabla, de acuerdo con los inputs que solicita el programa con el objetivo de proponer diseños que en la actualidad representen estos tipos de soluciones de pavimentos de hormigón, para ello se escogerán las características en mayor medida a diseños ejecutados con anterioridad y en conjunto con lo que indica la normativa actual.

Tabla 26: Parámetros del Clima

País	Chile	-
Zona	Valparaiso	-
Gradiente Equivalente de Construcción	-5,6	°C
Temperatura Media de Invierno	11,88	°C
Temperatura Media de Verano	19,88	°C
Temperatura de Fraguado del Hormigón	45	°C
Número de Días al Año con Precipitaciones	32,5	días
Índice de Congelamiento de la Base	0	1/°C

5.2 RESULTADOS DE LOS DISEÑOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los diseños realizados a través del programa Optipave 2 y el software de la Guía empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos utilizando coeficientes de calibración de los modelos de deterioro de la GEMDP calibrada para Chile [Delgadillo et al., 2014], adicionalmente se incluyen los resultados de diseños realizados con el programa Optipave con los factores de calibración del software de la GEMPD calibrada para Chile, (ANEXO E), de acuerdo con los datos bases descritos anteriormente y con las propiedades del hormigón medidas en laboratorio.

5.2.1 Predicciones de Agrietamiento Transversal

A partir de la figura 32 hasta la figura 38 se presentan gráficamente los porcentajes de losas agrietadas obtenidos en cada software al final del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros de hormigón, parámetros de suelo y parámetros de clima, con los cuales se ingresan los valores de módulo de ruptura y coeficiente de expansión térmica medidas en laboratorio para cada hormigón caracterizado.

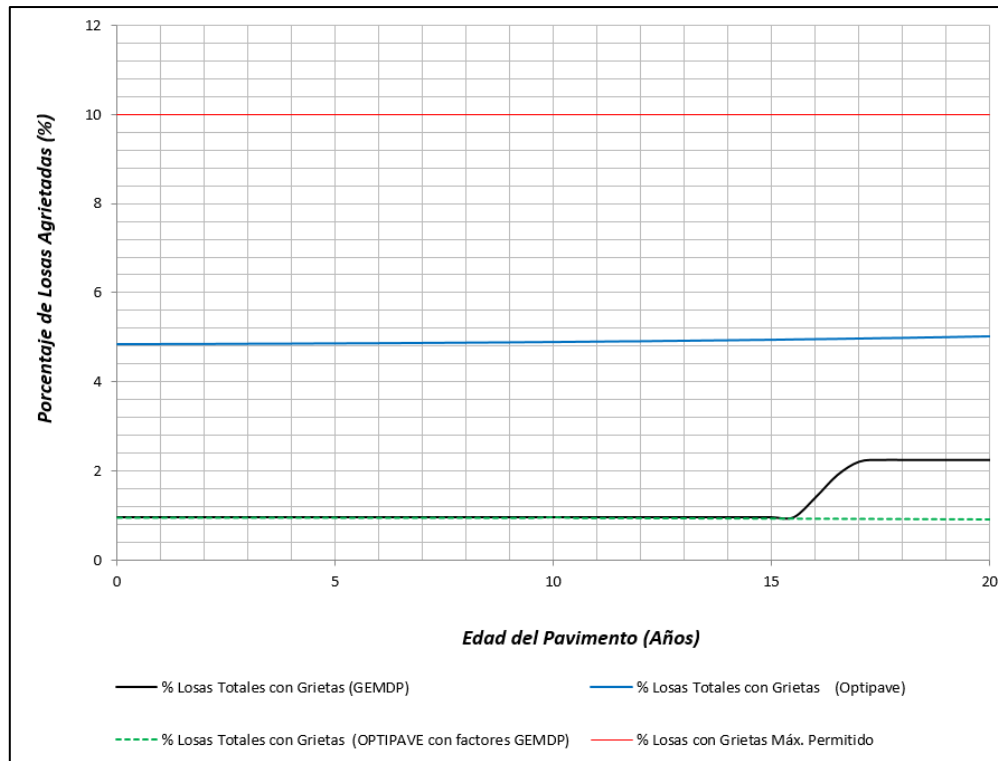


Figura 32: Predicción de Agrietamiento M1

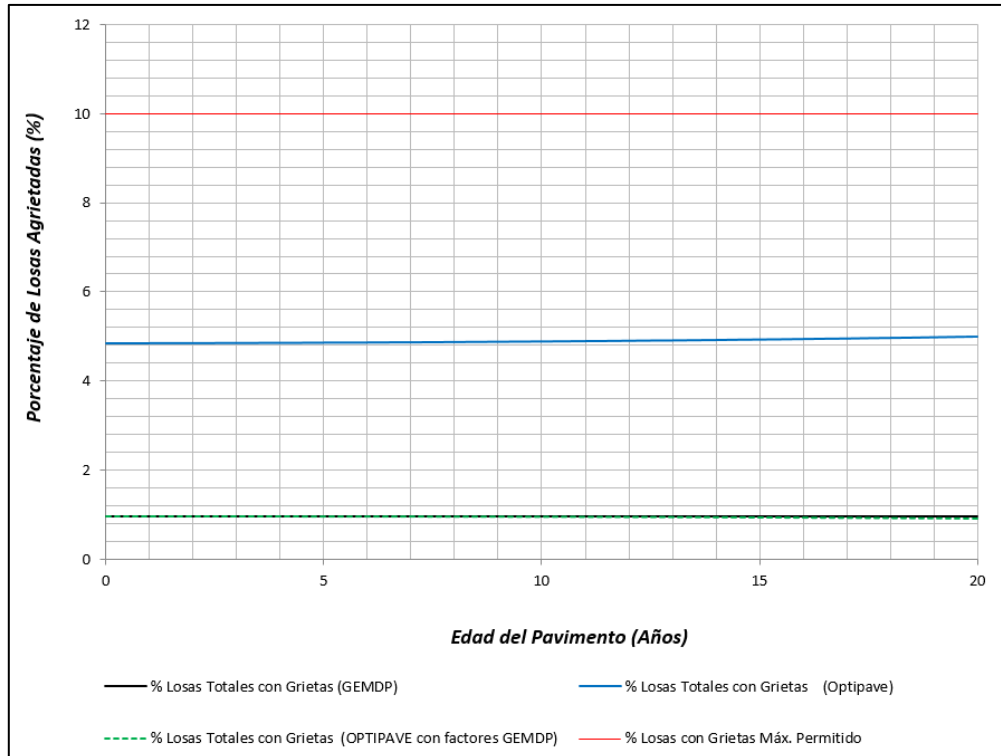


Figura 33: Predicción de Agrietamiento M2

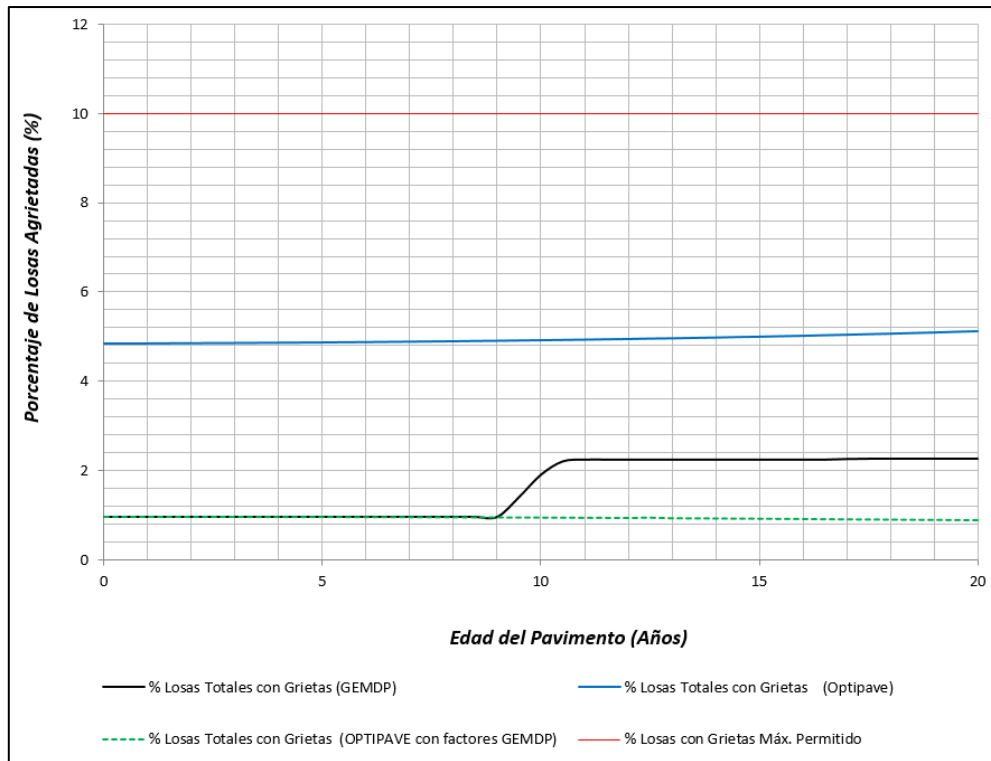


Figura 34: Predicción de Agrietamiento M3

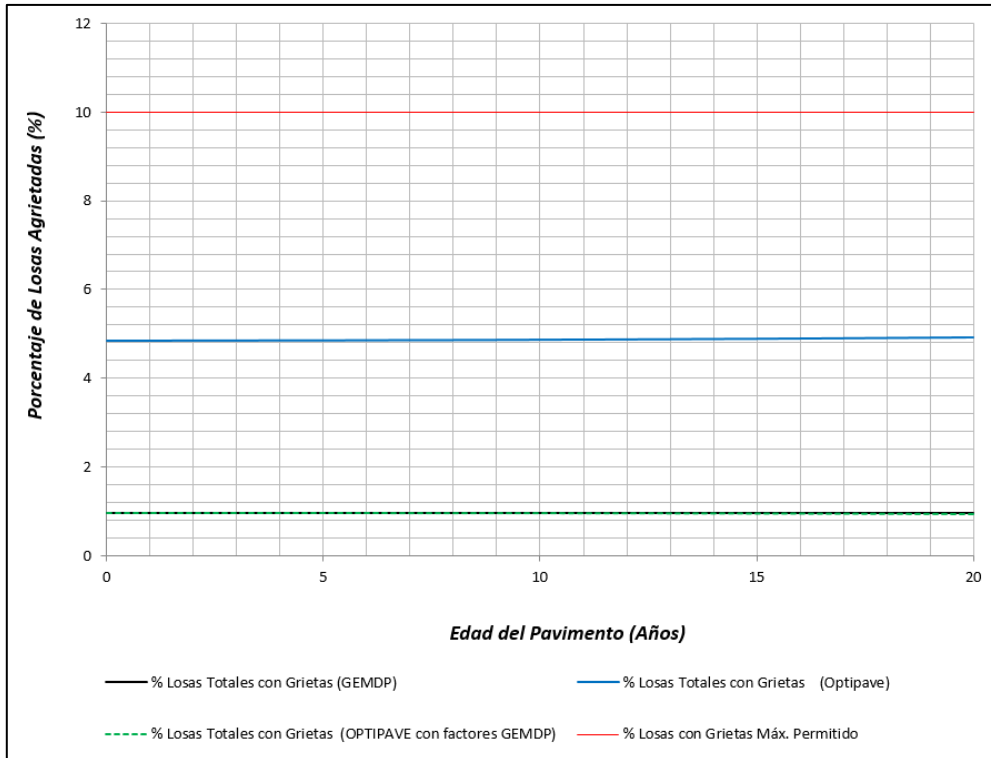


Figura 35: Predicción de Agrietamiento M4

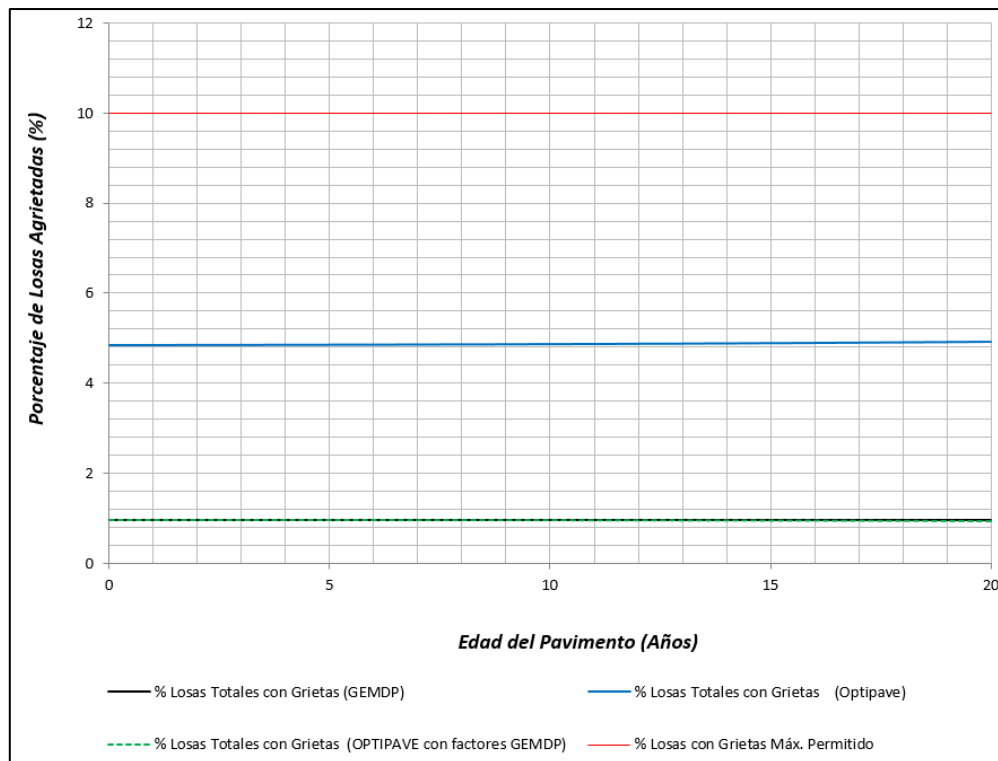


Figura 36: Predicción de Agrietamiento M5

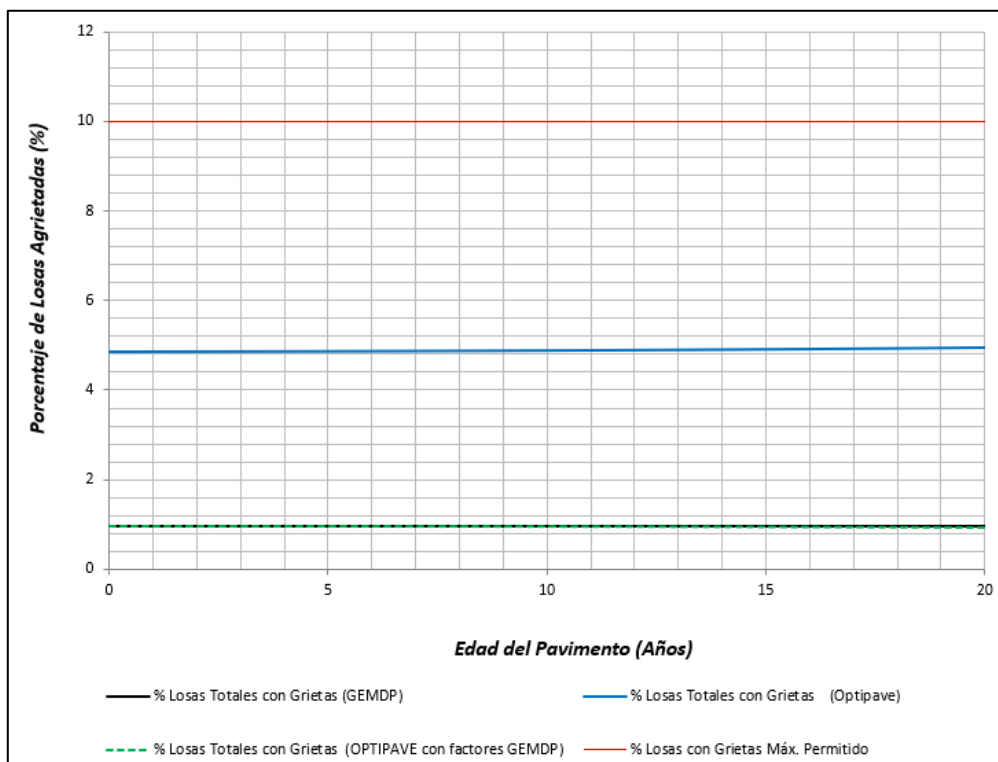


Figura 37: Predicción de Agrietamiento M6

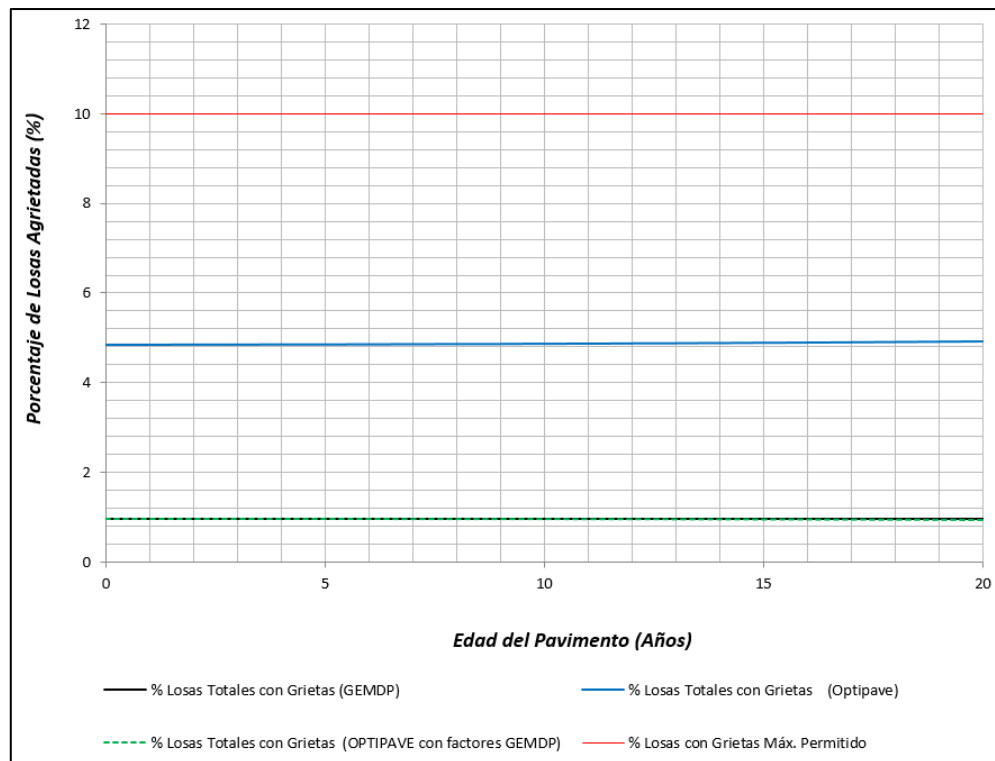


Figura 38: Predicción de Agrietamiento M7

Desde la figura 32 hasta la 33 se muestran los porcentajes de losas agrietadas en cada software de las muestras M1 hasta la M2 correspondiente a mezclas con 320 [kg/m³] de cemento, obtenidos a lo largo del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros, parámetros de suelo, y parámetros de clima, en donde se ingresaron los valores de flexocompresión y CET utilizados obtenidos en laboratorio para dicha mezcla.

Desde la figura 34 hasta la 36 se muestran los porcentajes de losas agrietadas en cada software de las muestras M3 hasta la M5 correspondiente a mezclas con 360 [kg/m³] de cemento, obtenidos a lo largo del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros, parámetros de suelo, y parámetros de clima, en donde se ingresaron los valores de flexocompresión y CET utilizados obtenidos en laboratorio para dicha mezcla.

Desde la figura 37 hasta la 38 se muestran los porcentajes de losas agrietadas en cada software de las muestras M6 hasta la M7 correspondiente a mezclas con 400 [kg/m³] de cemento, obtenidos a lo largo del periodo de diseño para cada conjunto de

parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros, parámetros de suelo, y parámetros de clima, en donde se ingresaron los valores de flexocompresión y CET utilizados obtenidos en laboratorio para dicha mezcla.

Para todos los diseños realizados tanto con el software Optipave como con el de la GEMDP los pavimentos diseñados con fibra, acumulan menor daño a lo largo de la vida útil, también se muestra una diferencia de losas agrietadas entre hormigones diseñados sin fibra en función de la resistencia obtenida en el laboratorio ya que la mezcla con mayor porcentaje de losas agrietadas corresponde a la mezcla que resulto con un valor menor a la flexotracción y coeficiente de expansión térmica de las 3, de igual manera la que menor daño acumulado de las 3, fue la mezcla con mayor resistencia a la flexotracción y coeficiente de expansión térmica, esta diferencia entre los porcentajes de losas agrietadas da cuenta la influencia en la resistencia característica a la flexotracción en la predicción del agrietamiento, en donde la variación del coeficiente de expansión no refleja una influencia en la acumulación de daño a lo largo de la vida útil.

5.2.2 Predicciones Escalonamiento

A partir de la figura 39 hasta la figura 45 se presentan gráficamente los valores acumulados de escalonamiento obtenidos en cada software al final del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros de hormigón, parámetros de suelo y parámetros de clima, con los cuales se ingresan los valores de módulo de ruptura y coeficiente de expansión térmica medidas en laboratorio para cada hormigón caracterizado.

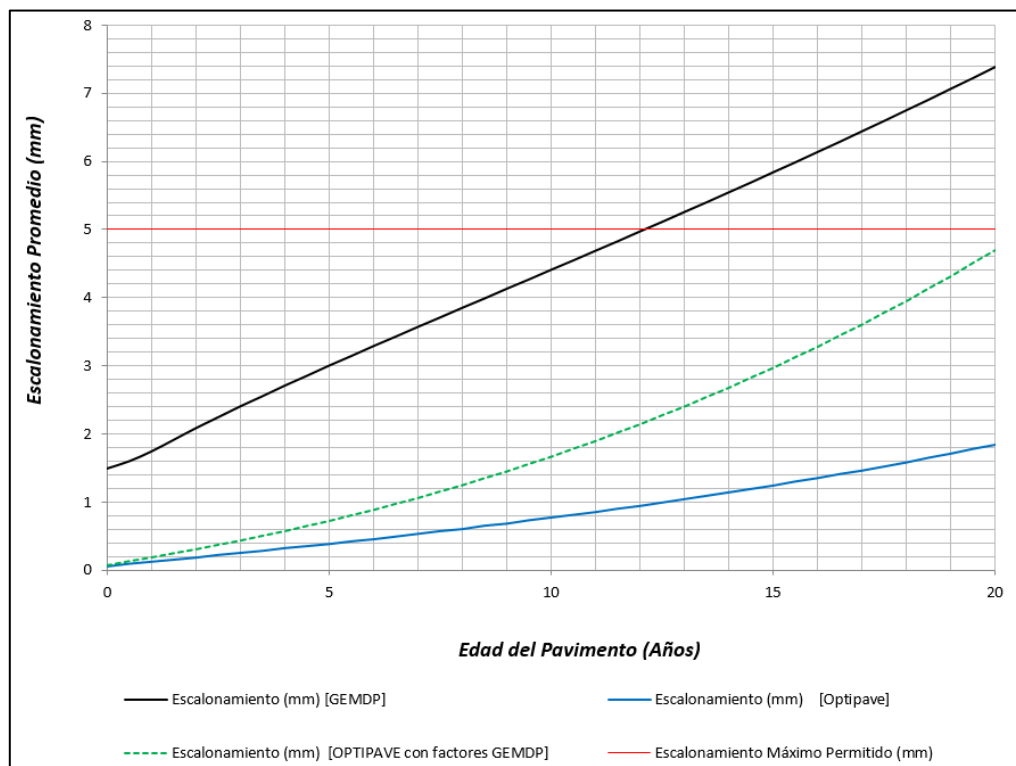


Figura 39: Predicción de Escalonamiento M1

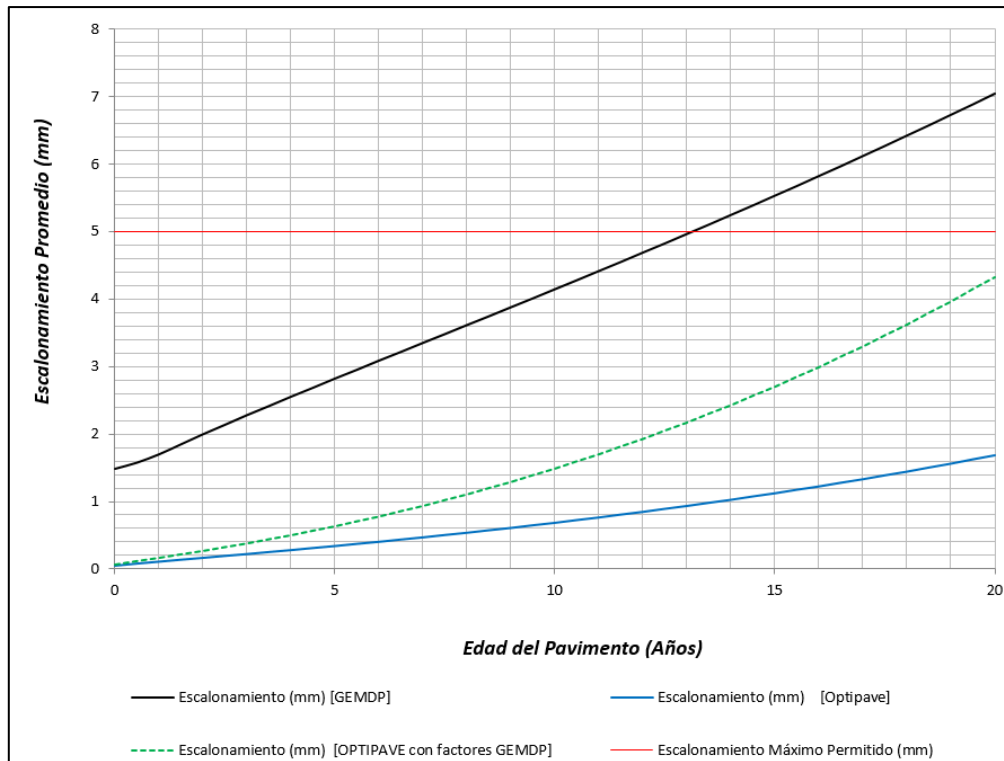


Figura 40: Predicción de Escalonamiento M2

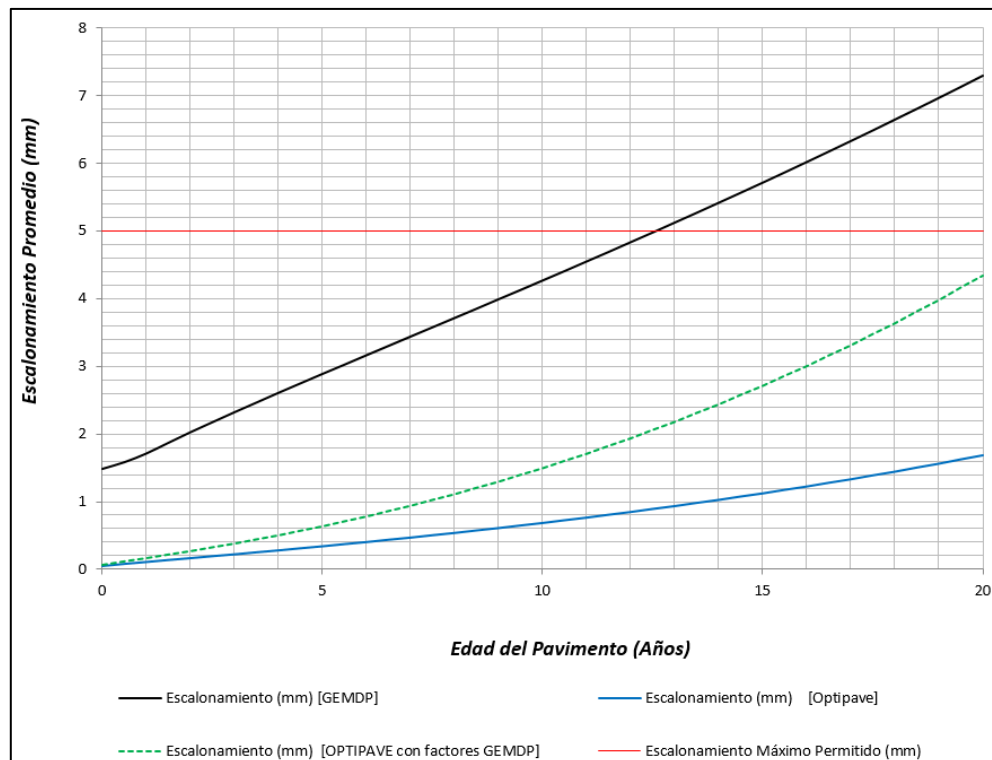


Figura 41: Predicción de Escalonamiento M3

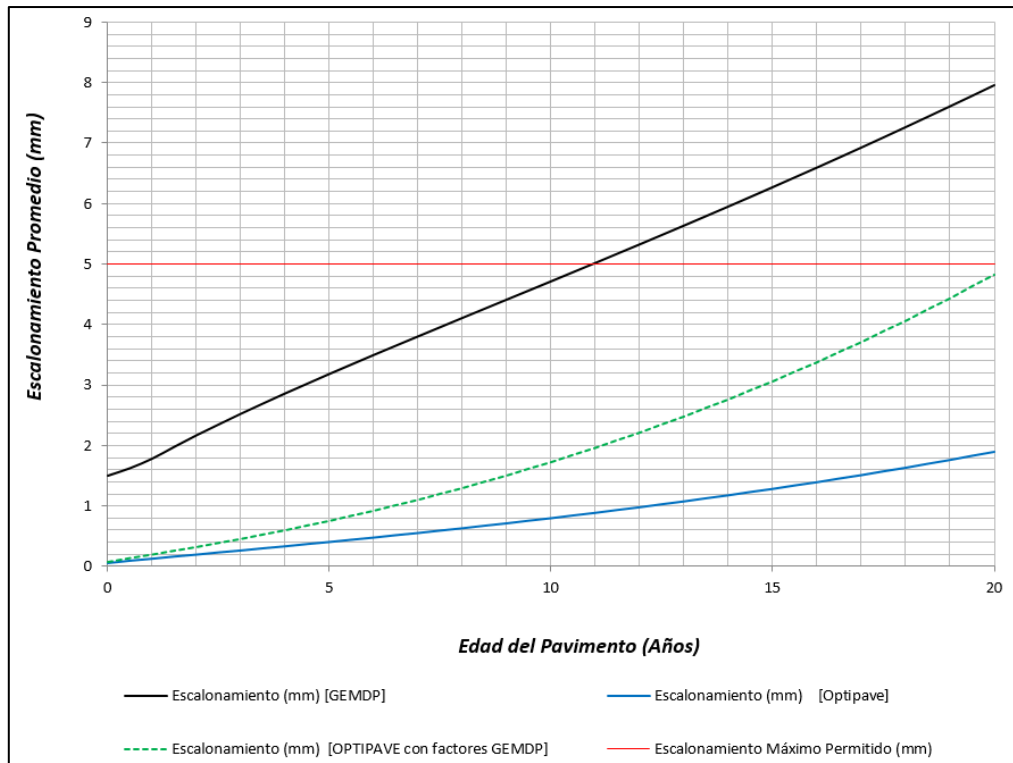


Figura 42: Predicción de Escalonamiento M4

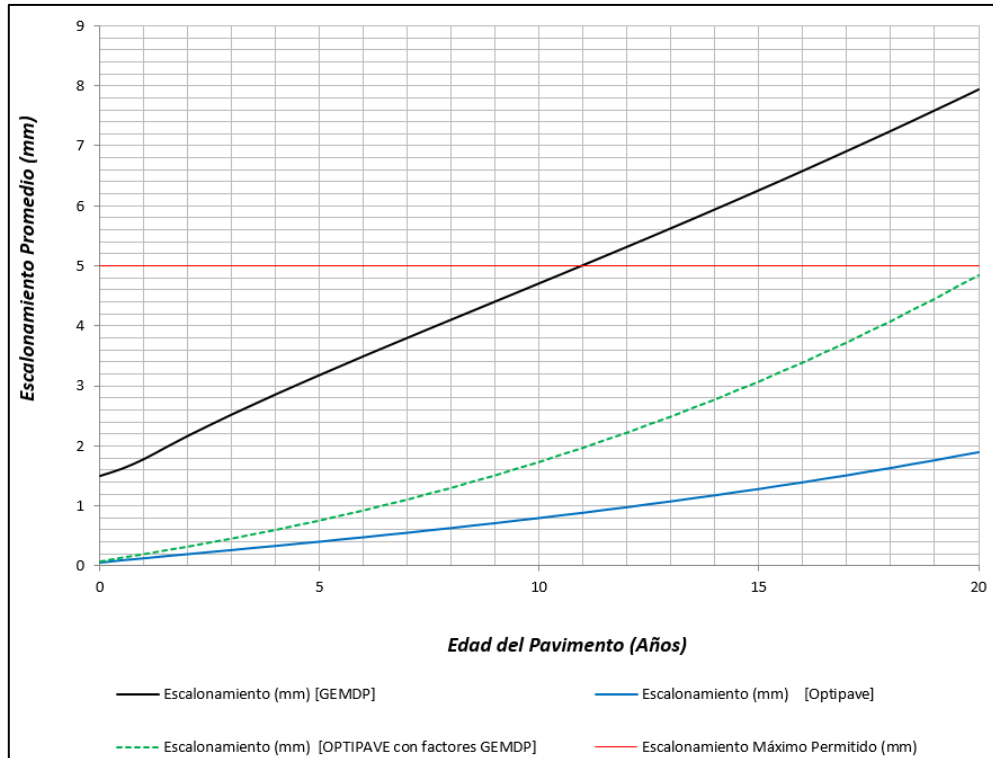


Figura 43: Predicción de Escalonamiento M5

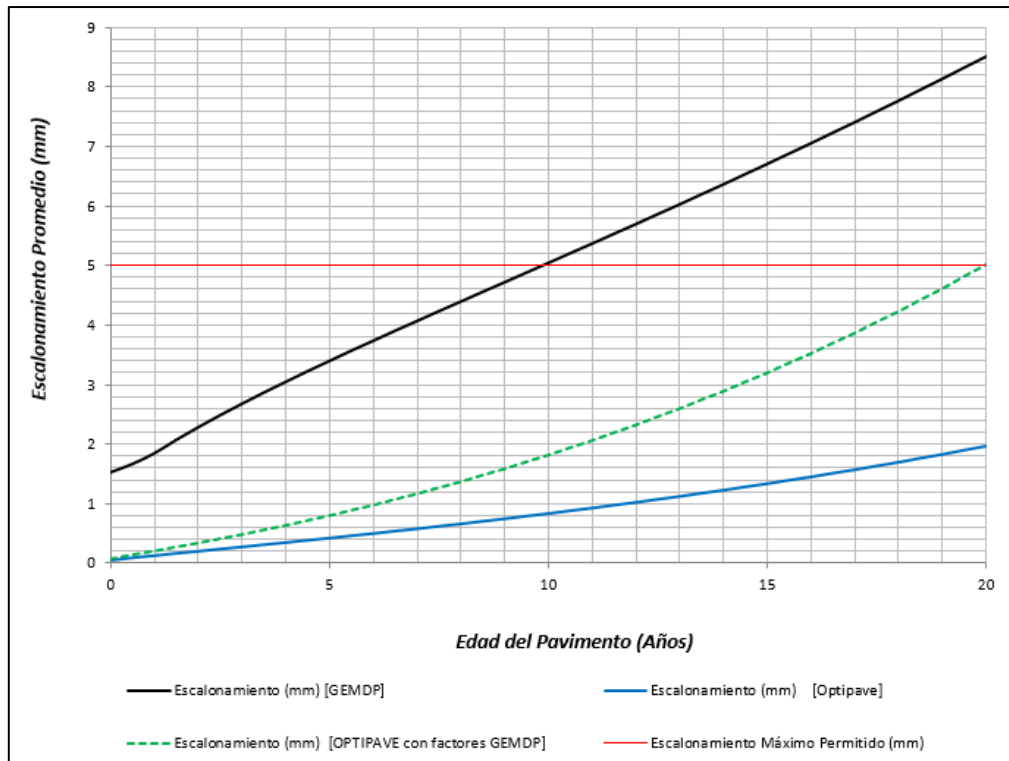


Figura 44: Predicción de Escalonamiento M6

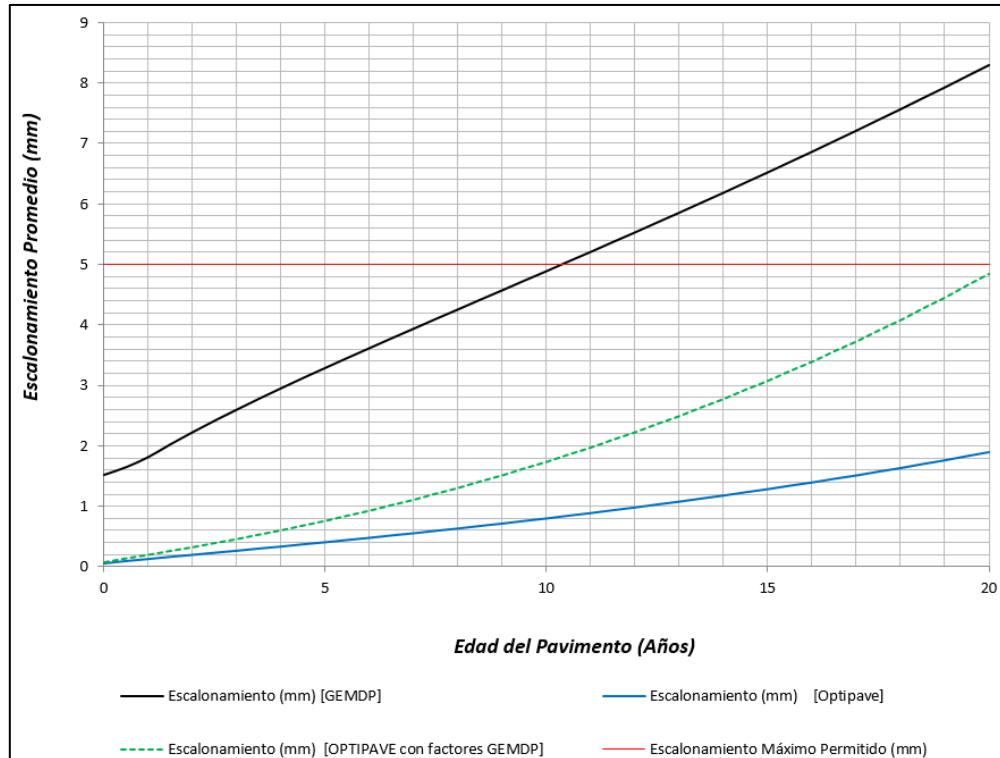


Figura 45: Predicción de Escalonamiento M7

Desde la figura 39 hasta la 40 se muestran los valores acumulados de escalonamiento obtenidos en cada software de las muestras M1 hasta la M2 correspondiente a mezclas con 320 [kg/m³] de cemento, obtenidos a lo largo del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros, parámetros de suelo, y parámetros de clima, en donde se ingresaron los valores de flexocompresión y CET utilizados obtenidos en laboratorio para dicha mezcla.

Desde la figura 41 hasta la 43 se muestran los valores acumulados de escalonamiento obtenidos en cada software de las muestras M3 hasta la M5 correspondiente a mezclas con 360 [kg/m³] de cemento, obtenidos a lo largo del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros, parámetros de suelo, y parámetros de clima, en donde se ingresaron los valores de flexocompresión y CET utilizados obtenidos en laboratorio para dicha mezcla.

Desde la figura 44 hasta la 45 se muestran los valores acumulados de escalonamiento obtenidos en cada software de las muestras M6 hasta la M7 correspondiente a mezclas con 400 [kg/m³] de cemento, obtenidos a lo largo del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros, parámetros de suelo, y parámetros de clima, en donde se ingresaron los valores de flexocompresión y CET utilizados obtenidos en laboratorio para dicha mezcla.

Tanto para los diseños realizados con el software Optipave como en los diseños realizados con el software de la GEMDP, se acumula menor escalonamiento en función de un menor valor de la resistencia a la flexotracción y del coeficiente de expansión térmica, a diferencia de la predicción de agrietamiento en el caso de los pavimentos diseñados con ambos softwares, la incorporación de fibra no refleja mejoras en el desempeño del pavimento para la predicción del escalonamiento, puede observarse que la predicción de la mezcla M4 la cual incorpora fibra se tiene un valor en la predicción de escalonamiento mayor que la mezcla M3, por otro lado ocurre lo contrario para la mezcla M7 a la que también se le incorporan fibras con respecto a la mezcla M6.

5.2.3 Predicciones del IRI

A partir de la figura 46 hasta la figura 52 se presentan las predicciones del IRI obtenidas en cada software al final del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros de hormigón, parámetros de suelo y parámetros de clima, con los cuales se ingresan los valores de módulo de ruptura y coeficiente de expansión térmica medidas en laboratorio para cada hormigón caracterizado.

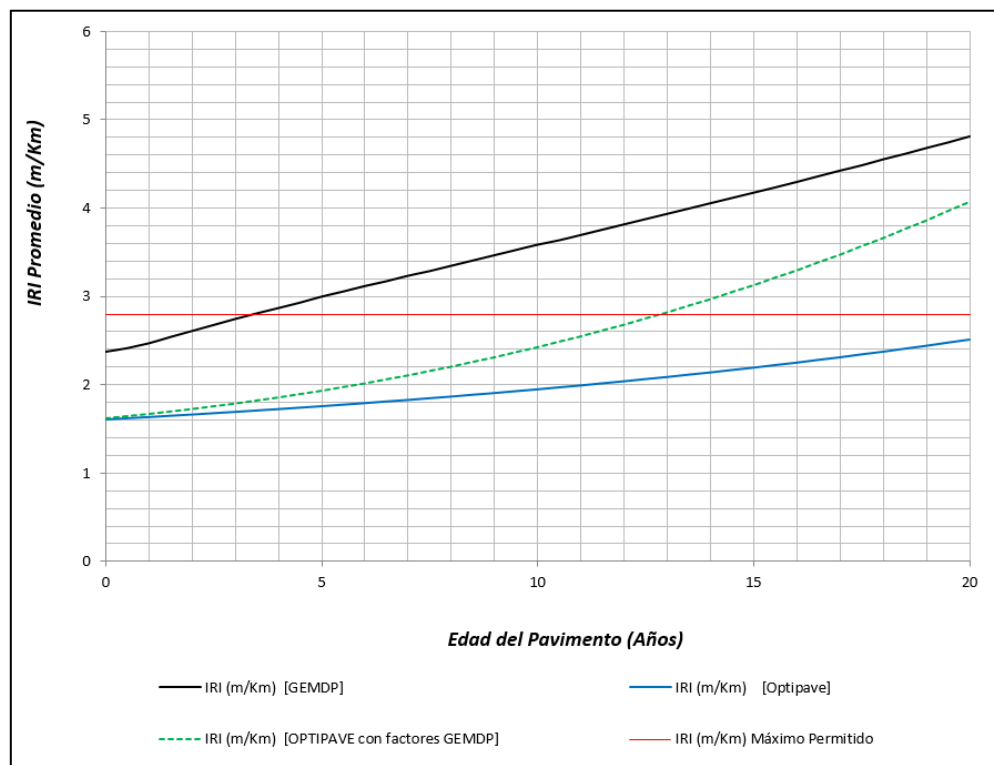


Figura 46: Predicción IRI Promedio M1

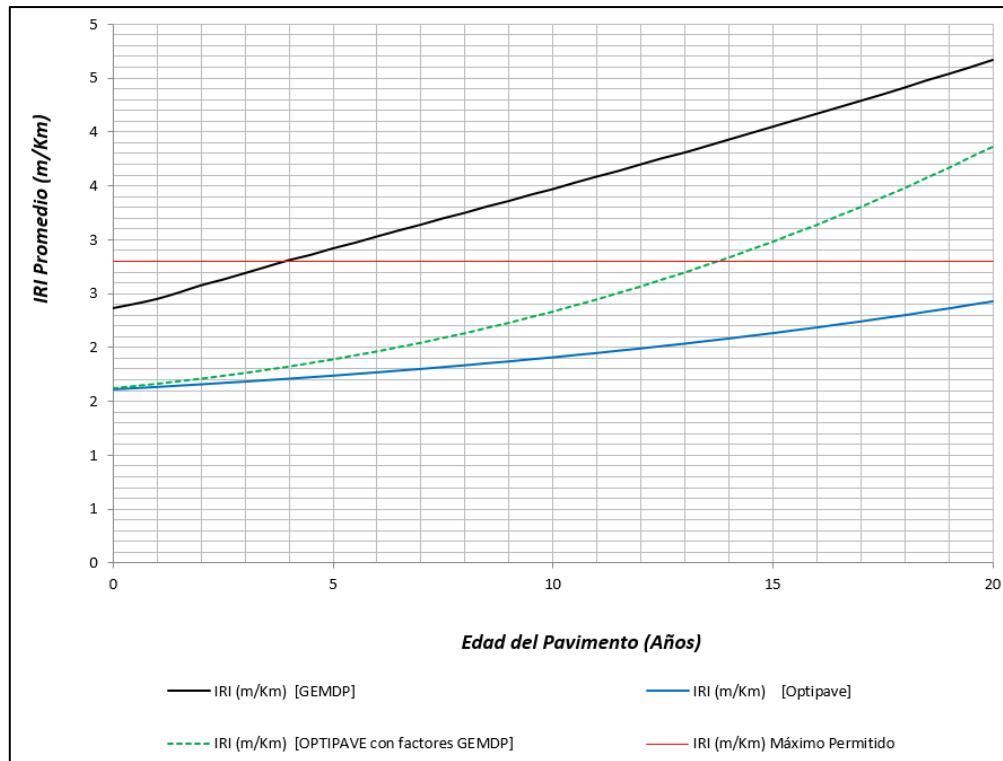


Figura 47: Predicción IRI Promedio M2

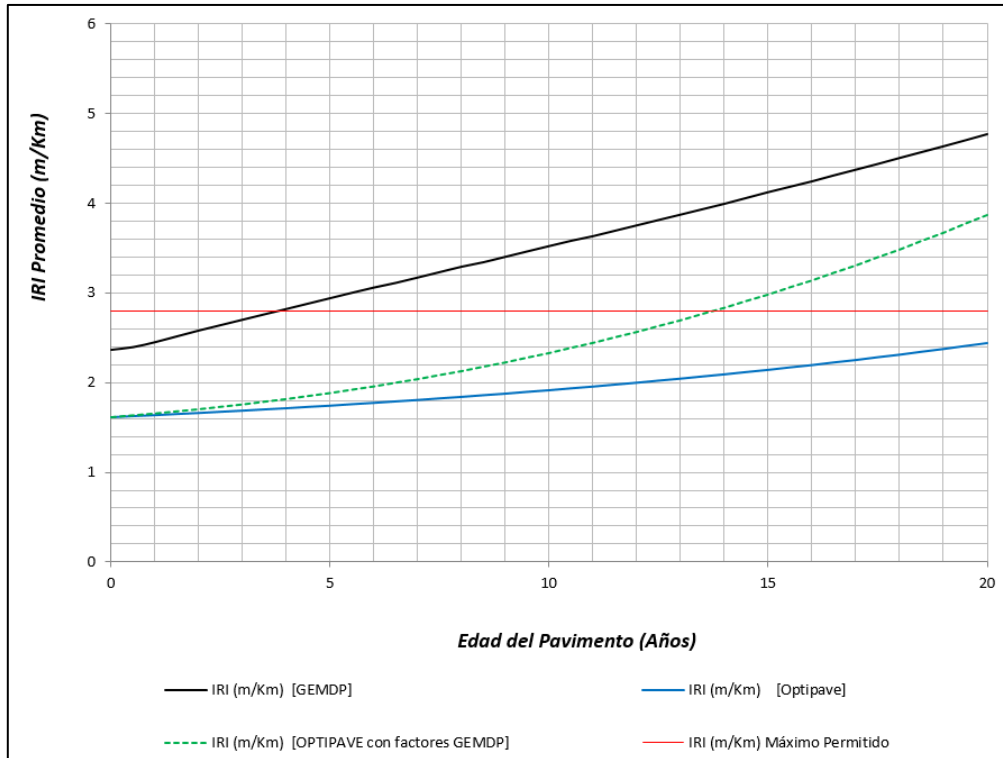


Figura 48: Predicción IRI Promedio M3

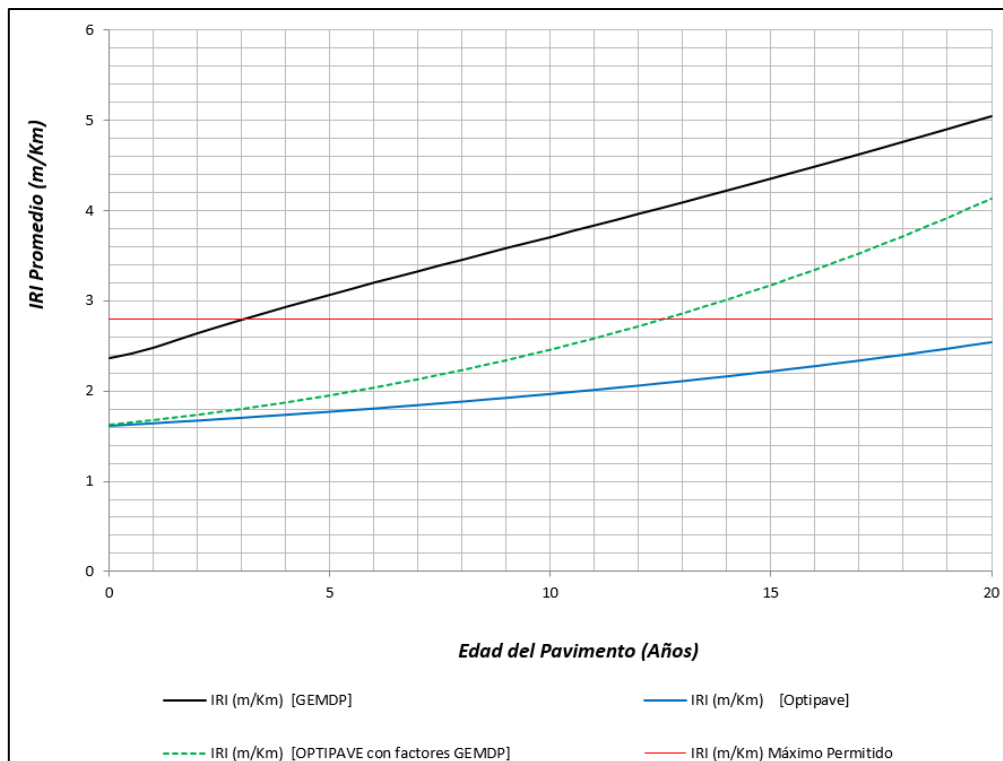


Figura 49: Predicción IRI Promedio M4

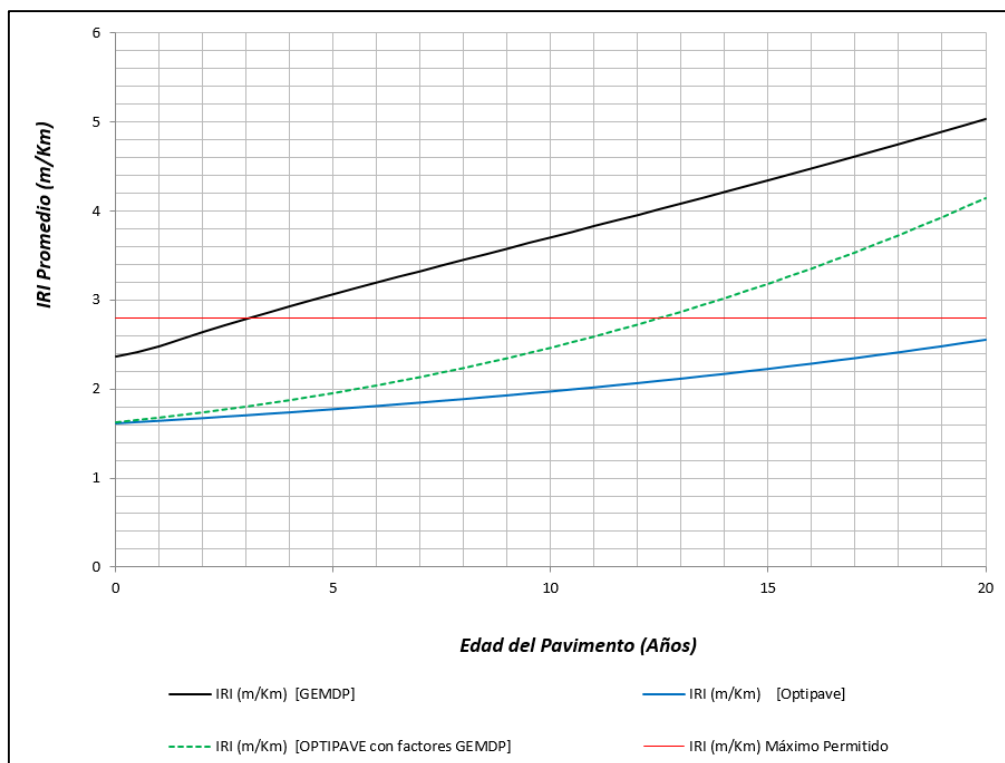


Figura 50: Predicción IRI Promedio M5

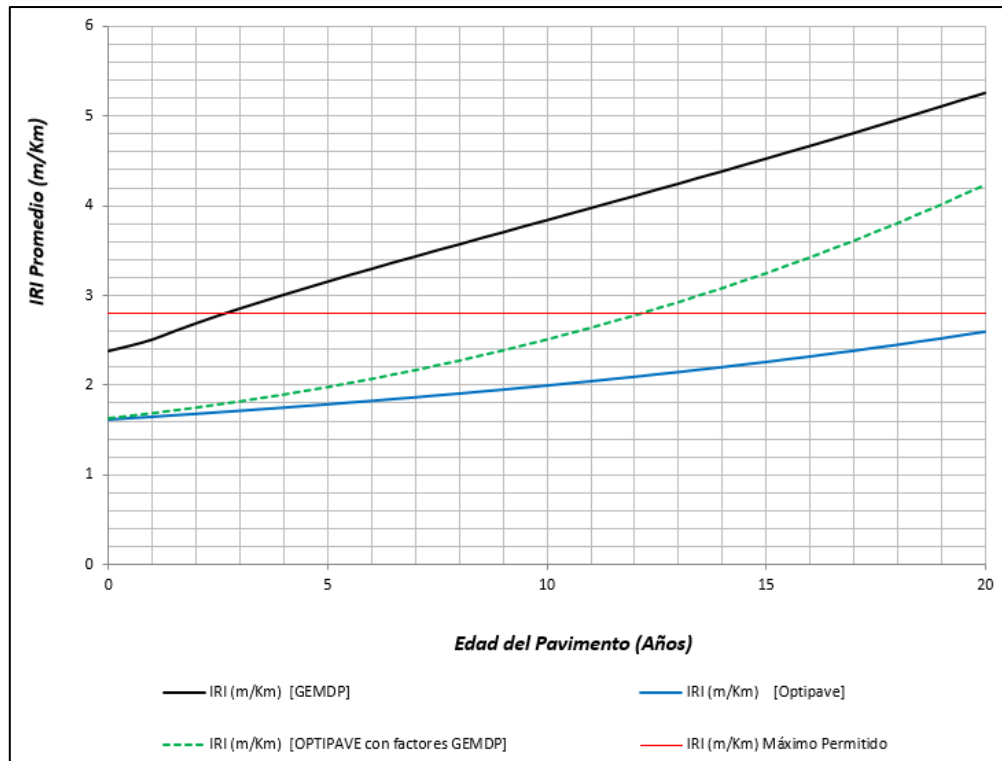


Figura 51: Predicción IRI Promedio M6

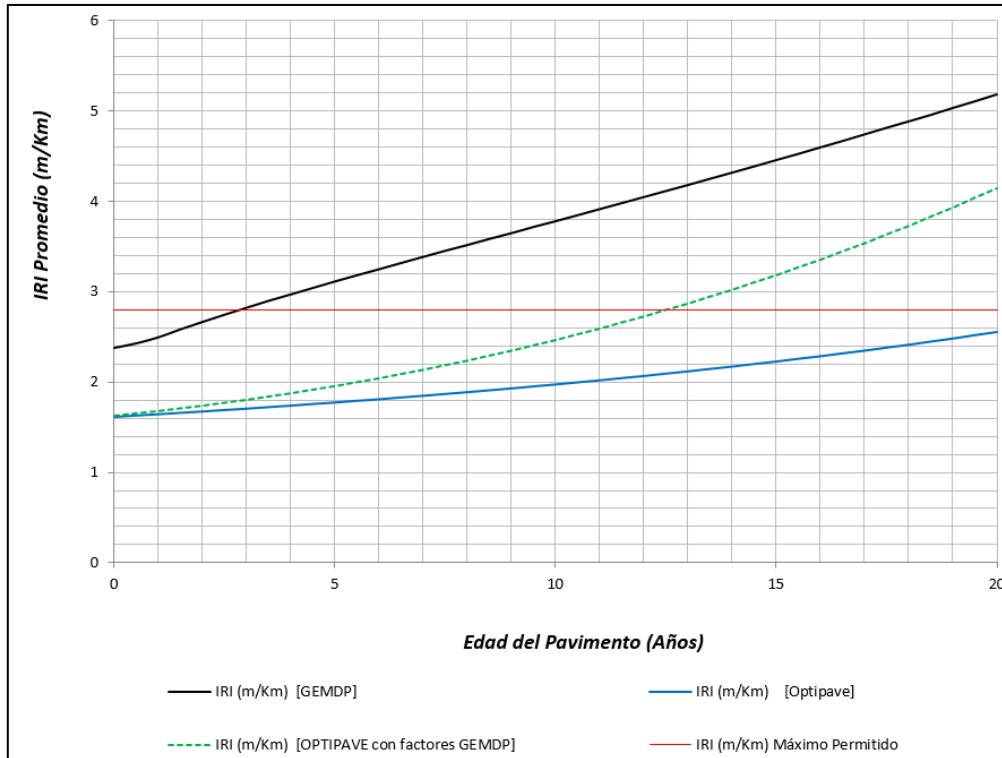


Figura 52: Predicción IRI Promedio M7

Desde la figura 46 hasta la 47 se muestran las predicciones del IRI obtenidas en cada software de las muestras M1 hasta la M2 correspondiente a mezclas con 320 [kg/m³] de cemento, obtenidos a lo largo del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros, parámetros de suelo, y parámetros de clima, en donde se ingresaron los valores de flexocompresión y CET utilizados obtenidos en laboratorio para dicha mezcla.

Desde la figura 48 hasta la 50 se presentan las predicciones del IRI obtenidas en cada software de las muestras M3 hasta la M5 correspondiente a mezclas con 360 [kg/m³] de cemento, obtenidos a lo largo del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros, parámetros de suelo, y parámetros de clima, en donde se ingresaron los valores de flexocompresión y CET utilizados obtenidos en laboratorio para dicha mezcla.

Desde la figura 51 hasta la 52 se presentan las predicciones del IRI obtenidas en cada software de las muestras M6 hasta la M7 correspondiente a mezclas con 400 [kg/m³] de cemento, obtenidos a lo largo del periodo de diseño para cada conjunto de parámetros de diseño, parámetros de tráfico, parámetros, parámetros de suelo, y parámetros de clima, en donde se ingresaron los valores de flexocompresión y CET utilizados obtenidos en laboratorio para dicha mezcla.

En todos los pavimentos con fibra diseñados, se acumula menor IRI en función de un menor valor de la resistencia a la flexotracción y del coeficiente de expansión térmica, a diferencia de la predicción de agrietamiento la incorporación de fibra no refleja mejoras en el desempeño del pavimento para la predicción del IRI, puede observarse que la predicción de la mezcla M4 la cual incorpora fibra se tiene un valor en la predicción de IRI mayor que la mezcla M3, por otro lado ocurre lo contrario para la mezcla M7 a la que también se le incorporan fibras con respecto a la mezcla M6.

Tanto para los diseños realizados con el software Optipave como en los diseños realizados con el software de la GEMDP, se acumula menor IRI en función de un menor valor de la resistencia a la flexotracción y del coeficiente de expansión térmica, a diferencia de la predicción del IRI, en el caso de los pavimentos diseñados con el software Optipave, la incorporación de fibra no refleja mejoras en el desempeño

del pavimento para la predicción del escalonamiento, puede observarse que la predicción de la mezcla M4 la cual incorpora fibra se tiene un valor en la predicción de IRI mayor que la mezcla M3, por otro lado ocurre lo contrario para la mezcla M7 a la que también se le incorporan fibras con respecto a la mezcla M6.

5.2.4 Análisis de resultados de los diseños

A continuación, se muestran resultados resumidos analizando los Porcentajes Total de Losas Agrietadas, Escalonamiento e IRI, de todos los diseños asociados a sus respectivos datos de entrada.

Tabla 27: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M1

RESULTADOS DE DISEÑO CON M1 (HD 320 40-06)	OPTIPAVE	MEPDG	OPTIPAVE con factores MEPDG	
Porcentaje Total de Losas Agrietadas	5.02	2.24	0.92	%
Escalonamiento Promedio Final	1.84	7.40	4.70	mm
IRI Final	2.52	4.81	4.06	m/Km

Tabla 28: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M2

RESULTADOS DE DISEÑO CON M2 (HD 320 40-06 F 2.5)	OPTIPAVE	MEPDG	OPTIPAVE con factores MEPDG	
Porcentaje Total de Losas Agrietadas	5.00	0.96	0.92	%
Escalonamiento Promedio Final	1.68	7.04	4.33	mm
IRI Final	2.43	4.67	3.86	m/Km

Tabla 29: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M3

RESULTADOS DE DISEÑO CON M3 (HD 360 40-06)	OPTIPAVE	MEPDG	OPTIPAVE con factores MEPDG	
Porcentaje Total de Losas Agrietadas	5.12	2.26	0.89	%
Escalonamiento Promedio Final	1.68	7.29	4.33	mm
IRI Final	2.43	4.77	3.86	m/Km

Tabla 30: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M4

RESULTADOS DE DISEÑO CON M4 (HD 360 40-06 F 2.5)	OPTIPAVE	MEPDG	OPTIPAVE con factores MEPDG	
Porcentaje Total de Losas Agrietadas	4.93	0.96	0.95	%
Escalonamiento Promedio Final	1.89	7.96	4.82	mm
IRI Final	2.54	5.04	4.13	m/Km

Tabla 31: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M5

RESULTADOS DE DISEÑO CON M5 (HD 360 40-06 F 4)	OPTIPAVE	MEPDG	OPTIPAVE con factores MEPDG	
Porcentaje Total de Losas Agrietadas	4.92	0.96	0.95	%
Escalonamiento Promedio Final	1.90	7.94	4.83	mm
IRI Final	2.55	5.03	4.14	m/Km

Tabla 32: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M6

RESULTADOS DE DISEÑO CON M6 (HD 400 40-06)	OPTIPAVE	MEPDG	OPTIPAVE con factores MEPDG	
Porcentaje Total de Losas Agrietadas	4.97	0.96	0.93	%
Escalonamiento Promedio Final	1.97	8.50	5.02	mm
IRI Final	2.59	5.26	4.24	m/Km

Tabla 33: Resumen Predicción Agrietamiento, Escalonamiento Promedio e IRI M7

RESULTADOS DE DISEÑO CON M7 (HD 400 40-06 F 2.5)	OPTIPAVE	MEPDG	OPTIPAVE con factores MEPDG	
Porcentaje Total de Losas Agrietadas	4.93	0.96	0.95	%
Escalonamiento Promedio Final	1.90	8.29	4.84	mm
IRI Final	2.55	5.18	4.14	m/Km

6 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

1. Si bien el aumento o disminución del coeficiente de expansión térmica no refleja una variación apreciable en la predicción del agrietamiento, si representa una leve mejora tanto en la predicción del escalonamiento como en la predicción del IRI, el cual en combinación de valores adecuados de resistencia mecánica pueden optimizar el desempeño de las mezclas en tanto los demás parámetros se encuentren dentro de los valores requeridos.
2. Si bien las corridas del software optipave utilizando coeficientes de calibración de la GEMDP y las corridas de la GEMDP para la predicción de escalonamiento e IRI muestran una pendiente similar, los resultados reflejan que la magnitud del deterioro no son comparables entre si debido al no uso de barras de traspaso, en consecuencia todas las conclusiones que se desprendan de estas comparaciones deben tener en consideración esta limitante, por lo que se recomienda para una próxima investigación considerar barras de traspaso.
3. La resistencia tanto a la compresión cilíndrica y la resistencia a la flexotracción a través de los resultados reflejaron un alto grado de asociación lineal con el coeficiente de expansión térmica, por lo que un aumento en la resistencia de los dos primeros, significó un aumento directo en coeficiente de expansión térmica, en estudios anteriores no fue posible establecer una relación clara, no obstante desde la actualización de la norma Nch1017 incorporando las mismas condiciones de curado de la norma que rige la ejecución del ensayo del CET, es posible llegar a estos resultados, sin embargo se requieren más estudios al respecto para confirmar estas relaciones.
4. Los resultados no muestran una mejora comprobable en el valor del coeficiente de expansión térmica al incorporar fibras en el hormigón, principalmente el valor del CET se observa fuertemente influenciado por la resistencia característica tanto a la resistencia a la compresión cilíndrica como a la resistencia a la flexotracción.

5. De acuerdo con los resultados de los diseños de hormigón con fibra, es posible establecer un incremento en el desempeño en la predicción de agrietamiento de la mezcla a través de la incorporación de fibras, esta influencia crece a medida que los espesores de diseño son relativamente bajos en comparación a las carga de tráfico, de la misma manera se observa que en los diseño con espesor mayor esta influencia tiene a despreciarse, por lo que bajo ciertas condiciones de diseño la incorporación de fibras produce mejoras del comportamiento bajo cargas cíclicas, confiriendo al hormigón un mejor desempeño a lo largo de su vida útil, no obstante se requiere estudiar con mayor precisión estas variaciones ya que se basan en coeficientes con poca investigación y que se han incorporado recientemente en el campo de investigación de pavimentos.
6. Tanto la incorporación de fibras en pavimentos como el estudio del coeficiente de expansión térmica en el país son relativamente recientes, por lo que la información disponible es escasa, por esta razón no ha sido posible cuantificar ni establecer criterios de selección de rangos óptimos o finales, para la incorporación de ambos valores en los diseños a emplear, ya sea de porcentaje de fibra, o valor determinado en laboratorio respectivamente, por lo tanto por ahora la selección propiamente tal se limita a valores recomendados.
7. El desarrollo de los métodos de diseño de pavimentos que incorporan fibras, ha producido un nuevo campo de investigación, el cual si bien incorpora varios parámetros como lo son el tráfico, clima, estructura y materiales, está en proceso de mejorar los beneficios que las fibras pueden otorgarle a los pavimentos, ya que aún no se conoce de manera precisa el real efecto e influencia que tiene el CET en este tipo de diseños, y como es conocido que tanto las propiedades mecánicas y las propiedades térmicas son las variables con mayor relevancias debido a la influencia y sensibilidad que poseen a lo largo de la vida útil del pavimento, es importante enfocar futuros esfuerzos de investigación en este ámbito.

7 REFERENCIAS

AASHTO, "Standard Test Method for the Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete (T336-12)", 2012.

ACI (1996). State of art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.IR-96. ACI Fannington Hilis, MI.

ACI Committe 360, 2006. Design of Slabs on Grade. American Concrete Institute, ACI 360R-06, Farmington Hills, MI.

A, Holmgren, G, Cavieres, R, Cepeda. La importancia de un correcto curado de las probetas de hormigón, XV Jornadas Chilenas del Hormigón 511-520, 2005.

Altoubat, S., Roesler, J., Lange, D. & Rieder, K. -A. 2008. Simplified Method for Concrete Pavement Design with Discrete Structural Fibers. Construction and Building Materials 22 (3): 384-393.

Altoubat, S., Roesler, J.R. & Rieder, K.-A.2004. Flexural Capacity of Synthetic Fiber Reinforced Concrete Slab on Ground Base don Beam Toughness Results. Proceedings of the Sixth International Rilem Symposium on Fiber Reinforced Concrete-Befib 2004, Varenna, Italy 2: 1063-1072.

ARA, Inc, 2007. Interim mechanistic–empirical pavement design guide manual of practice. Final Draft. National Cooperative Highway Research Program Project 1-37A

Beckett, D. & Humphreys; J. 1989. Comparative Test on Plain. Fabric Reinforced and Steel Fibre Reinforced Concrete Ground Slabs. Thames Polytechnic School of Civil Engineering, Report No. Tp/B/I, Dartford.

Bravo, "Medición del coeficiente de expansión térmica en hormigones chilenos para pavimentos". UTFSM, 2015.

Beckett, D., Van Woestyne, T. & Callens, S. 1999. Corner and Edge Loading on Ground Floors Reinforced with Steel Fibers. Concrete 33(3): 22-24.

Covarrubias V. J.P., Binder C.E. Optipave 2, Documentation & Design Guide, Santiago, Chile, 2013.

Delgadillo, et al. "Guía para la utilización del método AASHTO 2008 para el diseño de pavimentos rígidos en Chile", UTFSM, 2014.

Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program, Publication No. FHWA-RD 03-031. June 2003.

Fernández Cánovas, M. "Hormigones con fibras: tecnología y propiedades generales". Hormigón y Acero, n°.228-229, 2° y 3er trimestre 2003, pp. 167-176.

Instituto Nacional de Normalización, “Hormigón – Ensayo de Compresión de Probetas Cúbicas y Cilíndricas (NCh1037)”, 2009.

Instituto Nacional de Normalización, “Hormigón – Ensayo de tracción por flexión (NCh1038)”, 2009.

Instituto Nacional de Normalización, “Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción (NCh1017)”, 2009.

J.D. Sota. L.P. Traversa. Las fibras de polipropileno y la reacción álcali sílice, Memorias XI Reunión Técnica de Tecnología del Hormigón. Tomo I. 93-100. Córdoba. 1993.

Johnston, C. & Zemp, R. 1991. Flexural Fatigue Performance of Steel Fiber Fiber Reinforced Concrete-Influence of Fiber Content, Aspect Ratio, and Type. ACI Materials Journal 88(4): 374-383.

Johston, C. D (1994), Fibre-reinforced cement and concrete. In: V. M Malhorta. Advances in concrete technology. 2 ed. Ottawa: V.M Malhorta, P. 603673.

Johnston. C. & Zemp. R. 1991. Flexural Fatigue Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete-Influence of Fiber Content, Aspect Ratio, and Type. ACI Materials Journal 88 (4): 374-383.

Jun, Z. & Stang, H. 1998. Fatigue Performance in Flexure of Fiber Reinforced Concrete. ACI Materials Journal 95(1): 58-67.

Lee, M. & Barr, B. 2004. An Overview of the Fatigue Behavior of Plain and Fibre Reinforced Concrete. Cement and Concrete Composites 26: 299-305.

Khazanovich, M. I. Darter, and H. T. Yu, “Mechanistic-empirical model to predict transverse joint faulting,” Transportation Research Record, no. 1896, pp. 34–45, 2004.

L. Señas. P Maiza, M. Kain., C. Ballesi. Hormigones con fibras de polipropileno. Memorias XI Reunión Técnica de Tecnología del Hormigón. Tomo I. 101-110. Córdoba. 1993.

M.Barreda, C. Iaiani y J.D. Sota. Hormigón reforzado con fibras de polipropileno: Tramo Experimental de un pavimento de Hormigón, Jornadas SAM 2000- IV Coloquio Latino de Fractura y Fatiga 1145-1150, La Plata, 2000.

Meda, A., Plizzari, G., Sorelli, L. & Rossi, B. 2003. Fracture Mechanics for SFRC Pavement. Concrete Structure: The Challenge of Creativity, CEB-FIP.

Mindess, S.2007. Thirty years of fibre reinforced concrete research ar the University of British Columbia.

Mulheron, M. “Evaluation of the Fatigue and Toughness of Fiber Reinforced Concrete for use as a new Highway Pavement Design”.University of Missouri-Kansas, 2014.

Naaman, A.E. "Engineered Steel Fiber with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites". Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 3, November 2003, pp.242.

Oda, J."Caracterización Hormigones de Pavimentos Chilenos y estudio de sus desempeños mediante la GEMDP". UTFSM, 2013.

Parkard, R. & Ray, G.1984. Performance of Fiber-Reinforced Concrete Pavements. Fiber Reinforced Concrete. SP 81-16. American Concrete Institute, Detroit, MI: 325-349.

Parker, F. 1974.Steel Fibrous Concrete for Airport Pavement Applications. Technical Reports S-74-12, Vicksburg, MS: US Army Engineer Waterways Experiment Station.

Ramakrishnan, V., Wu, G. & Hosalli, G. 1989. Flexural Fatigue Strength, Endurance Limit, and Impact Strength of Fiber Reinforced Concretes. Transportation Research Record 1226, Transportation Research Board: 17-24.

Rice,J, 1972. Pavement Design Considerations in Fibrous Concrete: Construction Material for the Seventies Conference Procceding M-28 CERL: 159-176.

Roesler, J., Lange, D., Altoubat, S., Rieder, K.-A. & Ulreich, G.2004. Fracture of Plain and Fiber-Reinforced Concrete Slabs under Monotonic Loading. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering 16 (5): 452-460.

Roesler, J., Altoubat, S., Lange, D., Rieder, K.-A. & Ulreich, G. 2006. Effect of Synthetic Fibers on Structural Behavior of Concrete Slabs on Ground. ACI Materials Journal 103(1): 3-10.

Roesler, J., Bordelon, A., Ioannides, A., Beyer, M. & Wang, D.2008. Design and Concrete Material Requirements for Ultra-Thin Whitetopping. FHWA-ICT-08-016. Urbana, IL: Illinois Center for Transportation.

Roesler, J., Bordelon, A. Fiber-reinforced concrete pavement design and material requirement, Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfield, Champaign, Illinois, USA, 2009.

Rollings, R 1986. Field Performance of Fiber Reinforced Concrete Airfield Pavement DOT/FAA/PM-86/26, Washington, D.C Federal Aviation Administration.

Rollings, R. 1989. Developments in the Corps of Engineers Rigid Airfield Desing Procedures. International Conference on Concrete Pavement Design, Purdue University, West Lafayette, IN: 405-418.

Romualdi, J.p. & Batson, G.B. 1963. Mechanics of crack arrest in concrete, Journal of Engineering Mechanics 89:147-168.

Romualdi, J.P. & Mandel, J.A. 1964. Tensile Strength of concrete affected by unimormly dispersed and closely spaced short lengths of wire reinforcement, Journal of the Ametican Concrete Institute 61: 657-672.

Ruiz Sibaja A., Lopez Rios J., Martinez Jimenez J., La influencia de fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos, Brasil, 2005.

R.Zerbino. Comportamiento reológico en estado fresco de hormigones reforzados con fibras (HRF). Revista Hormigón N° 9, 21-31. 1983.

Sanhueza, M. Jeria, H., Resistencia Residual de los Pavimentos de Hormigón con Fibra estudiados en Chile, 12° Congreso Internacional PROVIAL, Valparaíso, 2016.

Shah. S.1991. Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement-Based Matrixes? ACI Materials Journal 88(6): 595-602.

Sham, S & Burgoyne, C.1986. Loas Test son Dramix Steel Fibre Reinforced Slabs. A Report to Sir Frederick Snow and Partners, Consulting Engineers. Imperial College of Science and Technology, Department of Civil Engineering, Concrete Laboratories.

Souza, E. Pavimentos de Hormigón: Cuidados a edad temprana para garantizar el buen desempeño y una larga vida útil. Revista Carreteras N°203. 2011

UNE-EN 14889-1:2008, "Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad".

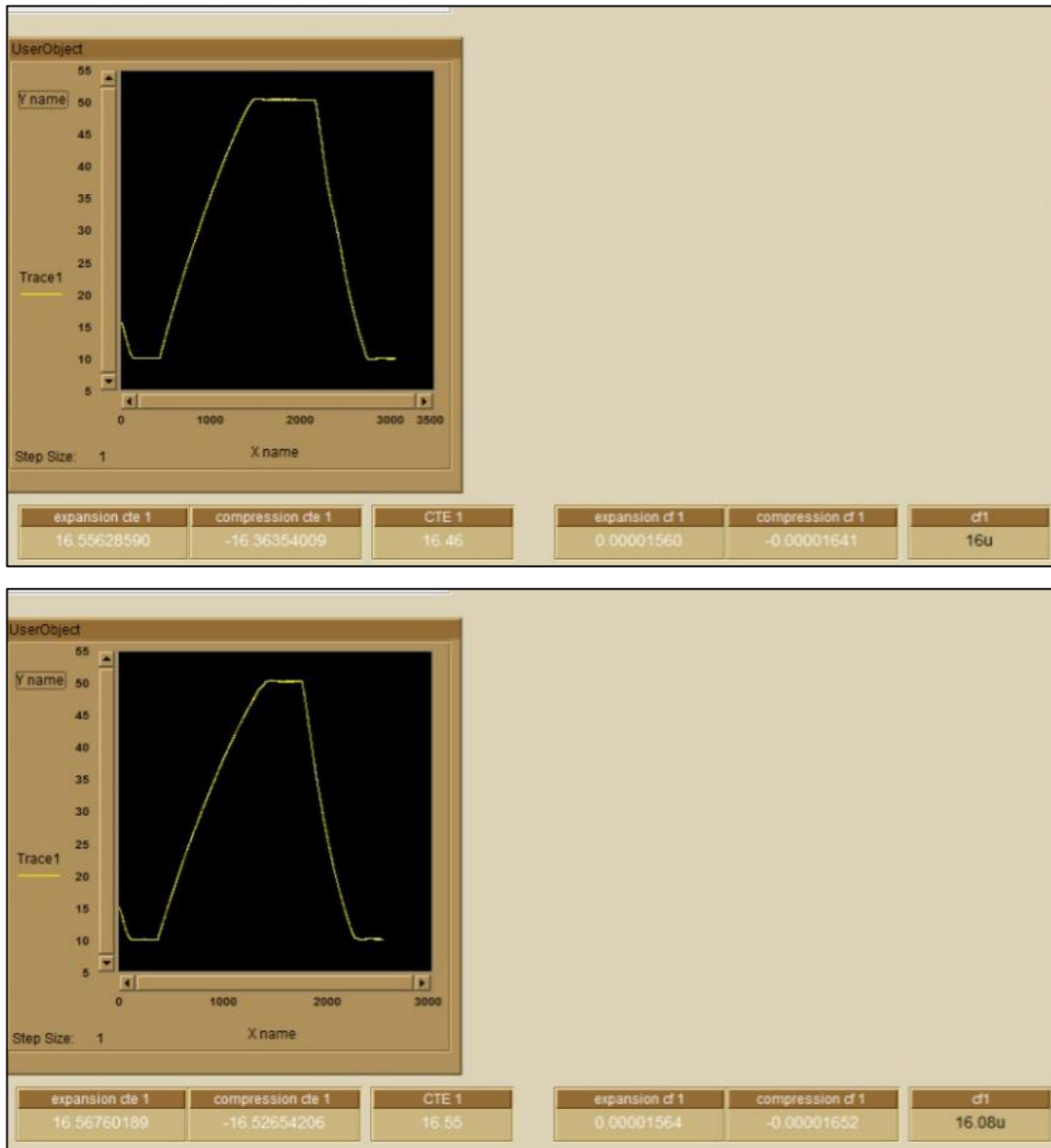
U.S Army Corps of Engineers, "Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Concrete," CRD-C 39-81, issued 1 June 1981.

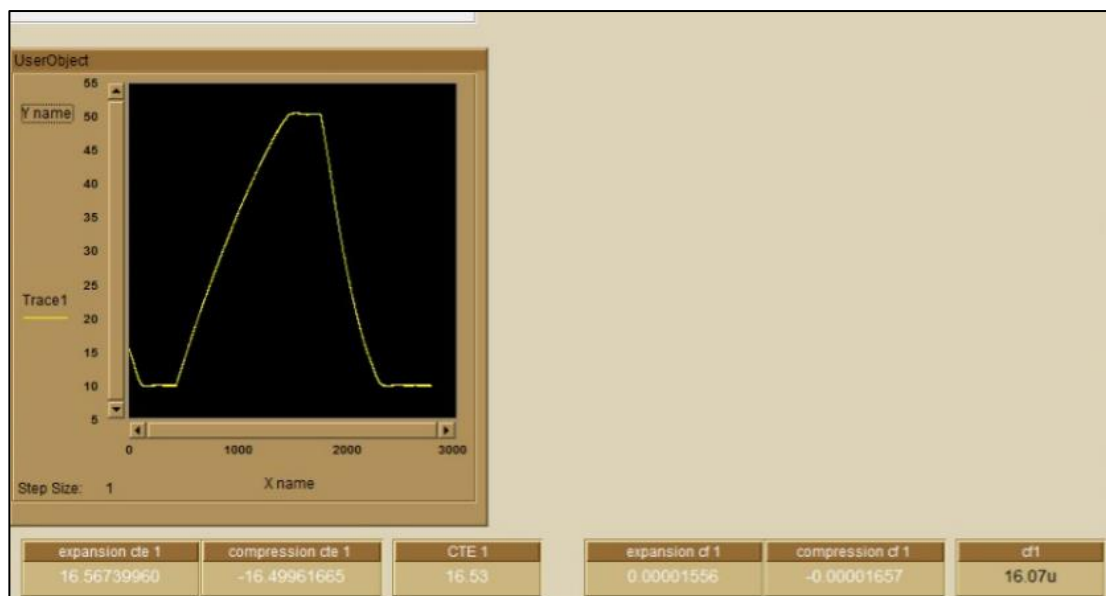
Van Dam, T. 1995. Use of Steel-Fiber Reinforced Concrete in Pavement Structures. Proceedings of the Transportation Congress, ASCE. San Diego. CA, 1:477-488.

8 ANEXOS

ANEXO A – CALIBRACIONES

Los datos finales de las pruebas de calibración del equipo se muestran a continuación:





ANEXO B – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE FIBRA ESTRUCTURAL

A continuación, se muestran las características físicas de las fibras sintéticas estructurales utilizadas para la confección de los hormigones con fibra, la cuales corresponden a un material mezcla de Polipropileno y Polietileno.

FIBRA Tuf-Strand SF		
GRAVEDAD ESPECÍFICA	0.92	-
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	600-650	Mpa
MÓDULO DE ELASTICIDAD	9.5	Gpa
PUNTO DE LLAMA	330	°C
LONGITUD DE LA FIBRA	50	mm
COLOR	BLANCO	-
ABSORCIÓN DE AGUA	DESPRECIABLE	-

ANEXO C – DOSIFICACIONES Y GRANULOMETRIAS DE HORMIGONES SELECCIONADOS

Los resúmenes de las dosificaciones de los hormigones seleccionados se presentan a continuación.

HD 320 40-06			
CEMENTO	MELON PLUS, GRADO ALTA RESISTENCIA	320	Kg/m³
ARENA 1	MELON CON CON	398	Kg/m³
ARENA 2	MELON CON CON	398	Kg/m³
GRAVILLA	MELON CON CON	447	Kg/m³
GRAVA	MELON LAS GARZAS	671	Kg/m³
ADITIVO	MX - 1390	1.44	Kg/m³
AGUA LIBRE	-	156	lt/m³
AGUA TOTAL	-	172	lt/m³

HD 320 40-06 F 2.5			
CEMENTO	MELON PLUS, GRADO ALTA RESISTENCIA	320	Kg/m³
ARENA 1	MELON CON CON	398	Kg/m³
ARENA 2	MELON CON CON	398	Kg/m³
GRAVILLA	MELON CON CON	447	Kg/m³
GRAVA	MELON LAS GARZAS	671	Kg/m³
ADITIVO	MX - 1390	1.44	Kg/m³
ADITIVO	CAVE STRAND	2.5	Kg/m³
AGUA LIBRE	-	156	lt/m³
AGUA TOTAL	-	172	lt/m³
HD 360 40-06			
CEMENTO	MELON PLUS, GRADO ALTA RESISTENCIA	360	Kg/m³
ARENA 1	MELON CON CON	373	Kg/m³
ARENA 2	MELON CON CON	373	Kg/m³
GRAVILLA	MELON CON CON	448	Kg/m³
GRAVA	MELON LAS GARZAS	672	Kg/m³
ADITIVO	MX - 1390	1.62	Kg/m³
AGUA LIBRE	-	160	lt/m³
AGUA TOTAL	-	175	lt/m³
HD 360 40-06 F 2.5			
CEMENTO	MELON PLUS, GRADO ALTA RESISTENCIA	360	Kg/m³
ARENA 1	MELON CON CON	373	Kg/m³
ARENA 2	MELON CON CON	373	Kg/m³
GRAVILLA	MELON CON CON	448	Kg/m³
GRAVA	MELON LAS GARZAS	672	Kg/m³
ADITIVO	MX - 1390	1.62	Kg/m³
ADITIVO	CAVE STRAND	2.5	Kg/m³
AGUA LIBRE	-	160	lt/m³
AGUA TOTAL	-	175	lt/m³

HD 360 40-06 F 4			
CEMENTO	MELON PLUS, GRADO ALTA RESISTENCIA	360	Kg/m³
ARENA 1	MELON CON CON	373	Kg/m³
ARENA 2	MELON CON CON	373	Kg/m³
GRAVILLA	MELON CON CON	448	Kg/m³
GRAVA	MELON LAS GARZAS	672	Kg/m³
ADITIVO	MX - 1390	1.62	Kg/m³
ADITIVO	CAVE STRAND	4	Kg/m³
AGUA LIBRE	-	160	lt/m³
AGUA TOTAL	-	175	lt/m³
HD 400 40-06			
CEMENTO	MELON PLUS, GRADO ALTA RESISTENCIA	400	Kg/m³
ARENA 1	MELON CON CON	351	Kg/m³
ARENA 2	MELON CON CON	351	Kg/m³
GRAVILLA	MELON CON CON	452	Kg/m³
GRAVA	MELON LAS GARZAS	678	Kg/m³
ADITIVO	MX - 1390	1.8	Kg/m³
AGUA LIBRE	-	160	lt/m³
AGUA TOTAL	-	175	lt/m³
HD 400 40-06 F 2.5			
CEMENTO	MELON PLUS, GRADO ALTA RESISTENCIA	400	Kg/m³
ARENA 1	MELON CON CON	351	Kg/m³
ARENA 2	MELON CON CON	351	Kg/m³
GRAVILLA	MELON CON CON	452	Kg/m³
GRAVA	MELON LAS GARZAS	678	Kg/m³
ADITIVO	MX - 1390	1.8	Kg/m³
ADITIVO	CAVE STRAND	2.5	Kg/m³
AGUA LIBRE	-	160	lt/m³
AGUA TOTAL	-	175	lt/m³

A continuación, se presentan las granulometrías combinadas ocupadas en los hormigones provenientes de la Planta de Con Con.

HD 320 40-06							
TAMIZ (mm)	ARENA 1	ARENA 2	GRAVA	GRAVILLA	MEZCLA	MÍNIMO	MÁXIMO
1½"	100	100	100	100	100	95	100
1"	100	100	62	100	87	82	92
¾"	100	100	17	100	71	66	76
½"	100	100	1	69	58	53	63
⅜"	100	100	0	35	50	45	55
Nº 4	87	87	0	2	37	32	42
Nº 8	62	62	0	0	26	22	30
Nº 16	47	47	0	0	20	16	24
Nº 30	38	38	0	0	16	12	20
Nº 50	27	27	0	0	11	8	14
Nº 100	5	5	0	0	2	0	4

HD 320 40-06 F 2.5							
TAMIZ (mm)	ARENA 1	ARENA 2	GRAVA	GRAVILLA	MEZCLA	MÍNIMO	MÁXIMO
1½"	100	100	100	100	100	95	100
1"	100	100	62	100	87	82	92
¾"	100	100	17	100	71	66	76
½"	100	100	1	69	58	53	63
⅜"	100	100	0	35	50	45	55
Nº 4	87	87	0	2	37	32	42
Nº 8	62	62	0	0	26	22	30
Nº 16	47	47	0	0	20	16	24
Nº 30	38	38	0	0	16	12	20
Nº 50	27	27	0	0	11	8	14
Nº 100	5	5	0	0	2	0	4

HD 360 40-06							
TAMIZ (mm)	ARENA 1	ARENA 2	GRAVA	GRAVILLA	MEZCLA	MÍNIMO	MÁXIMO
1½"	100	100	100	100	100	95	100
1"	100	100	62	100	86	81	91
¾"	100	100	17	100	70	65	75
½"	100	100	1	69	57	52	62
⅜"	100	100	0	35	48	43	53
Nº 4	87	87	0	2	35	30	40
Nº 8	62	62	0	0	25	21	29
Nº 16	47	47	0	0	19	15	23
Nº 30	38	38	0	0	15	11	19
Nº 50	27	27	0	0	11	8	14
Nº 100	5	5	0	0	2	0	4

HD 360 40-06 F 2.5							
TAMIZ (mm)	ARENA 1	ARENA 2	GRAVA	GRAVILLA	MEZCLA	MÍNIMO	MÁXIMO
1½"	100	100	100	100	100	95	100
1"	100	100	62	100	87	82	92
¾"	100	100	17	100	71	66	76
½"	100	100	1	69	58	53	63
⅜"	100	100	0	35	50	45	55
Nº 4	87	87	0	2	37	32	42
Nº 8	62	62	0	0	26	22	30
Nº 16	47	47	0	0	20	16	24
Nº 30	38	38	0	0	16	12	20
Nº 50	27	27	0	0	11	8	14
Nº 100	5	5	0	0	2	0	4

HD 360 40-06 F 4							
TAMIZ (mm)	ARENA 1	ARENA 2	GRAVA	GRAVILLA	MEZCLA	MÍNIMO	MÁXIMO
1½"	100	100	100	100	100	95	100
1"	100	100	62	100	86	81	91
¾"	100	100	17	100	70	65	75
½"	100	100	1	69	57	52	62
⅜"	100	100	0	35	48	43	53
Nº 4	87	87	0	2	35	30	40
Nº 8	62	62	0	0	25	21	29
Nº 16	47	47	0	0	19	15	23
Nº 30	38	38	0	0	15	11	19
Nº 50	27	27	0	0	11	8	14
Nº 100	5	5	0	0	2	0	4

HD 400 40-06							
TAMIZ (mm)	ARENA 1	ARENA 2	GRAVA	GRAVILLA	MEZCLA	MÍNIMO	MÁXIMO
1½"	100	100	100	100	100	95	100
1"	100	100	62	100	86	81	91
¾"	100	100	17	100	69	64	74
½"	100	100	1	69	56	51	61
⅜"	100	100	0	35	47	42	52
Nº 4	87	87	0	2	34	29	39
Nº 8	62	62	0	0	24	20	28
Nº 16	47	47	0	0	18	14	22
Nº 30	38	38	0	0	15	11	19
Nº 50	27	27	0	0	10	7	13
Nº 100	5	5	0	0	2	0	4

HD 400 40-06 F 2.5							
TAMIZ (mm)	ARENA 1	ARENA 2	GRAVA	GRAVILLA	MEZCLA	MÍNIMO	MÁXIMO
1½"	100	100	100	100	100	95	100
1"	100	100	62	100	86	81	91
¾"	100	100	17	100	69	64	74
½"	100	100	1	69	56	51	61
⅜"	100	100	0	35	57	42	52
Nº 4	87	87	0	2	34	29	39
Nº 8	62	62	0	0	24	20	28
Nº 16	47	47	0	0	18	14	22
Nº 30	38	38	0	0	15	11	19
Nº 50	27	27	0	0	10	7	13
Nº 100	5	5	0	0	2	0	4

ANEXO D – REGISTRO PROCESO DE SATURACION

A continuación, se muestra el registro completo del proceso de saturación de las muestras ensayadas en LEMCO.

Hormigón	Probeta	Inicial [gr]	24 Horas [gr]	48 Horas [gr]	Incremento [%]	Longitud [mm]
M1	P1	3429	3444	3446	0.09	177.4
	P2	3400	3420	3422	0.11	176.9
	P3	3486	3497	3499	0.07	179.1
M2	P1	3325	3352	3356	0.16	177.4
	P2	3513	3536	3536	0.12	178.5
	P3	3449	3473	3477	0.14	178.6
M3	P1	3342	3358	3363	0.11	176.4
	P2	3431	3451	3452	0.11	178.6
	P3	3378	3396	3397	0.10	179.0
M4	P1	3370	3393	3397	0.14	176.4
	P2	3485	3503	3506	0.11	177.1
	P3	3483	3501	3503	0.10	177.7
M5	P1	3459	3400	3481	0.11	177.8
	P2	3479	3498	3501	0.11	176.6
	P3	3460	3480	3482	0.11	177.8
M6	P1	3393	3405	3407	0.07	177.8
	P2	3395	3403	3404	0.05	178.5
	P3	3502	3506	3507	0.03	178.0
M7	P1	3349	3362	3364	0.08	175.5
	P2	3534	3546	3549	0.08	178.9
	P3	3467	3479	3480	0.07	178.8

ANEXO E – PARÁMETROS DE INGRESO DE SOFTWARE GEMDP

Se resumen en este anexo los parámetros de ingreso del software de la GEMDP, que se utilizaron en los diseños utilizados para los resultados del Capítulo 5.

i) Parámetros de diseño

Para el diseño de pavimentos rígidos se debe seleccionar un IRI inicial y los límites de los criterios de desempeño que se van a evaluar. Para los diseños realizados se considera lo siguiente.

PARAMETROS DE DISEÑO		
Vida de Diseño	20	años
IRI Inicial	2	m/Km
IRI Final	2.8	m/Km
Porcentaje de Losas Agrietadas	10	Kg/m ³
Escalonamiento Promedio	5	mm
Confiabilidad	85	%

Se considera un valor de confiabilidad 85%, según una clasificación de vía de carreteras interurbanas y vías de alto tráfico, para cada uno de los criterios de desempeño.

ii) Tránsito

Se escoge tránsito según clasificación de la Federal Highway Administration, seleccionando el grupo TTC 8 que se encuentra dentro de los recomendados para Rutas Inter-interegionales

PARAMETROS DE TRÁFICO		
Tasa de Crecimiento Anual de Tráfico	20	años
Clasificación del Tipo de Tráfico	FHWA TTC 8	-
Distancia de la Huella a Línea de Demarcación	450	mm
Desv. Estándar de la Distribución Lateral del Tráfico	250	mm
TMDA Inicial (Ambos Sentidos)	3118	-
Porcentaje de Tráfico en Dirección de Diseño	50	%
Porcentaje de Tráfico en Pista de Diseño	90	%

→ Factores de Ajuste Mensual

Month	Vehicle Class									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
January	1.2	1.1	0.9	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9
February	1.2	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1
March	1.0	1.0	0.9	1.2	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9
April	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0	1.1
May	1.0	1.0	1.1	0.8	0.9	1.0	1.2	1.1	1.1	1.1
June	0.8	0.8	0.9	1.0	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8
July	1.0	1.0	1.2	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
August	1.0	1.0	1.2	1.2	1.0	1.0	0.9	1.0	1.2	1.7
September	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0
October	1.0	1.0	1.0	1.2	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	0.8
November	1.0	1.0	1.2	0.9	1.2	1.0	1.1	1.0	0.9	0.8
December	1.1	1.3	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	0.7

→ Distribución de Vehículos por Clase

Vehicle Class	AADTT Distribution (%) (Level 3)	Growth Factor	
		Rate (%)	Function
Class 4	1.7%	4%	Linear
Class 5	19.3%	4%	Linear
Class 6	4.6%	4%	Linear
Class 7	0.9%	4%	Linear
Class 8	6.7%	4%	Linear
Class 9	44.8%	4%	Linear
Class 10	6%	4%	Linear
Class 11	2.6%	4%	Linear
Class 12	1.6%	4%	Linear
Class 13	11.8%	4%	Linear

→ Factores de Distribución Carga por Eje

Hour	Distribution (%)	Hour	Distribution (%)
12 AM	3.48%	12 PM	4.6%
1 AM	3.48%	1 PM	4.6%
2 AM	3.48%	2 PM	4.6%
3 AM	3.48%	3 PM	4.6%
4 AM	3.47%	4 PM	5.11%
5 AM	3.47%	5 PM	5.11%
6 AM	3.61%	6 PM	5.11%
7 AM	3.61%	7 PM	5.11%
8 AM	3.61%	8 PM	4.16%
9 AM	3.61%	9 PM	4.16%
10 AM	4.6%	10 PM	4.17%
11 AM	4.6%	11 PM	4.17%
		Total	100%

→ Información Movimiento Lateral del Tránsito

Traffic Wander	
Mean wheel location (mm)	450.0
Traffic wander standard deviation (mm)	250.0
Design lane width (m)	366.0

→ Número de ejes por clase vehicular

Vehicle Class	Single Axle	Tandem Axle	Tridem Axle	Quad Axle
Class 4	1.73	0.27	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1	1	0	0
Class 7	0.71	0.63	0.66	0
Class 8	2.1	0.9	0	0
Class 9	1.06	1.89	0.06	0
Class 10	1	1	1	0
Class 11	3.12	0.88	0	0
Class 12	2.07	1.93	0.05	0
Class 13	0	0	0	0

→ Configuración de Ejes

Axle Configuration	
Average axle width (m)	2.6
Dual tire spacing (mm)	305.0
Tire pressure (kPa)	830.0

Average Axle Spacing	
Tandem axle spacing (m)	1.3
Tridem axle spacing (m)	1.3
Quad axle spacing (m)	1.3

→ Distanciamiento entre ruedas

Wheelbase				
Value Type	Axle Type	Short	Medium	Long
Average spacing of axles (m)		3.7	4.6	5.5
Percent of Trucks (%)		33.0	33.0	34.0

iii) Clima

Los datos climáticos se obtienen del informe “Bases de Datos Climáticas: Informe de Avance Proyecto INNOVA 11BPC-10220” correspondiente a las estaciones climáticas de Valparaíso.

iv) Estructura

→ Características de Diseño

Structure - ICM Properties	
PCC surface shortwave absorptivity	0.85

PCC joint spacing (m)	
Is joint spacing random ?	False
Joint spacing (m)	3.50

Doweled Joints	
Is joint doweled ?	False
Dowel diameter (mm)	-
Dowel spacing (mm)	-

Widened Slab	
Is slab widened ?	False
Slab width (m)	3.66

Tied Shoulders	
Tied shoulders	False
Load transfer efficiency (%)	-

PCC-Base Contact Friction	
PCC-Base full friction contact	True
Months until friction loss	240.00

Sealant type	Preformed	Erodibility index	3
--------------	-----------	-------------------	---

Permanent curl/warp effective temperature difference (°C)	-5.60
---	-------

→ Losa de Hormigón

PCC	
Thickness (mm)	230.0
Unit weight (kgf/m ³)	2400.0
Poisson's ratio	0.2

Thermal	
PCC thermal conductivity (watt/meter-kelvin)	2.16
PCC heat capacity (joule/kg-kelvin)	1172.3

Mix		
Cement type		Type III (3)
Cementitious material content (kgf/m ³)		320
Water to cement ratio		0.49
Aggregate type		Granite (3)
PCC zero-stress temperature (°C)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	35.2
Ultimate shrinkage (microstrain)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	597.4
Reversible shrinkage (%)		50
Time to develop 50% of ultimate shrinkage (days)		35
Curing method		Wet Curing

28-Day PCC modulus of rupture (MPa)	5.1
28-Day PCC elastic modulus (MPa)	29000.0

→ Base Granular

Unbound	
Layer thickness (mm)	60.0
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5
Resilient Modulus (MPa)	
300.0	
Field	Value
Display name/identifier	A-1-a

→ Subrasante

Unbound	
Layer thickness (mm)	Semi-infinite
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5
Resilient Modulus (MPa)	
80.0	
Field	Value
Display name/identifier	A-6

→ Factores de Calibración

PCC Faulting			
$C_{12} = C_1 + (C_2 * FR^{0.25})$ $C_{34} = C_3 + (C_4 * FR^{0.25})$ $FaultMax_0 = C_{12} * \delta_{curling} * \left[\log(1 + C_5 * 5.0^{EROD}) * \log \left(P_{200} * \frac{WetDays}{p_s} \right) \right]^{C_6}$ $FaultMax_i = FaultMax_0 + C_7 * \sum_{j=1}^m DE_j * \log(1 + C_5 * 5.0^{EROD})^{C_6}$ $\Delta Fault_i = C_{34} * (FaultMax_{i-1} - Fault_{i-1})^2 * DE_i$ $C_8 = DowelDeterioration$			
C1: 1.165	C2: 1.1273688	C3: 0.0015	C4: 0.001086951
C5: 200	C6: 0.54	C7: 4.5	C8: 400
PCC Reliability Faulting Standard Deviation			
Pow((0.021*FAULT),0.591) + 0.055			

IRI-jpcp			
C1 - Cracking C2 - Spalling C3 - Faulting C4 - Site Factor	C1: 0.8203		C2: 0.4417
	C3: 1.36		C4: 25.24
	Reliability Standard Deviation		
	5.4		

PCC Cracking				
$\log(N) = C1 \cdot \left(\frac{MR}{\sigma}\right)^{C2}$ $CRK = \frac{100}{1 + C4 \cdot FD^{C5}}$	Fatigue Coefficients		Cracking Coefficients	
	C1: 2	C2: 1.22	C4: 1.11	C5: -2.05
	PCC Reliability Cracking Standard Deviation			
	Pow(7237454862*CRACK,0.01136) + 0.92249			

ANEXO F – RESULTADOS ENSAYOS CET EQUIPO GILSON

Resultados de ensayos CET entregado por equipo Gilson HM 251 ensayados en LEMCO.

