

1
ED64d
2017

Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil



**Determinación del efecto en las propiedades mecánicas
que influyen en el diseño estructural de pavimentos
rígidos al aplicar la metodología de optimización
Shilstone en las mezclas de hormigón realizado en la V
Región**

Por

Rubén Alejandro Epuyao Jiménez

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

Profesor Guía: Guillermo Brante



Junio, 2017

Agradecimientos

Agradecimientos a mi Padre Celestial por concederme grandes bendiciones a lo largo de mi vida.

A mi amada esposa Karina Donoso por su apoyo incondicional, su amor, y su paciencia, y a mi hija por ser la fuente de motivación y felicidad en mi vida.

A mi madre por siempre confiar en mí, por sus enseñanzas y su motivación.

A mis Tíos por su gran apoyo durante los años de estudio, por sus enseñanzas y por ser como unos padres para mí.

A mi familia y familia de mi amada esposa, por su gran apoyo, ayuda, confianza y sacrificio.

A mis amigos Daniel González, Felipe Céspedes, Jean Soto, Nathan Olivares, Pedro González por su gran amistad, su apoyo y motivación durante todo este tiempo.

A mi profesor guía por su disposición, tiempo y gran ayuda durante este proceso.

Contenido

Índice de Figuras.....	6
Índice de Tablas.....	8
Índice de Ecuaciones.....	10
1. Introducción.....	12
1.1. Planteamiento del problema.....	12
1.2. Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo general.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3. Alcances.....	15
1.4. Metodología de trabajo.....	16
2. Marco Teórico.....	18
2.1. Pavimentos Rígidos.....	18
2.1.1 Capas que componen los Pavimentos Rígidos:.....	20
2.2. Mezcla de hormigón.....	22
2.2.1 Propiedades del hormigón fresco.....	22
2.3. Componentes de una mezcla de hormigón.....	26
2.3.1 Cemento.....	26
2.3.2 Áridos:.....	29
2.4. Optimización de las mezclas.....	31
3. Diseño estructural del pavimento.....	34
3.1. Metodología de diseño.....	35
3.1.1 Mapa conceptual de la determinación del espesor de la losa de hormigón en pavimentos.....	36
3.1.2 Mapa conceptual de la verificación de escalonamiento de juntas.....	37
3.1.3 Mapa conceptual metodología de verificación de carga de esquina.....	38
3.2. Ecuaciones de Diseño.....	39
3.3. Caracterización de los parámetros de diseño.....	40
3.3.2 Ejes equivalentes (EE).....	40
3.3.2 Serviciabilidad.....	41
3.3.3 Confiabilidad.....	42
3.3.4 Módulo de reacción de la subrasante.....	43
3.3.5 Resistencia a la flexotracción y módulo de elasticidad del hormigón.....	45
3.3.6 Módulo de elasticidad y coeficiente de fricción de la base.....	46

3.3.7	Factor de ajuste por tipo de berma	46
3.3.8	Temperaturas y precipitaciones	47
3.4	Datos de Entrada.....	48
3.4.1	Serviciabilidad	48
3.4.2	Ejes Equivalentes.....	48
3.4.3	Confiabilidad.....	48
3.4.4	Módulo de Reacción de la Subrasante.....	48
3.4.5	Módulo de Elasticidad y Resistencia a la Flexotracción del Hormigón.....	49
3.4.6	Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Fricción de la Base	49
3.4.7	Factor de Ajuste por Tipo de Berma.....	49
3.4.8	Temperaturas y Precipitaciones	49
3.4.9	Otros parámetros de entrada	49
3.5	Determinación del espesor.....	50
3.5.1	Tensión de Tracción Máxima en la Losa con Carga de Borde, Considerando el Efecto de la Temperatura:	50
3.5.2	Tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, considerando efecto de temperatura, en las condiciones de prueba AASHO.....	52
3.5.3	Verificación de escalonamiento.....	53
3.5.4	Verificación carga de esquina.	54
4	Mezcla optimizada.....	56
4.1	Diseño de la mezcla de hormigón	56
4.1.1	La dosificación de las mezclas de hormigón	57
4.1.2	Optimización de la granulometría.....	58
4.2	Descripción de metodología Shilstone	59
4.2.1	Gráfico del Coeficiente de Grosor	59
4.2.2	Gráfico de Potencia 0.45.....	62
4.2.3	Gráfico de porcentaje retenido de agregado	63
4.3	Verificación Metodología Shilstone a Mezcla Optimizada	65
4.3.1	Especificaciones de la mezcla diseñada	65
4.3.2	Granulometría	66
4.3.3	Gráfico de factor de grosor.....	68
4.3.4	Gráfico de Potencia 0.45.....	70
4.3.5	Gráfico de porcentaje retenido	72

4.4	Verificación metodología Shilstone a una mezcla basada en dosificación común de la V región.	74
4.4.1	Especificaciones de la mezcla diseñada	74
4.4.2	Granulometría	75
4.4.3	Gráfico de factor de grosor (ambas).....	77
4.4.4	Gráfico de factor 0.45.....	79
4.4.5	Gráfico de porcentaje retenido	80
4.5	Diseño de Mezcla Optimizada por Shilstone	82
4.5.1	Especificaciones de la mezcla diseñada	82
4.5.3	Gráfico de factor de grosor.....	83
4.5.4	Gráfico de factor 0.45.....	84
4.4.5	Gráfico de porcentaje retenido	85
5	Análisis de las probetas de hormigón.....	86
5.1	Confección de Probetas	86
5.2	Métodos de Ensaye.....	87
5.2.1	Expresión de los resultados probetas a compresión	87
5.2.2	Expresión de los resultados probetas prismáticas a la flexión:	89
5.2.3	Resultados de los ensayos.....	91
5.3	Evaluación del Efecto de la Optimización en las propiedades mecánicas	98
5.3.1	Variación de la Resistencia Metodología Shilstone vs Mezcla común.	98
5.4	Variación de la Metodología Shilstone Diseño Propuesto.....	102
6	Conclusiones y comentarios.....	105
6.1	Conclusiones.....	105
6.2	Comentarios	108
7.	Bibliografía	109
8.	Anexos	111
8.1	Compuestos del Cemento (anexo ítem 2.3).....	111
8.2	Diseño del Pavimento (anexo ítem 3.5).....	114
8.2.1	Determinación del espesor	114
8.2.1.1	Tensión de Tracción Máxima en la Losa con Carga de Borde, Considerando el Efecto de la Temperatura:	114
8.2.1.2	Tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, considerando efecto de temperatura, en las condiciones de prueba AASHO.....	117
8.2.1.3	Verificación de escalonamiento	119
8.2.1.4	Verificación carga de esquina.....	120

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Metodología de Desarrollo de Trabajo de Título	17
Figura 2.1 - Estructura de un pavimento rígido	18
Figura 2.2 Distribución de cargas de pavimentos rígidos.....	19
Figura 2.3 Uniformidad de las mezclas a nivel microscópico.....	23
Figura 2.4 - Examen cualitativo de tendencia a la segregación por ensayos de consistencia [9]	24
Figura 2.5 - Modificación del volumen del hormigón durante la exudación [10].....	25
Figura 2.6 Exudación y asentamiento plástico de una mezcla de hormigón colocada sobre losas de diferentes espesores [11].....	25
Figura 2.7 Mapa Conceptual de los Componentes de una Mezcla de Hormigón.....	26
Figura 2.8 Gráfico de evaluación visual de forma de partículas [5].....	30
Figura 3.1 Mapa conceptual de la determinación del espesor de la losa de hormigón en pavimentos [3].	36
Figura 3.2 Mapa conceptual de la verificación de escalonamiento de juntas [3].....	37
Figura 3.3 Mapa conceptual metodología de verificación de carga de esquina [3].	38
Figura 3.4 Gráfico cálculo tensión de esquina, Manual de Carreteras [3].	55
Figura 4.1 Gráfico de Optimización Shilstone [1]	61
Figura 4.2 Gráfico 0.45.....	62
Figura 4.3 Gráfico de porcentaje retenido, "18-8"	64
Figura 4.4 Gráfico de Shilstone Granulometría Optimizada	69
Figura 4.5 Gráfico 0.45 Granulometría Optimizada.....	71
Figura 4.6 Gráfico Porcentaje Retenido Granulometría Optimizada	73
Figura 4.7 Gráfico de Shilstone Granulometría de Comparación.....	78
Figura 4.8 Gráfico 0.45 Granulometría de Comparación.....	79
Figura 4.9 Gráfico Porcentaje Retenido Granulometría de Comparación	80
Figura 4.10 – Gráfico de Shilstone Granulometría Corregida	84
Figura 4.11 Gráfico 0.45 Granulometría de Comparación.....	84
Figura 4.12 Gráfico Porcentaje Retenido Granulometría de Corregida.....	85
Figura 5.1 Medidas de las Probetas, Caras de Llenado [4].....	88
Figura 5.2 Alturas de las Probetas, Caras de Llenado [4].	88
Figura 5.3 Esquema de Ensaye de Tracción por Flexión.....	89
Figura 5.4 Probetas Cúbicas antes de ser ensayadas	90
Figura 5.5 Probetas Prismáticas antes de ser ensayadas	90
Figura 5.6 Probeta Cilíndrica después de ser ensayadas	92
Figura 5.7 Probetas Prismáticas Después de ser ensayadas	92

Figura 5.8 Gráfico Comparación de Resistencias Probetas Cúbicas	98
Figura 5.9 Gráfico Comparación de Resistencias Probetas Cilíndricas	99
Figura 5.10 Gráfico Comparación de Resistencias Probetas Prismáticas	100
Figura 5.11 Gráfico de comparación de probetas cilíndricas	102
Figura 5.12 - Gráfico de comparación de probetas cilíndricas	103
Figura 6.1 Construcción de Losas Optimizadas Obra Camino la Pólvora, 2016.....	108
Figura 8.1 Gráfico cálculo tensión de esquina, Manual de Carreteras [3].....	121

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Requisitos químicos para los cementos	28
Tabla 2.2 Requisitos físicos mecánicos de los cementos	29
Tabla 2.3 Límites de Distribución de Porcentaje Retenido	34
Tabla 3.1 Índices de Serviciabilidad	41
Tabla 3.2 Nivel de confianza y valor de S_0	42
Tabla 3.3 Parámetros para el cálculo de k en suelos finos	44
Tabla 3.4 Rangos de Valores de k Para Suelos Granulares	44
Tabla 3.5 Resistencia a la Flexotracción	45
Tabla 3.6 Módulos de Elasticidad y Coeficiente de Fricción de la Base	46
Tabla 3.7 Factor de Ajuste por Tipo de Berma	46
Tabla 3.8 Estadísticas Climáticas	47
Tabla 4.1 Valores límites del gráfico de porcentaje retenido	63
Tabla 4.2 Dosificación de la Mezcla Optimizada proporcionada por la consultora	65
Tabla 4.3 Porcentajes de Áridos para la Dosificación	66
Tabla 4.4 Granulometría Arena Mezcla Optimizada	66
Tabla 4.5 Granulometría Gravilla Mezcla Optimizada	67
Tabla 4.6 Granulometría Grava Mezcla Optimizada	67
Tabla 4.7 Granulometría Combinada Mezcla Optimizada	68
Tabla 4.8 Coordenadas Horizontales Gráfico 0.45	70
Tabla 4.9 Porcentaje que pasa Granulometría Optimizada	71
Tabla 4.10 Porcentajes retenido por tamiz Granulometría Optimizada	72
Tabla 4.11 Dosificación Mezcla de Comparación	74
Tabla 4.12 Porcentajes de Áridos Mezcla de Comparación	75
Tabla 4.13 Granulometría Arena Mezcla de Comparación	75
Tabla 4.14 Granulometría Gravilla Mezcla de Comparación	76
Tabla 4.15 Granulometría Grava Mezcla de Comparación	76
Tabla 4.16 Porcentaje que pasa Granulometría Combinada de Comparación	77
Tabla 4.17 Porcentaje que pasa Granulometría de Comparación	79
Tabla 4.18 Porcentaje Retenido Granulometría de Comparación	80
Tabla 4.19 Dosificación Mezcla de Comparación	82
Tabla 4.20 Porcentajes de Áridos Mezcla de Comparación	83
Tabla 5.1 Medidas de las probetas prismáticas	86
Tabla 5.2 Medidas de las probetas Cúbicas	86

Tabla 5.3 Medidas de las probetas Cilíndricas.....	86
Tabla 5.4 Resultados de Carga última de los Ensayos.....	91
Tabla 5.5 Resultados de Carga última de los Ensayos.....	91
Tabla 5.6 Resultados de Carga última de los Ensayos.....	93
Tabla 5.7 Cálculo de Sección Real Cubos Hormigón Optimizado Consultora	93
Tabla 5.8 Cálculo de Resistencia a Compresión.....	93
Tabla 5.9 Cálculo de Sección Real	93
Tabla 5.10 Cálculo de Resistencia a Compresión.....	94
Tabla 5.11 Cálculo de Sección Real	94
Tabla 5.12 Cálculo de Resistencia a Compresión.....	94
Tabla 5.13 Cálculo de Sección Real	95
Tabla 5.14 Cálculo de Resistencia a Compresión.....	95
Tabla 5.15 Cálculo de Sección Real	95
Tabla 5.16 Cálculo de Resistencia a Compresión.....	95
Tabla 5.17 Cálculo de Sección Real	96
Tabla 5.18 Cálculo de Resistencia a Compresión.....	96
Tabla 5.19 Cálculo de Resistencia a Flexión	96
Tabla 5.20 Cálculo de Resistencia a Flexión	96
Tabla 5.21 Cálculo de Resistencia a Flexión	97
Tabla 5.22 Comparación de Resistencias Probetas Cúbicas.....	98
Tabla 5.23 Comparación de Resistencias Probetas Cilíndricas.....	99
Tabla 5.24 Comparación de Resistencias Probetas Prismáticas.....	100
Tabla 5.25 Comparación de Resistencias Probetas Cilíndricas Optimizadas.....	102
Tabla 5.26 Comparación de Resistencias Probetas Cubicas Optimizadas.....	103
Tabla 8.1 Requisitos químicos para los cementos.....	113
Tabla 8.2 Requisitos físicos mecánicos de los cementos	113

Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1	27
Ecuación 2.2	32
Ecuación 2.3	32
Ecuación 2.4	32
Ecuación 2.5	32
Ecuación 2.6	33
Ecuación 3.1	39
Ecuación 3.2	39
Ecuación 3.3	39
Ecuación 3.4	39
Ecuación 3.5	40
Ecuación 3.6	42
Ecuación 3.7	42
Ecuación 3.8	43
Ecuación 3.9	43
Ecuación 3.10	44
Ecuación 3.11	45
Ecuación 3.12	50
Ecuación 3.13	50
Ecuación 3.14	50
Ecuación 3.15	51
Ecuación 3.16	51
Ecuación 3.17	51
Ecuación 3.18	52
Ecuación 3.19	52
Ecuación 3.20	52
Ecuación 3.21	52
Ecuación 3.22	52
Ecuación 3.23	53
Ecuación 3.24	53
Ecuación 3.25	54
Ecuación 3.26	54
Ecuación 4.1	59

Ecuación 4.2	60
Ecuación 4.3	60
Ecuación 5.1	87
Ecuación 5.2	87
Ecuación 5.3	88
Ecuación 5.4	89
Ecuación 8.1	111
Ecuación 8.2	114
Ecuación 8.3	114
Ecuación 8.4	114
Ecuación 8.5	115
Ecuación 8.6	115
Ecuación 8.7	115
Ecuación 8.8	117
Ecuación 8.9	117
Ecuación 8.10	117
Ecuación 8.11	117
Ecuación 8.12	117
Ecuación 8.13	119
Ecuación 8.14	119
Ecuación 8.15	120
Ecuación 8.16	121

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Los pavimentos rígidos, como los pavimentos de hormigón, son ampliamente usados a lo largo de Chile, y están compuestos por la pasta de cemento (agua y cemento), los agregados (gruesos y finos) y los aditivos. Se diseñan de acuerdo al Manual de Carreteras [3] cumpliendo los requisitos de resistencia, ejes equivalentes, serviciabilidad, vida de diseño y confiabilidad. Este diseño se basa en el método planteado por AASHTO el año 1998 que caracteriza un hormigón por sus parámetros como el módulo de elasticidad, estructuración, espesores, resistencia de la losa de hormigón, coeficiente de fricción de las capas, etc.

Entre los elementos que componen una mezcla de hormigón fresco, el agregado tiene un papel importante, pues hasta aproximadamente el 80 por ciento del volumen total del hormigón consiste en agregado pétreo, además sus características en cuanto a su forma, textura y gradación influyen en la trabajabilidad, acabado, exudación y en la segregación del hormigón fresco y afectan la resistencia, la rigidez, la retracción, la densidad, la permeabilidad y durabilidad del concreto en estado endurecido [5].

Una mezcla de hormigón posee diferentes proporciones de cada material de manera que cumpla con los requisitos de diseño, esto se conoce como dosificación del hormigón. A su vez los áridos se gradúan con diferentes tamaños para permitir una continuidad en la mezcla.

La práctica ha demostrado que existen maneras de optimizar y mejorar las mezclas de hormigón, ésta optimización involucra la adaptación de los recursos disponibles para cumplir con diversos criterios de ingeniería, operaciones de construcción y necesidades económicas (Shilstone, 1990) [1]. Además, desde el punto de vista económico, el agregado, después del agua, es uno de los materiales más económicos, por el contrario, el cemento puede alcanzar el 60 por ciento del coste total de los materiales [5].

En la actualidad existen varios métodos de optimización de las mezclas, como el método ACI 211, "18-8", Shilstone, Europack, "CPM" (The Compressible Packing Model) y "TPM" (Theory of Particle of Mixtures), los cuales se basan en la optimización de los agregados y las proporciones de las mezclas.

En el presente Trabajo de Título se analizará la metodología Shilstone, la cual fue propuesta el año 1990 [1] con modificaciones en el año 2002 [2]. Según Shilstone "hay tres principales factores sobre los cuales la dosificación de la mezcla puede ser optimizada para una necesidad dada, con una combinación de características dada. Estos factores son:

- La relación entre el grosor de los dos agregados principales, la fracción gruesa y fina,
- La cantidad de mortero,
- La distribución de las partículas del agregado.

Estos factores se determinan mediante diferentes gráficos y distribuciones adaptados a la disponibilidad local de los agregados, diseñando de esa manera una mezcla de hormigón.

En Chile las dosificaciones de las mezclas de hormigón principalmente se basan en aquella propuesta por el Manual de Carreteras [4]. Uno de los problemas de esta metodología de dosificación es que al basarse en la norma ASTM posee límites que no contribuyen a la optimización, ya que no abordan la graduación de las mezclas [1]. Otro desafío es que al querer aplicar alguna optimización no se cuenta con datos que permitan saber la diferencia entre las propiedades mecánicas y costos, de una mezcla así optimizada con una corriente.

Diversos estudios como los realizados por Polat [6] y Bhattacharya [7] han demostrado que modificar la distribución y relación de los elementos de la mezcla de hormigón hace que el hormigón endurecido también se vea afectado, lo cual finalmente se ve reflejado en los parámetros de diseño.

Dado que en Chile el diseño de los pavimentos de hormigón se basa en el Manual De Carreteras (AASHTO 98), se busca identificar los parámetros que influyen en éste, y que se ven afectados al mejorar las mezclas mediante la optimización Shilstone. Para llevar a cabo esto, se aplicará la metodología de propuesta por Shilstone a una mezcla compuesta por materiales de la V región, y se analizará en conjunto con una mezcla común usada en la misma zona, ambas serán sometidas a ensayos en laboratorio en estado fresco y utilizadas para construir probetas de hormigón, las cuales también serán sometidas a ensayos en laboratorio, ésta vez en estado endurecido.

Una vez realizados los ensayos en estado fresco y endurecido se compararán sus resultados y se realizará un análisis del efecto de la optimización Shilstone en el diseño, identificando las posibles diferencias y beneficios respectivamente.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar los beneficios en las propiedades mecánicas que afectan el diseño de los pavimentos de hormigón construidos con mezclas optimizadas mediante la metodología Shilstone.

1.2.2 Objetivos específicos

- Describir el método de optimización de mezcla de hormigón presentado por Shilstone
- Diseñar una mezcla de hormigón basada en el método Shilstone para realizar una muestra de pavimentos.
- Realizar ensayos en laboratorio a la mezcla optimizada por la metodología Shilstone y a una mezcla típica de la Quinta Región.
- Realizar un análisis comparativo entre la muestra de pavimentos basadas en el método Shilstone y las utilizadas actualmente en la Quinta Región
- Diseñar un pavimento de Hormigón e identificar las propiedades afectadas al optimizar la mezcla de hormigón fresco.

1.3. Alcances

Los materiales que componen las mezclas corresponden a los utilizados actualmente en la Quinta Región. Particularmente en la obra de pavimentación de hormigón del Acceso a Valparaíso.

La dosificación de la mezcla del pavimento de hormigón a comparar será la que se describe en el Volumen 8 del Manual de Carreteras [4].

Para los ensayos de laboratorio se realizará una muestra de la mezcla de pavimentos optimizados mediante el método Shilstone y una muestra con mezcla proveniente de una planta mezcladora de la Quinta Región.

El diseño estructural del pavimento de hormigón se realizará de acuerdo al Volumen 3 del Manual de Carreteras [3].

1.4. Metodología de trabajo

En primer lugar, se dará a conocer la bibliografía necesaria en la cual se basa la metodología, esto incluye la descripción de los pavimentos rígidos, de la mezcla de hormigón y de los materiales involucrados, junto con sus propiedades, características y normativa aplicada. También se describirá la manera en que se puede optimizar una mezcla con los métodos existentes en la actualidad.

En segundo lugar, se realizará el diseño del pavimento que entregará los requisitos que debe poseer el pavimento a construir, además de los parámetros a evaluar que permitirán realizar la dosificación de la mezcla. Junto con ello se describirán los factores que influyen en el diseño de los pavimentos.

En tercer lugar, se describirá la metodología de optimización de la mezcla, presentada por James M. Shilstone el año 1990, en el documento "Concrete Mixture Optimization" [1] y el año 2002 en "Performance-Based Concrete Mixtures and Specifications for Today" [2]. Además, se realizará una caracterización de los materiales utilizados para el diseño de la mezcla y el proporcionamiento de los materiales requeridos. En el mismo capítulo se analizarán ambas mezclas, identificando el grado de optimización a través de las herramientas del método Shilstone.

Posteriormente, en laboratorio se realizará la construcción de probetas de hormigón con ambas mezclas y serán sometidas a diferentes ensayos de manera que se pueda evaluar el comportamiento mecánico como la compresión y flexotracción, y que permita identificar los beneficios y efectos en los parámetros que afectan el diseño de los pavimentos de hormigón.

Finalmente se realizará un análisis que permita observar el efecto de la optimización en los pavimentos de hormigón, utilizando los resultados de los ensayos junto con el diseño previo.

En la figura 1.1 se describe la metodología de desarrollo de trabajo de título, la cual permite realizar el presente informe.

Metodología de Desarrollo de Trabajo de Título.

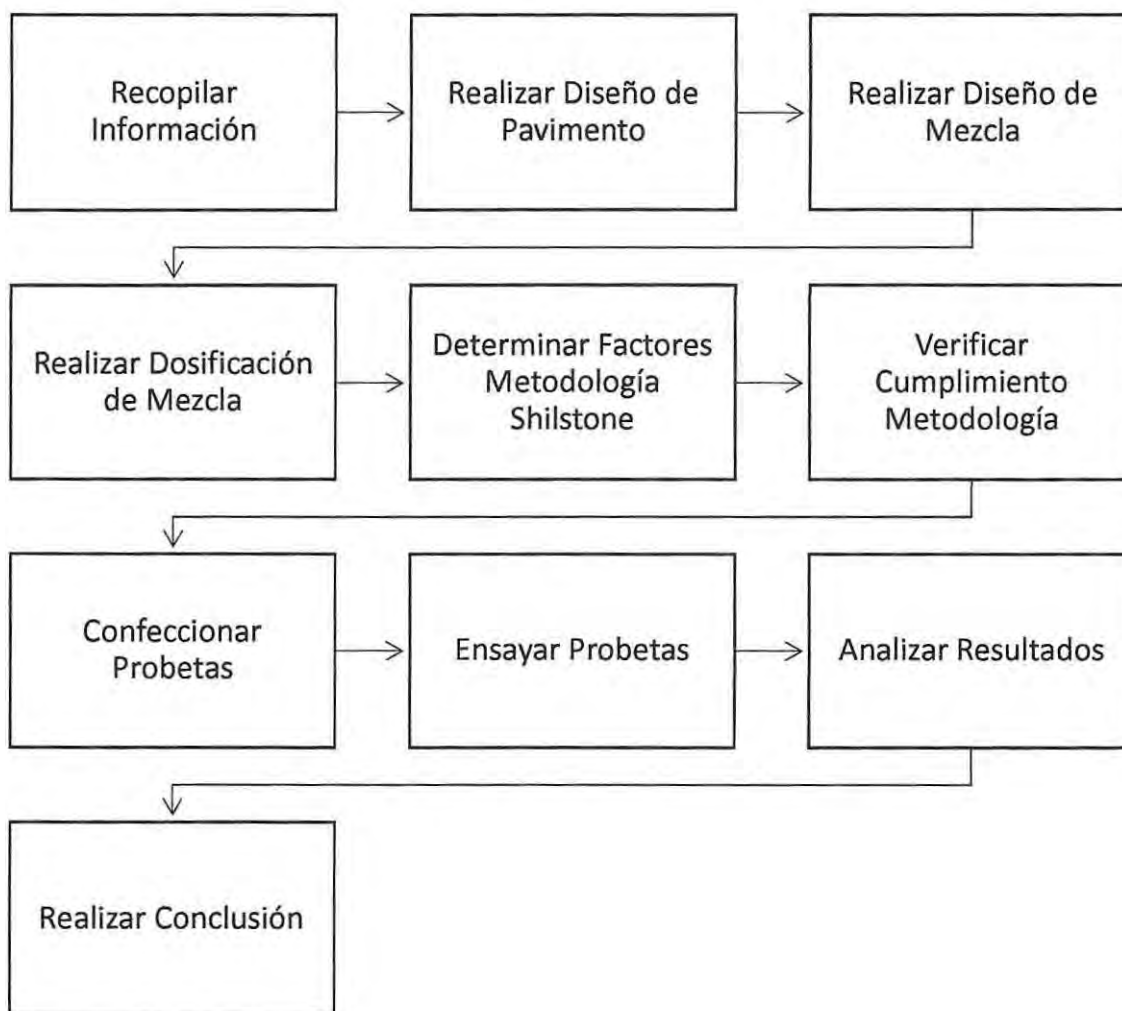


Figura 1.1 - Metodología de Desarrollo de Trabajo de Título

2. Marco Teórico

El pavimento tiene por objetivo dotar al camino de un sistema estructuralmente resistente a las sollicitaciones que impone el tránsito, proporcionando una superficie que permita una circulación cómoda y segura a la velocidad especificada, bajo las variadas condiciones climáticas y por un período determinado [3]. Existen dos tipos de pavimentos; los pavimentos rígidos y flexibles, los cuales se diferencian principalmente en los costos de operación y mantenimiento, los materiales utilizados, tipos y cantidad de capas bases, duración, y manera de distribuir las sollicitaciones.

2.1. Pavimentos Rígidos

Los pavimentos rígidos son pavimentos que utilizan una capa de hormigón simple o armada como superficie de rodado para circulación vehicular, la que se encuentra apoyada directamente sobre una subbase granular como se muestra en la figura 2.1. Debido al comportamiento del hormigón el cual sufre deformaciones, es necesario dimensionarlo en secciones de largos máximo denominadas "losas de hormigón", las que se distribuyen a lo largo del pavimento y son unidas mediante juntas de pavimento, que permiten controlar las deformaciones y tensiones [3].

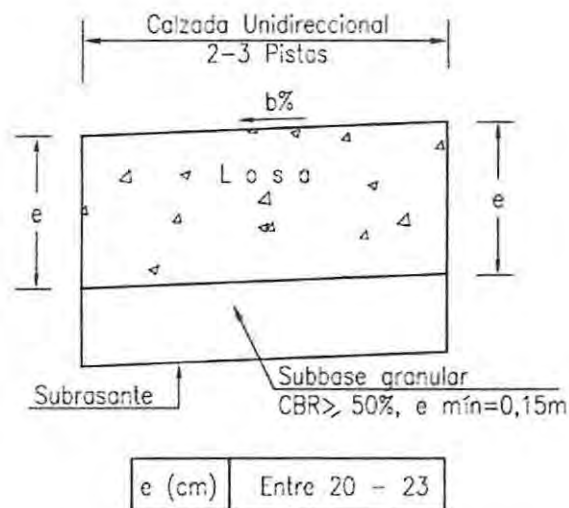


Figura 2.1 - Estructura de un pavimento rígido

Fuente: Manual de Carreteras [16], lámina 4.201.001

Uno de los beneficios de los pavimentos del hormigón es que al tener una rigidez mayor que el material de apoyo de las bases granulares que lo soportan, la capacidad de carga del pavimento

completo está definida principalmente por la capacidad que posee la losa para deformarse y de soportar estas deformaciones repetitivas al paso de los vehículos. Además, el dimensionamiento de la losa en secciones permite una buena repartición de las cargas de peso propio y las solicitaciones de los vehículos que sobre ellas circulan, obteniendo así presiones de contacto (entre el hormigón y las bases) que corresponden a pequeñas fracciones de la carga superficial total [3]. La figura 2.2 muestra la distribución de las cargas en los pavimentos rígidos.

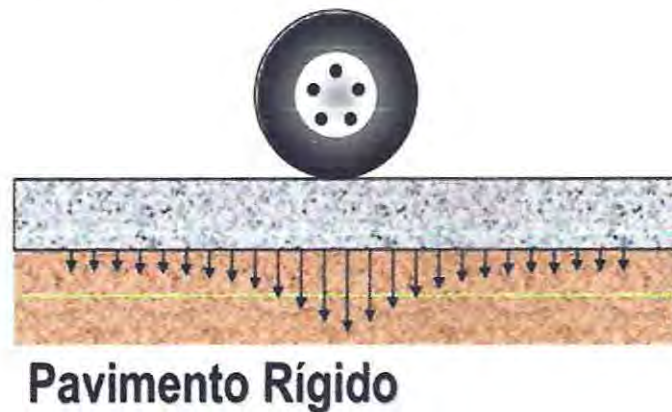


Figura 2.2 Distribución de cargas de pavimentos rígidos.

Fuente: Universidad técnica de Valencia

Existen varios tipos de pavimentos de hormigón los cuales difieren del tipo de junta, de material o de refuerzo, y son:

- Pavimentos de hormigón simple con juntas espaciadas:
 - Sin elementos de traspaso de carga
 - Con elementos de traspaso de carga
- Pavimentos de hormigón con malla de refuerzo, elementos de traspaso de cargas y juntas espaciadas
- Pavimentos de hormigón armado en una o dos direcciones
- Pavimentos de hormigón armado postensado.

El diseño de los pavimentos sin armaduras con o sin barras de traspaso de cargas está basado en el método AASHTO con las modificaciones introducidas en el suplemento publicado el año 1998, las cuales se incluyen en el Manual de Carreteras, volumen III [3]. El procedimiento es un método empírico (mecanicista), el cual además de las consideraciones principales del diseño, incluye los efectos de las tensiones de las cargas de borde y la temperatura y la verificación de las juntas transversales, las barras de traspaso de cargas y el agrietamiento de la losa en caso de no llevar

barras. El propósito principal de éste método es obtener los distintos espesores de cada capa que conforma la estructura de pavimento rígido.

Para determinar el espesor de una losa los parámetros necesarios son los siguientes:

- Serviciabilidad
- Ejes Equivalentes Solicitantes
- Confiabilidad
- Módulo de Reacción de la Subrasante
- Resistencia a la Flexotracción
- Módulo de Elasticidad y Coeficiente de fricción de la Base
- Tipo de Berma
- Temperatura y Precipitaciones
- Estructuración
- Barras de Traspaso de Cargas
- Tipo de Juntas

2.1.1 Capas que componen los Pavimentos Rígidos:

2.1.1.1 Losa de hormigón

La losa de hormigón es la capa superior del pavimento y la que posee mayor rigidez. Corresponde al estado endurecido de la mezcla previa compuesta por la pasta y los áridos. Sus propiedades dependen de los elementos que le componen y de su característica en estado fresco y endurecido. Posee diferentes propiedades como: resistencia a la flexotracción, compresión, corte, aplastamiento, abrasión, etc., además del coeficiente de dilatación térmica, módulo de Poisson, retracción, rugosidad, entre otros.

Para el análisis son de interés la resistencia a la flexocompresión y el módulo de elasticidad, las cuales junto al espesor del hormigón condicionan la capacidad resistente del pavimento a absorber las tensiones que se producen en las losas debidas a las deformaciones del hormigón y de las cargas del tránsito.

2.1.1.2 Subbase granular

La subbase granular es la capa que está justo bajo la losa de hormigón, y funciona como apoyo de ésta. Está compuesta por material del tipo grava arenosa, revuelta homogéneamente y libre de materiales perjudiciales como materiales vegetales, grumos o terrones de arcilla.

Dado que la capa de hormigón es un elemento rígido, para las bases se prefieren bases más flexibles que mediante su capacidad de deformación permitan un mayor apoyo y estabilidad lo que mejora la serviciabilidad y vida útil.

Las bases granulares se caracterizan a través de diferentes parámetros como el módulo de elasticidad, coeficiente de fricción con la losa, granulometría, CBR, entre otros.

2.1.1.3 Subrasante

La subrasante corresponde a la capa de apoyo de toda la estructura del pavimento.

Una de las maneras de caracterizar la capacidad de soporte del suelo que compone la capa Subrasante es mediante la utilización del parámetro k (MPa/m), definido como el módulo de reacción de la Subrasante.

Este parámetro mide las condiciones que existen o existirán en la superficie de la subrasante sobre la que se construirá la base y el pavimento de hormigón; representa las condiciones de la subrasante, sin incluir la base que se considera como una capa estructural que influye en la determinación del espesor de las losas de pavimento [3].

El valor del módulo de reacción de la subrasante puede obtenerse al conocer el tipo de suelo (áridos gruesos o finos), a través de correlaciones con el CBR o mediante ensayos con placa de carga.

2.2. Mezcla de hormigón

Corresponde a hormigón fresco el cual se encuentra en estado plástico, que además puede ser manipulado, transportado, colocado y compactado sin afectar su proceso de fraguado y endurecimiento. Al igual que en su estado endurecido posee propiedades que determinan su calidad y comportamiento.

2.2.1 Propiedades del hormigón fresco

2.2.1.1 Trabajabilidad

La trabajabilidad (o docilidad) es la capacidad que tiene el hormigón fresco que se manifiesta por la facilidad para ser transportado, colocado y compactado, sin producir segregación. Se determina mediante el ensayo de cono de Abrams, especificado en el numeral 8.402.7 del Manual de Carreteras, Volumen VIII [4].

Es una propiedad que no sólo depende las características intrínsecas del hormigón, sino también de la naturaleza de su aplicación

De acuerdo a Kosmatka [8], los factores que influyen en la trabajabilidad del hormigón son:

- 1) El método y la duración del transporte
- 2) Cantidad y características de los materiales cementantes
- 3) Consistencia del concreto
- 4) Tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos
- 5) Aire incluido
- 6) Cantidad de agua
- 7) Temperatura del concreto y del aire
- 8) Aditivos

La propiedad de la trabajabilidad está relacionada con otras propiedades del hormigón como la segregación, exudación y consistencia.

De acuerdo a Bascoy [9], la trabajabilidad en lo operativo como aptitud de colocación, tiene las siguientes propiedades:

- 1) Facilidad de ser mezclado eliminando la fase gaseosa indeseable de su masa (mezclabilidad)
- 2) Aptitud para ser transportado con los medios disponibles en obra (transportabilidad)
- 3) Aptitud para ser bombeado con el sistema de bombeo elegido (bombeabilidad)
- 4) Facilidad de ser colocado llenando perfectamente los moldes, especialmente en sus esquinas, rodeando y envolviendo correctamente a las armaduras (moldeabilidad)
- 5) Capacidad para ser razonablemente compactado utilizando los medios disponibles (compactabilidad)
- 6) Aptitud para ser terminado superficialmente (terminabilidad)

2.2.1.2 Cohesión

Es una propiedad tecnológica del hormigón fresco dependiente de la cohesividad y la plasticidad del hormigón, las cuales son las encargadas de que la pasta de cemento se mantenga unida y pueda deformarse sin perder continuidad. Dado que una mezcla que tiene escasa cohesividad pierde fácilmente su homogeneidad, se dice que estas propiedades están directamente relacionadas.

La distribución homogénea de los materiales constituyentes en el hormigón, se llama uniformidad, la cual se determina de acuerdo a la norma chilena 1789 [17], ésta propiedad se muestra en la figura 2.3.

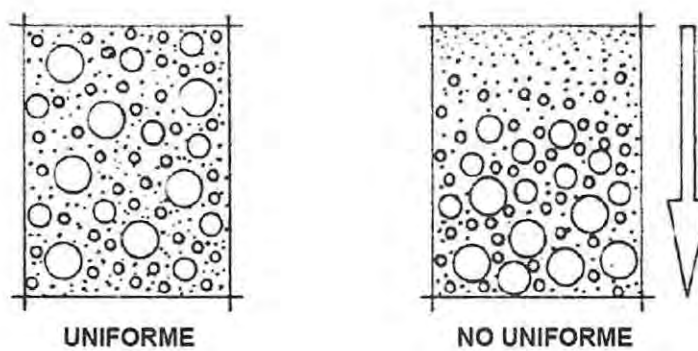


Figura 2.3 Uniformidad de las mezclas a nivel microscópico

Fuente: Bascoy y Fornasier, 2012 [9]

2.2.1.3 Segregación

Consiste en la separación de los ingredientes que constituyen la mezcla de hormigón, de modo que la distribución de tamaños de las partículas se ve alterada, afectando su distribución y homogeneidad. Es un fenómeno que se produce en estado fresco y tiene consecuencia a lo largo de toda la vida del hormigón. La figura 2.4 muestra gráficamente la tendencia de las mezclas con y sin segregación.

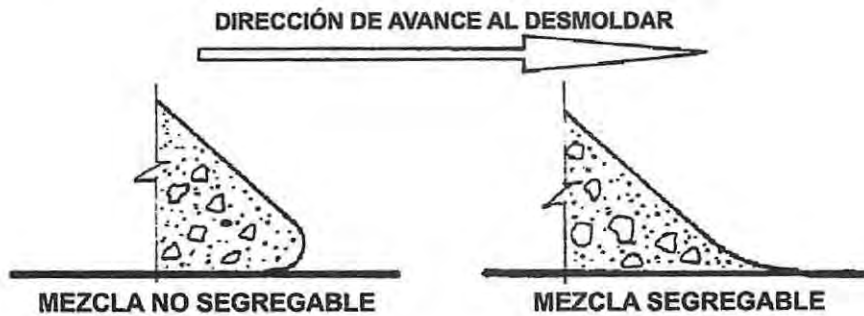


Figura 2.4 - Examen cualitativo de tendencia a la segregación por ensayos de consistencia [9]

Factores que influyen en la segregación del hormigón [9]:

- A. Relativos a las propiedades de los materiales constituyentes del hormigón:
 - 1) Granulometría de los agregados
 - 2) Densidad relativa de los agregados
 - 3) Finura del cemento utilizado
- B. Relativo a la composición de la mezcla (dosificación)
 - 4) Cantidad absoluta y consistencia de la pasta
 - 5) Cantidades relativas de pastas y agregados
 - 6) Cantidad absoluta de cemento
 - 7) Adiciones minerales
 - 8) Inclusión intencional de aire
 - 9) Aditivos químicos
- C. Relativo a las condiciones de puesta en obra del hormigón
 - 10) Condiciones de transporte
 - 11) Condiciones de la colocación
 - 12) Condiciones de la compactación

2.2.1.4 Exudación

Es un fenómeno similar a la segregación, incluso se puede considerar parte del mismo. Consiste en la separación de una parte del agua de la mezcla, la cual asciende hacia la superficie del hormigón recién colocado y compactado, causado por el asentamiento de las partículas sólidas, como se muestra en la figura 2.5.

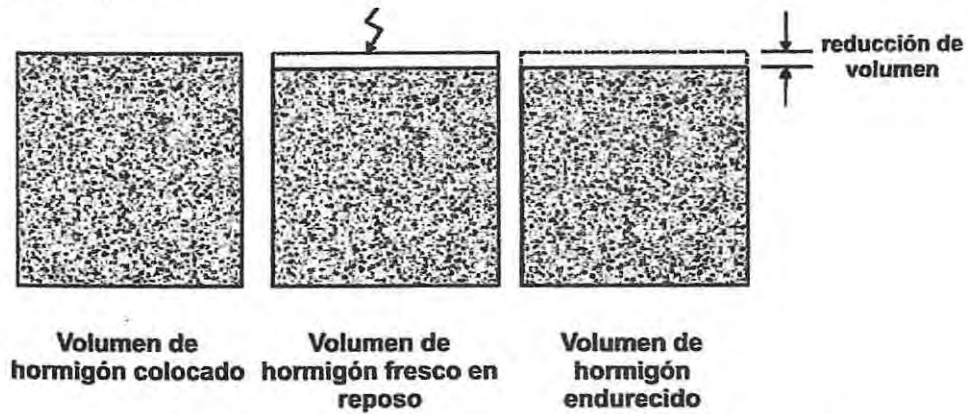


Figura 2.5 - Modificación del volumen del hormigón durante la exudación [10]

Al igual que la segregación este fenómeno se produce por las diferencias en las densidades de los materiales de las partículas. Aunque una cantidad de exudación es útil para las operaciones de terminación o para reducir fisuras por retracción plástica, en exceso afecta la uniformidad del hormigón y sus propiedades mecánicas.

La figura 2.6 muestra el asentamiento producido por una misma mezcla medido en losas de diferentes espesores.

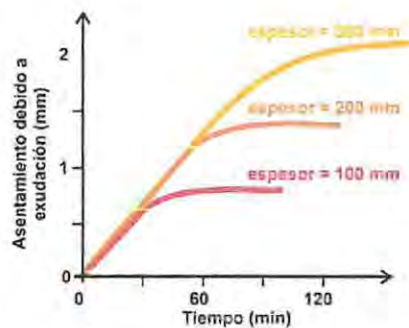


Figura 2.6 Exudación y asentamiento plástico de una mezcla de hormigón colocada sobre losas de diferentes espesores [11]

2.3. Componentes de una mezcla de hormigón

La mezcla de hormigón está compuesta por la pasta de cemento (agua y cemento), los agregados y los aditivos. En ésta sección se describirán cada uno de los componentes principales con sus respectivas propiedades.

Las mezclas de hormigón están compuestas de la siguiente manera:



Figura 2.7 Mapa Conceptual de los Componentes de una Mezcla de Hormigón

2.3.1 Cemento

El cemento es uno de los principales compuestos del hormigón. Está regido por la norma chilena Nch148 of. 1968 [13] "Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales", la cual lo define como "un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire". Además, debe cumplir con lo estipulado en el punto 6.2 de la norma Nch170 [12], "Hormigón – Requisitos generales".

Está compuesto por:

CLINQUER + YESO + ADICIONES

Donde:

- Clínquer: Es el producto que está constituido principalmente por, silicatos cálcicos. Se obtiene por calentamiento hasta una temperatura que no puede ser inferior a la temperatura

de fusión incipiente de una mezcla homogénea finamente molida en proporciones adecuadas, formada principalmente por óxidos de calcio (CaO) y silicio (SiO₂) y por óxidos de aluminio (Al₂O₃) y hierro (Fe₂O₃) en proporciones menores.

- Yeso : material que se adiciona en cantidades pequeñas para regularizar el tiempo de fraguado.
- Adiciones: corresponde principalmente a puzolanas y escorias
 - Puzolana: material silíceo-aluminoso que, aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando está finamente dividido y en presencia de agua, por reacción química con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente.
 - Escorias: corresponde a la escoria granulada de alto horno, y es el producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento de mineral de hierro en un alto horno. Este producto tiene como constituyentes principales silicatos y sílico-aluminatos de calcio y su composición química es tal que cumple con el siguiente requisito:
 -

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1$$

Ecuación 2.1

De acuerdo a la norma 148 of. 1968 [13], el cemento se clasifica en:

- Cementos Portland: cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado
- Cementos Siderúrgicos: De acuerdo a la dosis de escoria que posee el cemento se dividen en:
 - Cemento Portland Siderúrgico: Cemento que en su composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado
 - Cemento Siderúrgico: Cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción comprendida entre el 30% y el 75% del producto terminado.
- Cementos Puzolánicos: De acuerdo a la dosis de puzolana que posee el cemento se dividen en:
 - Cemento Portland Puzolánico: corresponde al cemento en la cual su composición de puzolana no es superior al 30% en peso del producto terminado.

- Cemento Puzolánico: cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción comprendida entre el 30% y el 50% en peso del producto terminado.
- Cementos con agregado tipo A: De acuerdo a la dosis de agregado tipo A que posee el cemento se dividen en:
 - Cemento Portland con agregado tipo A: cemento del cual en su composición entrará agregado tipo A, en una proporción no superior al 30% del peso terminado.
 - Cemento con agregado tipo A: cemento que en su composición entrará agregado tipo A en una proporción comprendida entre el 30% y el 50% del producto terminado.

De acuerdo a la Nch. 148 of. 1968 [13], los porcentajes de cada compuesto químico para los cementos ya definidos son los siguientes:

Tabla 2.1 Requisitos químicos para los cementos

	Cemento Portland	Cementos siderúrgicos		Cementos puzolánicos		Cementos con agregado tipo A	
		Portland siderúrgico	Siderúrgico	Portland puzolánico	Puzolánico	Portland con agregado tipo A	Con agregado tipo A
Pérdida con calcinación máxima (%)	3,0	5,0	5,0	4,0	5,0	7,0	9,0
Residuo insoluble máximo (%)	1,5	3,0	4,0	30,0	50,0	21,0	35,0
Contenido de SO_3 máximo (%)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Contenido de MgO máximo (%)	5,0	-	-	-	-	-	-
Contenido de Mn_2O_3 máximo (%)	-	2,0	2,0	-	-	-	-

[13]

Las propiedades físicas y mecánicas del cemento son:

1. Expansión en autoclave: la cual debe ser menor al 1% y se determinará de acuerdo a la Nch157 [19].
2. Tiempo de fraguado: se determina de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2.2 Requisitos físicos mecánicos de los cementos

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	Inicial mínimo min	Final máximo h	7 días kg/cm ²	28 días kg/cm ²	7 días kg/cm ²	28 días kg/cm ²
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta resistencia	45	10	250	350	45	55

[13]

2.3.2 Áridos:

A mayor contenido de vacíos, mayor es la cantidad de pasta necesaria para llenarlos [14] ese es un motivo por el que los áridos tienen un papel importante en el hormigón, ya sea en estado fresco o endurecido. Los áridos poseen varias características que de una u otra manera afectan las propiedades del hormigón, éstas son su forma y textura, gradación, absorción, minerología, resistencia y módulo de elasticidad, tamaño máximo, peso específico, resistencia al ataque de sulfatos y dureza.

En Chile, la norma que define los requisitos para los áridos que se utilizarán en hormigón es la Nch163of79 [15] "áridos para morteros y hormigones – requisitos generales".

2.3.2.1 Clasificación de los áridos

Los áridos de acuerdo a la Norma Chilena Nch163of79 [15], se clasifican en:

- Arenas (áridos finos): áridos que pasan por el tamiz de abertura nominal de 5mm (correspondiente a la malla N°4) y es retenido por el tamiz de 0,080mm (correspondiente a la malla N°200).
- Gravas (áridos gruesos): áridos que son retenidos en el tamiz de abertura nominal de 5mm (correspondiente a la malla N°4), éstos pueden ser:
 - Gravas: retenidos en el tamiz ¾"
 - Gravillas: que pasa por el tamiz ¾"

Forma o figura: La forma de los áridos está relacionada a diferentes características: esfericidad, forma de cada partícula, angularidad y redondez [16].

La forma de las partículas puede ser clasificada de acuerdo a las siguientes descripciones:

Esfericidad y forma: esférica, cúbica, plana o elongada.

Angularidad y redondez: muy angular, angular, subangular, subredondeada, redondeada, bien redondeada.

La figura muestra ejemplos de partículas con las características mencionadas

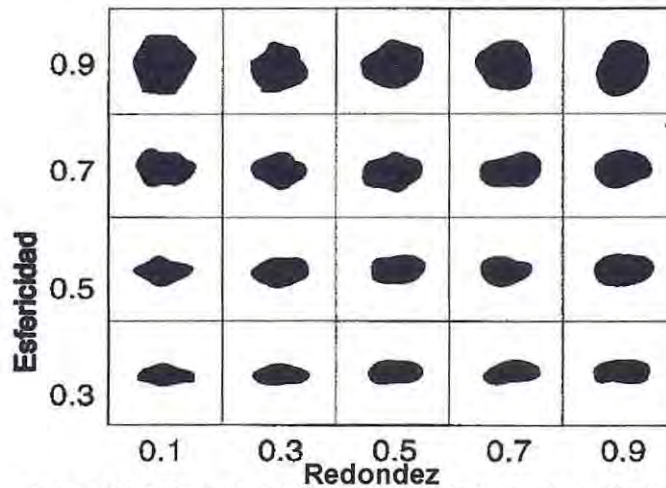


Figura 2.8 Gráfico de evaluación visual de forma de partículas [5].

las formas de las partículas del agregado influyen en la demanda de pasta, en características de la colocación tales como la trabajabilidad y facilidad de bombeo, en la resistencia y en el costo.

2.3.2.2 Efecto de la forma en el hormigón fresco

La forma de las partículas afecta la trabajabilidad y colocación del hormigón en estado fresco. Dentro de la clasificación de los áridos por su forma, las partículas con una superficie específica menor como las de forma cúbica o redondeada requieren de menos pasta de cemento para alcanzar la misma trabajabilidad que una mezcla de hormigón producida con agregados de mayor superficie específica como aquellos que contienen partículas elongadas y aplanadas [1]. Además, las partículas aplanadas, alargadas, angulares y rugosas al acomodarse tienen un alto contenido de vacíos, que hacen que la mezcla requiera de más arena para proporcionar un hormigón manejable. Cuando esto sucede la finura de la mezcla de agregados es mayor, es decir, que tienen una superficie específica mayor, y por ende el requerimiento de la pasta incrementa [20].

2.4. Optimización de las mezclas

La optimización del hormigón es un conjunto de procedimientos utilizado para hacer la mezcla lo más efectivo posible, esto involucra la adaptación de los recursos disponibles para cumplir con los diversos criterios de ingeniería. Estos criterios incluyen entre otros la resistencia, durabilidad, trabajabilidad, costos (materiales, transporte, colocación y tiempo), disponibilidad de los recursos, apariencia, operaciones constructivas y requerimientos de uso.

Cuando las mezclas son optimizadas en una base cuantitativa, la productividad de construcción mejora, la durabilidad incrementa y los costos de los materiales y construcción se reduce [2].

El proceso de optimización de una mezcla de hormigón depende de muchas variables que permitan hacer el sistema lo más efectivo posible, incluso a veces es una tarea muy compleja que puede requerir el uso de una base de conocimiento experto y programas informáticos [21].

Los métodos de optimización pueden ser teóricos o empíricos, y están enfocados en las proporciones generales de la mezcla o en algún elemento de la mezcla en particular. Por ejemplo, existen métodos de optimización de la densidad de compactación, o métodos de optimización de agregados. También hay métodos más específicos de optimización que pueden incluir la forma, textura y graduación de los áridos.

Cuando se busca optimizar algún elemento de la mezcla en particular se trata de minimizar la cantidad de aquellos componentes más caros del hormigón (en este caso el cemento), y de maximizar aquellos que son más económicos, y manteniendo, incluso mejorando, los requerimientos principales del hormigón.

Es por este motivo que unas de las metas principales de optimización del hormigón consisten en la optimización del agregado pétreo, pues éstos son unos de los componentes menos costosos del hormigón y son los más dimensionalmente estables.

Otro factor clave es la optimización de la mezcla en la densidad de compactación, el hecho de tener más volumen de agregado por volumen de hormigón requiere menos pasta. Esto se puede lograr al considerar variables, como la forma, textura, y graduación de los agregados disponibles, así como el rendimiento esperado del hormigón en función de la aplicación (trabajabilidad, consistencia, resistencia y durabilidad).

Aunque la optimización de la densidad de compactación y de los agregados pétreos son métodos muy importantes, no son los únicos, existen otros métodos basados en variables tales como la depresión, viscosidad plástica, segregación, y colocación del hormigón.

Es importante considerar que los métodos de optimización se enfocan en especificaciones del rendimiento del hormigón y no sólo en especificaciones que prescriben las proporciones a utilizar.

A continuación, se presentan los principales métodos de optimización de las mezclas de hormigón:

2.4.1 Método de compactación de densidad

Es un método basado en la compactación de la densidad de los agregados y materiales que componen el cemento. Está desarrollado de manera que mediante ecuaciones se puedan predecir algunas de las propiedades del hormigón fresco y compactado. Entre las propiedades que analiza e incluye este método se encuentran:

- Límite elástico τ_0 , determinado por:

$$\tau_0 = \exp\left(2.537 + \sum_{i=1}^n a_i k_i\right)$$

Ecuación 2.2

Con:

$$k_i = \frac{\phi_i \phi_i^*}{1 - \phi_i / \phi_i^*}$$

Ecuación 2.3

Donde:

ϕ_i : es la densidad de compactación actual de fracción i

ϕ_i^* : es el máximo volumen que las partículas pueden ocupar dada la presencia de otras partículas [22].

a_i : es un factor que depende del tamaño medio de la fracción i, d_i , en mm.

$$a_i = 0.736 - 0.216 \log(d_i)$$

Ecuación 2.4

- El asentamiento "s", determinado por:

$$s = 3000 - 0.347 \left(\frac{\tau_0 - 212}{\rho} \right)$$

Ecuación 2.5

Cuyo valor aplica sólo en asentamientos mayores de 4 pulgadas. ρ es el peso específico del hormigón fresco.

- La viscosidad plástica " μ ", determinada por:

$$\mu = \exp\left(38.38\left(\frac{\phi}{\phi^*} - 0.8385\right)\right)$$

Ecuación 2.6

Este método no es aplicable a mezclas secas o demasiado plásticas y como se mencionó anteriormente a mezclas con asentamiento menores a 4 pulgadas, debido a que el modelo se calibró para esas condiciones [23]. Este método también provee de una ecuación para el cálculo de la resistencia.

2.4.2 Método de ACI 211

El método ACI 211 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete [24], es un método común de diseño de mezclas. Está influenciado por el tamaño máximo de los agregados, la relación deseada de agua cemento y el asentamiento. El método ACI 211 [23] requiere solo dos tamaños de agregados (grueso y fino) para ser usados en la mezcla [23].

Este método puede que no genere una mezcla de concreto óptima, porque al considerar sólo dos tamaños de agregado, se pueden producir bajas densidades de compactación y altas cantidades de cemento que tienen que rellenar los espacios vacíos de la mezcla.

A pesar de ser un método que busca la uniformidad en la granulometría este método de proporción puede que no sea el mejor para arenas manufacturadas porque no es aplicable para agregados con un alto porcentaje de microfinos.

2.4.3 Gráfico de tamaño – distribución de porcentaje retenido “18-8”

El método de optimización 18-8 es una especificación que aprovecha el rendimiento de la graduación de los agregados en la mezcla. La optimización se realiza al intentar producir mezclas uniformes mediante la limitación de las cantidades de fracciones de cada agregado, contrario a lo propuesto por el método ACI 211 [23].

Dentro de las fracciones propuestas se encuentra la limitación del porcentaje retenido en el tamiz N° 30 al tamiz de ½” en un 8 por ciento como mínimo, y el máximo porcentaje retenido en el tamiz N° 100 al tamiz N° 1”, es un 18 por ciento. En otras palabras, control la cantidad máxima y mínima de los agregados combinados para cada tamiz.

Este método fue introducido el año 1990 con el propósito de mejorar el rendimiento, durabilidad y trabajabilidad del hormigón. La tabla 2.3 muestra los valores propuestos por el departamento de transporte de Iowa [18].

Tabla 2.3 Límites de Distribución de Porcentaje Retenido

Tamaño de Tamiz [mm]	% Retenido (límite inferior)	% Retenido (límite superior)
37,5	-	0
25	0	4
19	8	22
16	8	22
9,5	8	22
6,7	8	22
4,75	8	22
2,36	8	22
1,18	8	22
0,6	8	15
0,3	8	15
0,15	2	5
0,075	0	3,5
0	0	0

2.4.4 Método Shilstone

Este es el método de estudio y será descrito con mayor detalle más adelante. El método de optimización propuesto por Shilstone no es un método de dosificación, sino más bien es un método que optimiza la dosificación sin importar el proceso de cómo se obtuvo.

Consiste en la aplicación y correlaciones de tres factores importantes en la distribución y proporción de las mezclas que permiten predecir el comportamiento del hormigón en estado fresco y obtener buenos resultados en estado endurecido. Las herramientas de este método relacionan lo siguiente:

- La relación entre el grosor de los dos agregados principales, la fracción gruesa y fina,
- La cantidad de mortero,
- La distribución de las partículas del agregado.

Estos factores se determinan mediante diferentes gráficos y distribuciones adaptados a la disponibilidad local de los agregados, diseñando de esa manera una mezcla de hormigón.

3 Diseño estructural del pavimento

El método de diseño de pavimentos rígidos utilizado corresponde al método presentado en el Manual de Carreteras [3], basado en el método AASHTO con las modificaciones introducidas en el

"Supplement to the AASHTO Guide for design of Pavement Structures Part II – Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design", publicado en 1998 [26].

El método consiste en determinar los espesores de las capas que resultan más económicas para lograr que el pavimento cumpla las condiciones de resistencia, seguridad, tránsito y duración.

La losa de hormigón que compone los pavimentos rígidos transmite las cargas del tránsito hacia la subrasante en un área más o menos extensa lo que genera tensiones relativamente bajas, a diferencia de los pavimentos flexibles.

3.1 Metodología de diseño

El procedimiento de diseño se presenta en la figura 3.1, este se detalla en el ítem 3.5.1.

La secuencia de cálculo de la verificación del escalonamiento en las juntas se muestra en la figura 3.2 y se detalla en el ítem 3.5.2.

La verificación de carga de esquina se muestra en la figura 3.3 y se detalla en el ítem 3.5.3.

3.1.1 Mapa conceptual de la determinación del espesor de la losa de hormigón en pavimentos.

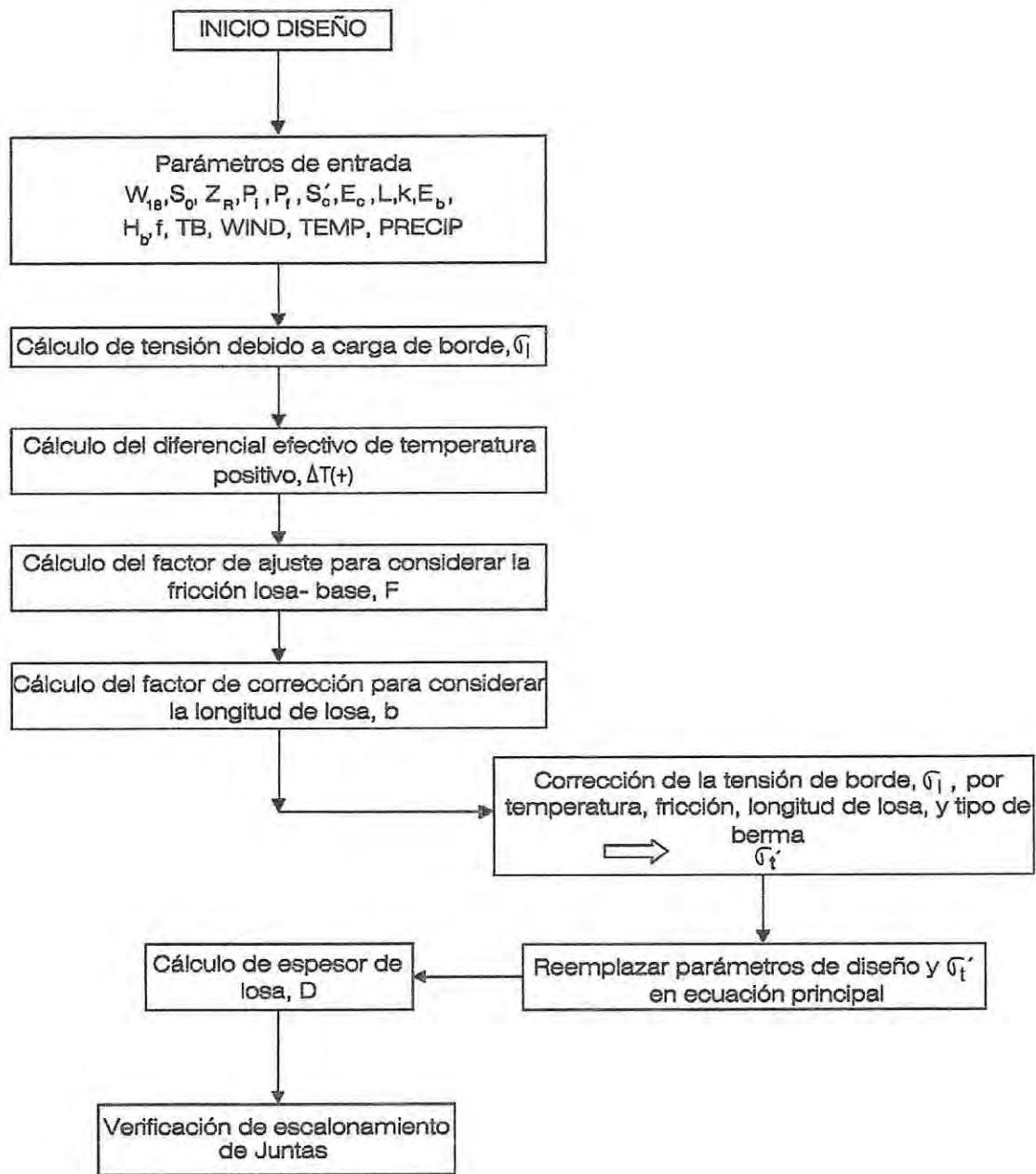


Figura 3.1 Mapa conceptual de la determinación del espesor de la losa de hormigón en pavimentos [3].

3.1.2 Mapa conceptual de la verificación de escalonamiento de juntas

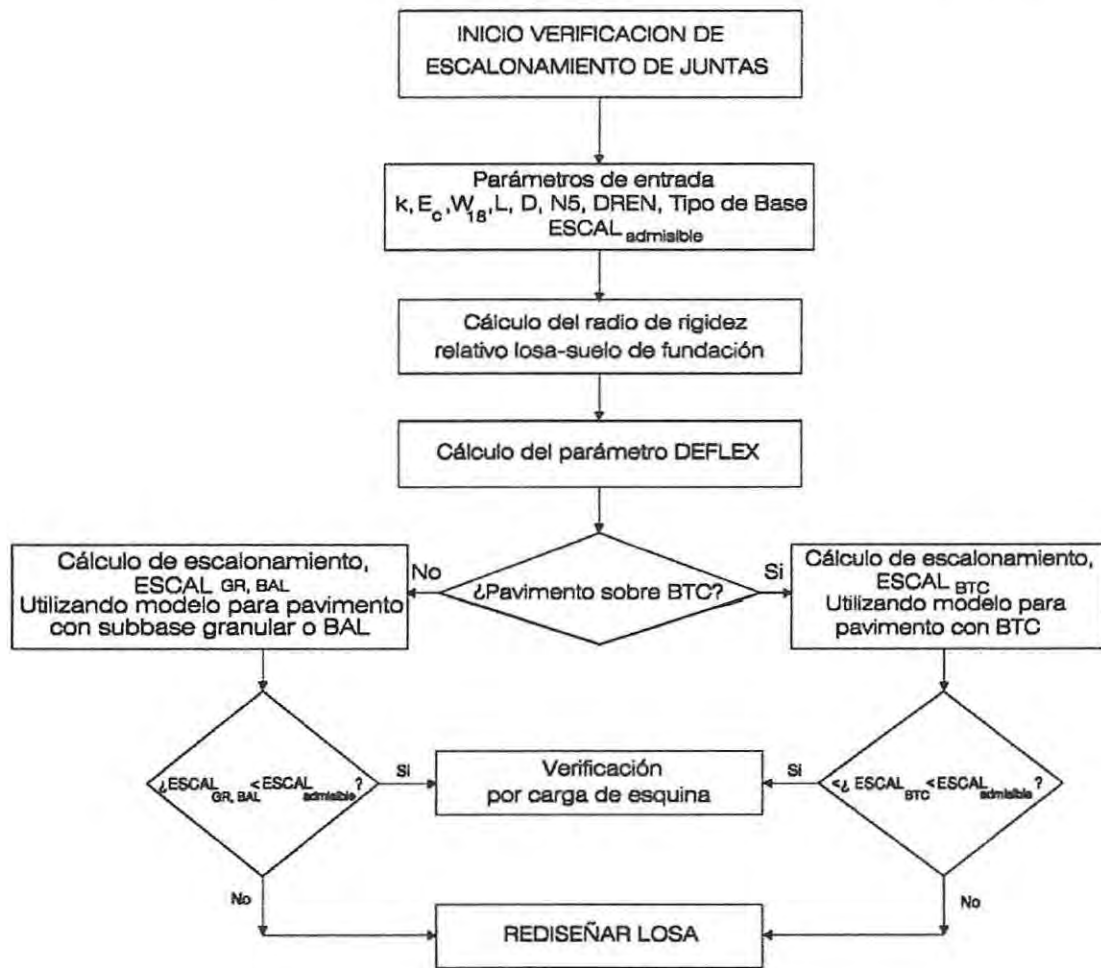


Figura 3.2 Mapa conceptual de la verificación de escalonamiento de juntas [3].

3.1.3 Mapa conceptual metodología de verificación de carga de esquina

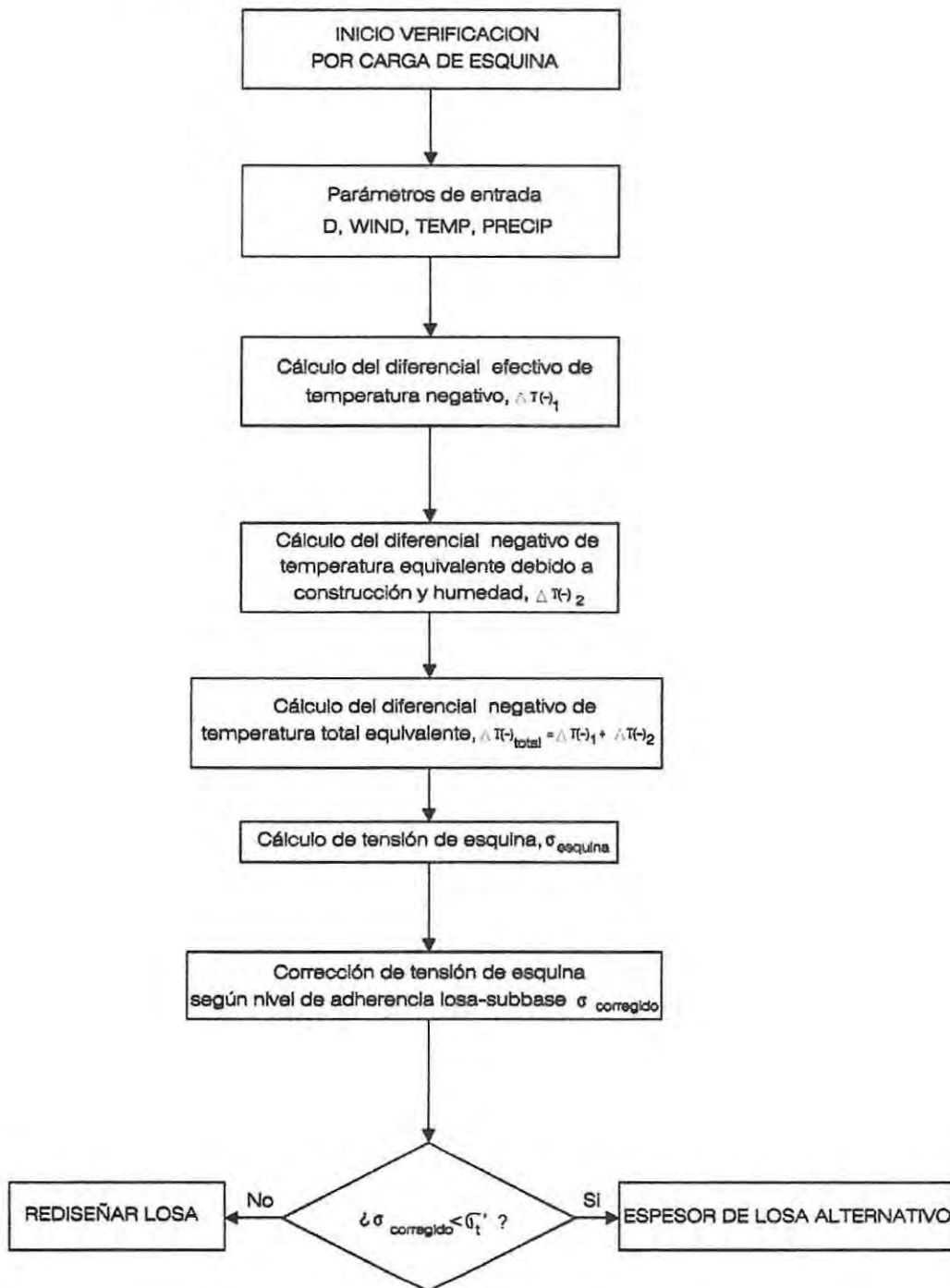


Figura 3.3 Mapa conceptual metodología de verificación de carga de esquina [3].

3.2 Ecuaciones de Diseño

Las ecuaciones de diseño se obtienen del Volumen 3 del Manual de Carreteras [3], y se detallan a continuación:

$$\log W_{18} = \log R + \frac{G}{F} + (5,065 - 0,03295 \cdot p_f^{2,4}) \cdot \left(\log \left(\frac{S'_c}{\sigma'_t} \right) - \log \left(\frac{4,754}{\sigma'_t} \right) \right) + Z_R \cdot S_0$$

Ecuación 3.1

$$\log R = 5,85 - 7,35 \cdot \log \left(\left(\frac{D}{25,4} \right) + 1 \right) - 4,62 \cdot \log \left(\left(\frac{L_1}{4,45} \right) + L_2 \right) + 3,28 \cdot \log(L_2)$$

Ecuación 3.2

$$F = 1,00 + \frac{3,63 \cdot \left(\left(\frac{L_1}{4,45} \right) + L_2 \right)^{5,2}}{\left(\left(\frac{D}{25,4} \right) + 1 \right)^{8,46} \cdot L_2^{3,52}}$$

Ecuación 3.3

$$G = \log \left(\frac{p_i - p_f}{p_i - 1,5} \right)$$

Ecuación 3.4

Donde:

- W_{18} : ejes equivalentes de 80 kN (EE) acumulados durante la vida de diseño.
- Z_R : coeficiente estadístico, asociado al nivel de confianza. (1-R) en una curva de Distribución normal estándar.
- S_0 : desviación estándar de la combinación de errores de predicción de tránsito y de predicción del comportamiento general del pavimento para un nivel de tránsito dado.
- D : espesor de la losa (mm.)
- S'_c : resistencia media a la flexotracción del hormigón a los 28 días, con cargas en los tercios, (MPa).
- L_1 : carga de eje simple, 80 kN.
- L_2 : código de eje simple = 1.
- P_i : índice de serviciabilidad inicial.

- P_f : índice de serviciabilidad final.
- σ'_t : tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, en Mpa, considerando efecto de temperatura (ecuación 3.12).
- σ_t : tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, en Mpa, considerando efecto de temperatura, en las condiciones de la prueba AASHTO (ecuación 3.18).

3.3 Caracterización de los parámetros de diseño

En el ítem 2.1 se describieron los parámetros relacionados en el diseño de un pavimento de hormigón, a continuación, se incluyen información adicional y sus respectivos cálculos, los cuales determinarán el espesor de la losa de hormigón de diseño.

3.3.2 Ejes equivalentes (EE)

Los ejes equivalentes (EE) son la sollicitación para el cálculo de los espesores de la losa de hormigón, correspondiente al total acumulado de ejes que transitan por la pista de diseño en el periodo de diseño adoptado.

El factor de ejes equivalentes corresponde a un factor de un eje patrón único que representa los diferentes tipos de ejes que circulan por un camino. Este eje equivale a un eje simple de rueda doble (E.S.R.D.) de 80kN de peso.

El factor se calcula como el cociente entre el número de ejes patrón requeridos para producir una determinada pérdida de serviciabilidad, respecto del número de ejes de determinada configuración y peso necesarios para producir la misma pérdida de serviciabilidad.

$$EE = \frac{(N^\circ \text{ de ejes de } 80kN \text{ que causan una determinada pérdida de serviciabilidad})}{(N^\circ \text{ de ejes de } X \text{ peso (kN) que causan la misma pérdida de serviciabilidad})}$$

Ecuación 3.5

El factor de ejes equivalentes varía para distintas características del pavimento, donde influyen el espesor de la losa de hormigón y el índice de serviciabilidad inicial y final.

Dado que el cálculo de los ejes equivalentes requiere un proceso engorroso e iterativo, se han realizado simplificaciones que no alteran significativamente el resultado.

El cálculo de los ejes equivalentes no incluye los vehículos de tránsito liviano (como automóviles y camionetas) ya que son muy pequeños, por lo que se desprecian.

El valor utilizado corresponde al obtenido mediante un estudio de tránsito proveído por la consultora.

3.3.2 Serviciabilidad

La serviciabilidad representa la evolución del comportamiento de un pavimento definido por el índice de serviciabilidad. Este índice se calcula a partir de apreciaciones subjetivas realizada por un panel de usuarios, y mide la irregularidad superficial y el agrietamiento.

Dado que un pavimento se diseña para que sirva un determinado lapso de tiempo (vida de diseño), la serviciabilidad se mantiene dentro de ciertos límites, llamados índice de serviciabilidad inicial y final.

El índice de serviciabilidad inicial (p_i) corresponde por lo tanto a la serviciabilidad al momento de puesta en servicio del camino, mientras que la serviciabilidad final (p_f) corresponde al menor valor que puede alcanzar este indicador antes que resulte inconveniente transitar el pavimento.

La Dirección de Vialidad recomienda los siguientes valores para los índices de serviciabilidad:

Tabla 3.1 Índices de Serviciabilidad

Índice de Serviciabilidad Inicial (p_i)	4,5
Índice de Serviciabilidad Final (p_f)	2,0

[3]

Los cuáles serán los valores a utilizar en el diseño del pavimento.

3.3.3 Confiabilidad

La confiabilidad de diseño en el método AASHTO, es la probabilidad que la estructura de un pavimento se comporte de acuerdo a lo esperado durante el periodo de diseño. Este valor representa el coeficiente de seguridad del diseño, cuyo valor está asociado a la variabilidad estadística asociada a cada uno de los parámetros que interfieren en el diseño [3].

El nivel de confianza es la probabilidad que la serviciabilidad real del pavimento sea mayor o igual que la esperada para las condiciones prevalecientes. El factor de confiabilidad del diseño (F_R) se expresa como:

$$\text{Log} F_R = -Z_R \cdot S_0$$

Ecuación 3.6

ó

$$F_R = 10^{-Z_R \cdot S_0}$$

Ecuación 3.7

Donde:

- F_R : factor de confiabilidad
- Z_R : valor asociado al nivel de confianza
- S_0 : desviación normal del error combinado

Z_R es un factor estadístico (de la distribución normal) que depende del nivel de confianza asociada al diseño, mientras que el valor de S_0 (error combinado) incluye las dispersiones inherentes a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento.

La Tabla 3-2 indica los valores que se recomienda utilizar en los diseños de pavimentos rígidos en función de los ejes equivalentes y el coeficiente de variación de los suelos de la subrasante, donde el coeficiente de variación se obtiene del cociente entre la desviación estándar y el promedio de la serie de valores representativos de las características de los suelos [3].

Tabla 3.2 Nivel de confianza y valor de S_0

EE Solicitantes (Millones)	Confiabilidad (%)	Z_R	So en función del coeficiente variación de suelos				
			15%	20%	30%	40%	50%
< 15	60	-0.253	0.35	0.36	0.37	0.39	0.40
15 - 30	60 - 70	- 0.253 - 0.524	0.35	0.36	0.37	0.39	0.40
30 - 50	70 - 75	- 0.524 - 0.674	0.34	0.35	0.36	0.38	0.39
50 - 70	75 - 80	- 0.674 - 0.841	0.32	0.33	0.34	0.37	0.38
70 - 90	80 - 85	- 0.841 - 1.037	0.30	0.31	0.32	0.35	0.36

3.3.4 Módulo de reacción de la subrasante

El módulo de reacción de la subrasante es un parámetro que representa la capacidad de soporte que posee el suelo de apoyo del pavimento, y se expresa en Mpa/m.

Cálculo:

El módulo de reacción de la subrasante se puede calcular mediante correlaciones de acuerdo al tipo de suelo o algún parámetro del suelo. A continuación, se presentan los métodos de cálculo del módulo de reacción:

(1) Cálculo mediante correlaciones para suelos finos:

La siguiente ecuación lineal relaciona el valor de k con el nivel de saturación (S_R) a la que se encuentra el suelo

$$k(MPa/m) = A \cdot S_R + B$$

Ecuación 3.8

Donde "k" es el módulo de reacción de la Subrasante, mientras que A y B son parámetros que se obtienen de la tabla 3.3, y dependen de la clasificación del suelo según AASHTO.

El valor del nivel de saturación (S_R) se obtiene de la siguiente expresión:

$$S_R = \frac{w(\%)}{\frac{1000}{\gamma_d} - \frac{16}{G}}$$

Ecuación 3.9

Donde:

- w : Contenido de humedad, en %.
- γ_d : Peso unitario seco o densidad seca.
- G : Peso específico.

La ecuación para el cálculo de k en suelos finos se obtuvo considerando humedades iguales y superiores al 50%, por lo que, para humedades menores, la extrapolación puede conducir a errores. Otra limitante de esta ecuación es que no es válida para suelos tipo A-6 con humedades de diseño superiores al 85% [3].

Tabla 3.3 Parámetros para el cálculo de k en suelos finos

Clasificación Suelo	A	B
A - 4	- 0,44	55,73
A - 5	- 0,59	70,07
A - 6 (para $S_r < 80\%$)	- 1,11	116,00
A - 6 (para $S_r \geq 80\%$)	$K = 1,76 \cdot 10^8 S_r^{-3,578}$	
A - 7 - 5	- 0,77	86,14
A - 7 - 6	- 0,56	76,56

[3].

(2) Cálculo mediante correlaciones para suelos granulares

Para los suelos granulares, la estimación del módulo de reacción de la subrasante se hace mediante la siguiente tabla:

Tabla 3.4 Rangos de Valores de k Para Suelos Granulares

CLASIFICACION AASHTO	DESCRIPCION	U.S.C. S	DENSIDAD SECA (kg/m^3)	CBR (%)	k (MPa/m)
suelos gruesos					
A-1-a, bien graduado	Grava	GW, GP	2.000-2.250	60 - 80	80 - 120
A-1-a, mal graduado			1.900-2.100	35 - 60	80 - 110
A-1-b	Arena gruesa	SW	1.750-2.100	20 - 40	55 - 110
A-3	Arena fina	SP	1.680- 1.900	15 - 25	40 - 80
Suelos A-2 (granulares con muchos finos)					
A-2-4, grava	Grava limosa	GM	1.100-2.300	40 - 80	80 - 135
A-2-5, grava	Grava limo arenosa				
A-2-4, arenosa	Arena limosa	SM	1.900-2.150	20 - 40	80 - 110
A-2-5, arenosa	Grava areno limosa				
A-2-6, grava	Grava arcillosa	GC	1.900-2.250	20 - 40	55 - 120
A-2-7, grava	Grava areno arcilla				
A-2-6, arenoso	Arena arcillosa	SC	1.680-2.100	10 - 20	40 - 95
A-2-7, arenoso	Arena gravo arcillosa				

[3].

(3) Cálculo del valor de k mediante correlación con el valor de CBR

La siguiente ecuación permite determinar el valor del módulo de reacción de la subrasante:

$$k(\text{MPa/m}) = 69.78 \log_{10} \cdot (\text{CBR}) - 10.16$$

Ecuación 3.10

Debe tenerse en cuenta que esta relación tiene un rango de variación respecto al promedio, el cual es del orden del $\pm 50\%$ [3].

El CBR se determina de acuerdo al vol. 8 del Manual de Carreteras [4]

3.3.5 Resistencia a la flexotracción y módulo de elasticidad del hormigón

Flexotracción

La resistencia a la tracción por flexión o flexotracción del hormigón que se utiliza en el diseño corresponde a la resistencia media obtenida a los 28 días y con cargas de ensayos en los tercios. El valor a asignar a este parámetro dependerá de las posibilidades que existan en la zona para obtener homigones de calidad. Los valores recomendados por el Manual de Carreteras [16] son los siguientes:

Tabla 3.5 Resistencia a la Flexotracción
(promedio 28 días)

Tipo de Vía	Resistencia a la Flexotracción (MPa)
Vías principales y Autopistas	4,8 – 5,4
Vías Colectoras	4,6 – 5,0
Caminos Secundarios	4,2 – 4,8

[3].

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del hormigón es un parámetro que controla la forma de falla a rotura que tendrá la losa y su capacidad a deformarse por carga antes de generar una grieta. Se puede determinar de dos maneras de acuerdo a la recomendación del Manual de Carreteras [3] Volumen III, uno de ellos es utilizar el valor de 29.000MPa o se puede obtener mediante la siguiente expresión en función de la resistencia a la compresión de una probeta cilíndrica:

$$E_c = 4.779,4\sqrt{f}$$

Ecuación 3.11

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad del hormigón (MPa)

f : Resistencia a la compresión cilíndrica (MPa)

3.3.6 Módulo de elasticidad y coeficiente de fricción de la base

La base es la capa de soporte del pavimento por lo que se debe considerar su capacidad mediante el módulo de elasticidad, además en diseño incluye la fuerza de roce entre la capa de la base y la losa a través del coeficiente de fricción. Los valores del módulo de elasticidad y el coeficiente de fricción de la base se obtienen de la siguiente tabla:

Tabla 3.6 Módulos de Elasticidad y Coeficiente de Fricción de la Base

Tipo de Material de Base	Módulo Elasticidad (MPa)	Coeficiente de Fricción		
		Bajo	Medio	Alto
Suelo Fino	20,6 – 275,6	0,5	1,3	2,0
Arena	68,9 – 172,3	0,5	0,8	1,0
Granular	103,4 - 310,1	0,7	1,4	2,0
Lámina Polietileno	-	0,5	0,6	1,0
Arcilla Estabilizada con Cal	137,8 – 482,3	3,0	-	5,3
Base Tratada con Cemento	$(3,45+f_c) \cdot 1000$	8,0	34	63
Base Tratada con Asfalto	2067 – 4134	3,7	5,8	10
Hormigón Pobre sin Compuesto Curado	$(3,45+f_c) \cdot 1000$	> 36		
Hormigón Pobre con Simple o Doble Compuesto Curado.	$(3,45+f_c) \cdot 1000$	3,5	-	4,5

f_c : Resistencia a la compresión cúbica (MPa).

[3].

3.3.7 Factor de ajuste por tipo de berma

El ajuste por tipo de berma indica la condición del borde del pavimento, siendo este libre, de hormigón amarrada o berma libre. Los valores del factor de ajuste se indican en la tabla 3.7:

Tabla 3.7 Factor de Ajuste por Tipo de Berma

Tipo de Berma	Factor TB
Borde libre	1,00
Berma de hormigón amarrada	0,94
Berma de pista ensanchada	0,92

[3]

3.3.8 Temperaturas y precipitaciones

Las temperaturas y precipitaciones fue una de las modificaciones que incluye el método AASHTO 98, lo cual significa que el comportamiento es diferente para cada condición climática. Los parámetros a utilizar son:

- La velocidad anual del viento (nudos)
- Temperatura del aire media anual (C°)
- Precipitación media anual (mm)
- Número de días con precipitación mayor a 5 mm.

Los valores recomendados para éstos parámetros se entregan en la tabla 3-8, los cuales se deben seleccionar dependiendo la localidad de la construcción del pavimento.

Tabla 3.8 Estadísticas Climáticas

UBICACION	ESTACION SINOPTICA	TEMPERATURA MEDIA ANUAL °C	PRECIPITACION MEDIA ANUAL Mm	VEL. VIENTO MEDIA ANUAL NUDOS	DIAS CON PRECIPITACION MAYOR QUE 5 mm
La Serena	La Florida	13,6	83,6	5,9	3
Longotoma	Longotoma	13,5	247,2	1,3	13
Valparaíso	Lago Peñuelas	13,5	649,4	1,3	28
Santiago	Quinta Normal	14,5	320,4	2,8	18
Curicó	General Freire	13,3	658,0	4,4	35
Chillán	Bernardo O'Higgins	12,7	1163,0	5,6	56
Concepción	Carriel Sur	12,4	1087,2	9,1	78
Los Angeles	María Dolores	12,0	1675,0	5,4	78
Temuco	Maquehue	11,2	1278,2	5,2	70
Valdivia	Pichoy	11,0	1874,1	5,0	111
Osorno	Cañal Bajo	10,4	1390,1	6,0	110
Coyhaique	Carlos Ibáñez	8,8	1485,4	6,6	93,5
Punta Arenas	Teniente Vidal	6,3	413,3	14,3	64,2

[3]

3.4 Datos de Entrada

Los parámetros de entrada utilizados, han sido obtenidos del Manual de Carreteras [3], y otros fueron aportados por estudios previos y requeridos de la obra analizada.

3.4.1 Serviciabilidad

Al igual que la gran mayoría de los pavimentos, los valores utilizados son los presentados en la tabla 3.1, cuyos valores son 4,5 para serviciabilidad inicial y 2,0 para serviciabilidad final [3].

3.4.2 Ejes Equivalentes

Los ejes equivalentes utilizados corresponden a 189.000.000 EE. Este valor se obtuvo mediante un estudio previo realizado por la consultora que desarrollo el proyecto inicial utilizando la mezcla optimizada.

3.4.3 Confiabilidad

La confiabilidad de diseño requerida es 80%, por lo que los valores del coeficiente Z_R es:

$$Z_R = -0.841$$

y dado que la solicitud es elevada, la desviación normal del error combinado es menor:

$$S_0(15\%) = 0.30.$$

3.4.4 Módulo de Reacción de la Subrasante

El Módulo de reacción de la subrasante se obtiene de acuerdo a la ecuación 3.10 del punto 3.3.4, el cual utiliza el CBR de la subrasante, cuyo valor es 6% de acuerdo a los antecedentes del diseño proveído para la mezcla optimizada. De esta manera:

$$k \left(\frac{MPa}{m} \right) = 69.78 \cdot \log_{10}(CBR) - 10.16 = 69.78 \cdot \log_{10}(6) - 10.16$$

$$k = 44.14 \left(\frac{MPa}{m} \right)$$

3.4.5 Módulo de Elasticidad y Resistencia a la Flexotracción del Hormigón

Los valores utilizados y requeridos son:

Resistencia a la Flexotracción	:	5.0 [MPa] 90 días
Módulo de Elasticidad Hormigón	:	29000 [MPa]

3.4.6 Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Fricción de la Base

El módulo de elasticidad para la base es un valor exigido para el diseño cuyo valor es 300[MPa].

El coeficiente de fricción utilizado es el valor medio al recomendado, cuyo valor es 1.4 para bases granulares como se observa en la tabla 3.6.

3.4.7 Factor de Ajuste por Tipo de Berma

El coeficiente para bermas de hormigón del tipo pista ensanchada, según la tabla 3.7 obtenida del Manual de Carreteras [3] es 0.92

3.4.8 Temperaturas y Precipitaciones

El pavimento se encuentra ubicado en Valparaíso camino a la Pólvora, por lo que se utiliza los valores de la tabla 3.8:

Temperatura Media Anual	:	13.5 [C°]
Precipitación Media Anual	:	247.2 [mm]
Velocidad Viento Media Anual	:	1.3 [nudos]
Días con Precipitación > 5[mm]	:	28 [días]

3.4.9 Otros parámetros de entrada

Además de los parámetros mencionados, se requería cumplir con los siguientes requisitos:

Largo de Losa	:	175 cm
Barras de transferencia de carga	:	No
Base Granular	:	30 cm

3.5 Determinación del espesor

Una vez obtenidos los datos requeridos de entrada, se procede a obtener el espesor. Este se obtiene mediante cuatro pasos, dos en los que se determina la tensión de carga, la verificación de escalonamiento y la verificación de carga por esquina.

Las ecuaciones obtenidas en el ítem 3.5.1 al ítem 3.5.4 han sido obtenidas del Manual de Carreteras [3], Volumen 3.

3.5.1 Tensión de Tracción Máxima en la Losa con Carga de Borde, Considerando el Efecto de la Temperatura:

a) Ecuaciones:

La tensión de tracción máxima en la losa se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma'_t = \sigma_t \cdot TB \cdot F \cdot \left(1,0 + \left(\frac{5}{9} \right) \cdot b \cdot \Delta T(+)\right) [MPa]$$

Ecuación 3.12

Donde:

σ_t : Tensión de tracción máxima en la losa de hormigón para una condición de carga de borde, en MPa, dada por la ecuación 3.14.

$$\sigma_t = \frac{80012,743}{D^2} \cdot \left[4,227 - 4,547 \cdot \left(\frac{180}{l} \right)^{0,2} - 0,00158 \cdot \left(\frac{E_b \cdot H_b}{k} \right)^{0,5} - 0,0308 \cdot \left(H_b \cdot \left(\frac{E_b}{E_c} \right)^{0,75} \right)^{0,5} \right]$$

Ecuación 3.13

El valor de l se obtiene:

$$l = 5,622 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_c \cdot D^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} [mm]$$

Ecuación 3.14

Donde:

- D : Espesor de losa [mm].
- E_c : Módulo de elasticidad del hormigón [MPa].
- E_b : Módulos de elasticidad de la base [MPa].
- H_b : Espesor de la base [mm].
- k : Módulo de reacción de la subrasante [MPa/m].
- μ : Razón de Poisson para el hormigón, (0,15).

- TB : Factor de ajuste por tipo de berna.
 F : Factor de ajuste por fricción dado por la ecuación 3.15.

$$F = 1.117 - 2.457 \cdot 10^{-7} \cdot D \cdot E_b - 4.549 \cdot 10^{-4} \cdot D + 9.1 \cdot 10^{-5} \cdot E_b - 0.000315 \cdot f$$

Ecuación 3.15

- f : Coeficiente de fricción entre la losa y la base dado por la tabla 3.6.
 b : Factor de ajuste por longitud de losa dado por la ecuación 3.16.

$$\log b = -1.944 + 2.279 \cdot \frac{D}{l} + 91.7 \cdot \frac{L}{l} - 75718996.95 \cdot \frac{D^2}{k \cdot l^4} + \left(\frac{0.731}{l}\right) \cdot \left(\frac{E_b \cdot H_b^{1.5}}{k}\right)^2 - 118.872 \cdot \frac{D^2}{k \cdot l^2} - 8.711 \cdot 10^{10} \cdot \frac{D^3 \cdot L}{k \cdot l^6}$$

Ecuación 3.16

- L : Distancia entre juntas de contracción [m].
 ΔT(+) : Diferencial efectivo de temperatura positivo. Se define como la diferencia Entre la temperatura de la fibra superior e inferior de la losa, en °C, dado por La ecuación 3.17:

$$\Delta T(+) = 12.33 - \frac{2385.715}{D} + 0.707 \cdot WIND + 0.596 \cdot TEMP - 5.924 \cdot 10^{-4} \cdot PERCIP$$

Ecuación 3.17

- WIND : Velocidad media anual del viento [nudos]
 TEMP : Temperatura media anual del ambiente [°C]
 PERCIP : Precipitación media anual [mm]

b) Cálculo:

$$\sigma'_t = 1.047 [MPa]$$

3.5.2 Tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, considerando efecto de temperatura, en las condiciones de prueba AASHO.

a) Ecuaciones:

Esta tensión se determina a través de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_t = \sigma_{I(AASHO)} \cdot F_{AASHO} \cdot \left(1.0 + \left(\frac{5}{9} \right) \cdot b_{AASHO} \cdot \Delta T(+)_AASHO \right)$$

Ecuación 3.18

$$\sigma_{I(AASHO)} = \frac{80012.743}{D^2} \cdot \left[4.125 - \left(\frac{7.286}{D^{0.15}} \right) \right]$$

Ecuación 3.19

Donde:

$$F_{AASHO} = 1.192 - 0.000497 \cdot D$$

Ecuación 3.20

$$\log b_{AASHO} = -1.944 + 0.134 \cdot D^{0.25} - 0.0137 \cdot D^{0.5} + \frac{29.0679}{D^{0.75}} - \frac{30.15}{D} - \frac{546.368}{D^{1.5}}$$

Ecuación 3.21

$$\Delta T(+)_AASHO = 25.308 - \frac{2527.859}{D}$$

Ecuación 3.22

b) Cálculo:

$$\sigma_t = 1.43 [MPa]$$

3.5.3 Verificación de escalonamiento

a) Ecuaciones:

Para la verificación de escalonamiento se utilizan las ecuaciones para pavimentos sobre bases granulares las cuales son las siguientes:

$$ESCAL_{GR,BAL} = W_{18}^{0.461188} \cdot (0.006742 \cdot N5 - 0.125288 \cdot GR - 0.148135 \cdot BAL + DEFLEX^{0.369655} + 0.457194 \cdot DREN - 0.373423)$$

Ecuación 3.23

Donde:

ESCAL _{GR,BAL}	:	Escalonamiento promedio de juntas transversales (mm).
W ₁₈	:	Ejes equivalentes acumulados (millones).
N5	:	Número de vías con precipitación mayos a 5 (mm).
DEFLEX	:	Deflexión de esquina de la losa de acuerdo a ecuación 3.24.
DREN	:	0 si existe dren; 1 en cualquier otro caso.
GR	:	1 si es base granular; 0 en cualquier otro caso.
BAL	:	1 si es base abierta ligada; 0 en cualquier otro caso.

$$DEFLEX = \left(\frac{P}{k \cdot l^2} \right) \cdot \left(1.1 - \frac{0.88 \cdot a \cdot \sqrt{2}}{l} \right)$$

Ecuación 3.24

Donde:

P	:	Carga de rueda, 4086 kg.
a	:	Radio del área de carga, 14.37 cm.
l	:	Radio de rigidez relativa sistema losa fundación, cm. Se obtiene dividiendo por 10 la ecuación 3.14.
k	:	Módulo de reacción de la subrasante [MPa/m].

b) Cálculo:

$$ESCAL_{GR,BAL} = 3.49 < 5$$

Lo que indica que cumple la condición de escalonamiento.

3.5.4 Verificación carga de esquina.

Dado que no se consideran barras de traspaso, se debe realizar la verificación de carga de esquina, lo cual consiste en comparar la tensión producto de una carga en el borde de la losa y la tensión producida por una carga en la esquina.

a) Las ecuaciones son la siguientes:

$$\Delta T(-)_1 = -28.62 + \frac{2377.897}{D} + 0.817 \cdot WIND + 0.227 \cdot TEMP + 2.884 \cdot 10^{-4} \cdot PRECIP$$

Ecuación 3.25

Donde:

- $\Delta T(-)_1$: Diferencial efectivo de la temperatura negativo. Se define como la Diferencia entre la temperatura de la fibra superior e inferior de la losa En °C.
- D : Espesor de la losa [mm].
- WIND : Velocidad media anual del viento [nudos].
- TEMP : Temperatura media anual del ambiente [°C].
- PRECIP : Precipitación media anual [mm].

También se debe determinar el gradiente negativo de temperatura ($\Delta T(-)_2$) equivalente producto de la curvatura por construcción y humedad. El valor se define como:

- 0 a 0.044 [°C/mm] = Para clima húmedo
(precipitación media anual \geq 760 [mm]).
- 0.022 a 0.066 [°C/mm] = Para clima seco
(precipitación media anual $<$ 760 [mm]).

Y por último:

$$\Delta T(-) = \Delta T(-)_1 + \Delta T(-)_2$$

Ecuación 3.26

Con el gradiente de temperatura se obtiene la tensión de esquina del siguiente gráfico:

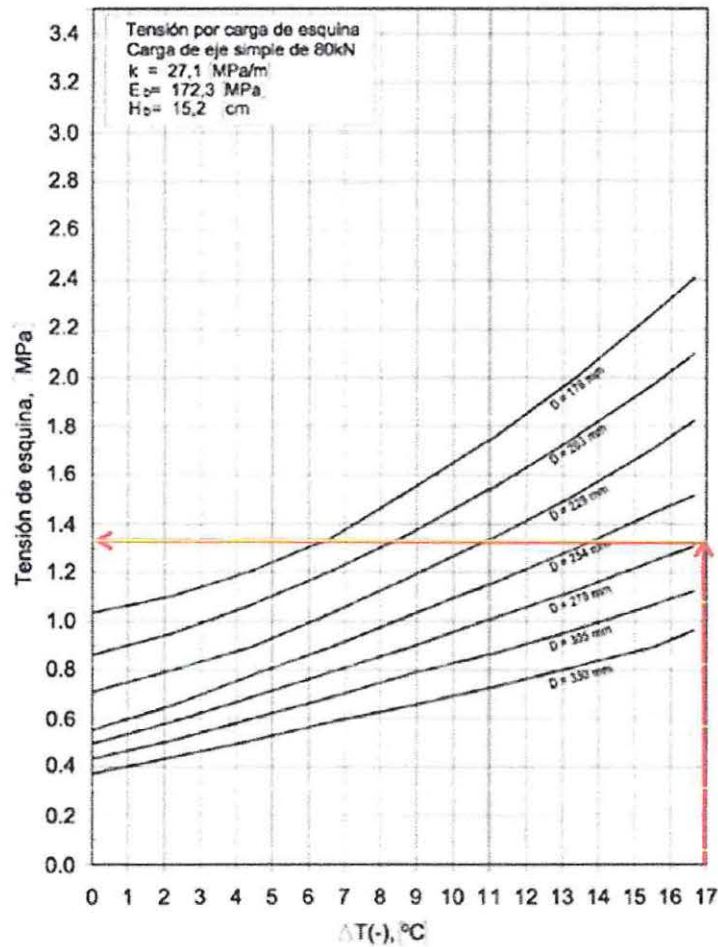


Figura 3.4 Gráfico cálculo tensión de esquina, Manual de Carreteras [3].

b) Cálculos:

$$\sigma_{t,esquina} = 1.33[MPa] < 1.43[MPa] = \sigma_t$$

Lo cual cumple la condición de carga de esquina.

De esta manera se verifica que el diseño del pavimento cumple con todas las condiciones de diseño de acuerdo al Manual de Carreteras [3], Volumen 3.

4 Mezcla optimizada.

4.1 Diseño de la mezcla de hormigón

El diseño de la mezcla de hormigón es un proceso que se aplica a aquellos hormigones que serán optimizados mediante uno de los métodos descritos anteriormente. Consiste en determinar las propiedades deseadas y específicas de la mezcla de hormigón para cada hormigón a construir.

Los siguientes factores se consideran en el diseño de una mezcla:

- Constructividad
- Condiciones de colocación
- Resistencia
- Durabilidad
- Sustentabilidad

Esto significa que cada proyecto posee un determinado diseño de mezcla. Y aunque se necesiten el mismo tipo de hormigón, no se utiliza el mismo diseño de mezcla.

La primera parte del diseño consiste en establecer especificaciones para la mezcla de hormigón. Estas pueden tener dos enfoques:

1. Enfoque prescriptivo: se establecen los materiales requeridos, dosificaciones, y métodos constructivos de manera de obtener un determinado rendimiento
2. Enfoque en el rendimiento: especifica las características deseables y requerimientos funcionales como la resistencia, durabilidad, de manera de especificar los materiales y dosificaciones.

El método utilizado debe ser el apropiado para el sistema constructivo y el uso previsto y el medio ambiente esperado.

En la mayoría de los casos en que se realizan mezclas de hormigón sin optimizar, se utiliza implícitamente un diseño con enfoque prescriptivo, estableciendo las proporciones básicas respaldadas por las normas de manera de determinar un rendimiento esperado.

Para el caso de la optimización de la mezcla de acuerdo a la metodología Shilstone, se utilizará el enfoque en rendimiento, estableciendo parámetros como la resistencia requerida.

Otras etapas del diseño de la mezcla después de establecer las especificaciones iniciales incluyen realizar evaluación económica y de materiales existentes, realizar mezclas de prueba en laboratorio con sus respectivos ensayos, de manera de determinar la mezcla final y evaluarla en terreno para asegurar que cumpla con los requisitos establecidos.

El trabajo en laboratorio puede incluir ensayos como:

- Trabajabilidad: asentamiento, temperatura, contenido de finos, granulometría combinada
- Desarrollo de la resistencia: curva de madurez, resistencia a la compresión y a la flexión.
- Contenido de aire
- Densidad
- Permeabilidad

Es importante destacar que la dosificación del hormigón es una etapa del diseño de la mezcla y no el diseño en sí.

4.1.1 La dosificación de las mezclas de hormigón

La dosificación es el proceso en el que se determinan las proporciones de los elementos que componen el hormigón. El propósito es determinar una mezcla que cumpla con los requisitos de diseño, además de cumplir con factores de constructividad, economía, resistencia, durabilidad y sustentabilidad.

En la mayoría de los casos las dosificaciones poseen las siguientes proporciones:

Cemento	:	9 – 15%
Agua	:	15 – 16%
Agregado fino	:	25 – 35%
Agregado grueso	:	30 – 45%

Una recomendación para el cálculo de las proporciones de la mezcla basada en los métodos de volumen absoluto incluye:

- Determinar la resistencia del hormigón
- Determinar la relación agua/cemento
- Determinar la distribución de los agregados
- Determinar el contenido de aire
- Determinar el asentamiento/trabajabilidad
- Determinar el contenido de agua
- Calcular el contenido de cemento en función del agua
- Especificar los tipos de cemento a utilizar

- Determinar la inclusión de aditivos y especificar cuáles utilizar
- Calcular la cantidad de finos
- Corregir por cantidad de finos y absorción
- Realizar ensayos

4.1.2 Optimización de la granulometría

Dado que el hormigón está compuesto por pasta y agregados [27], la optimización de la mezcla consiste en reducir la cantidad de pasta y mejorar la distribución del material. Generalmente los agregados son química y dimensionalmente más estables que el mortero. Una granulometría bien graduada permite llenar los espacios que comúnmente llena el mortero.

La parte principal de este estudio consiste en optimizar la granulometría, lo cual se presenta a continuación.

4.2 Descripción de metodología Shilstone

La optimización de las mezclas de hormigón utilizada en éste trabajo se basa en estudios presentados por Shilstone J. M. Sr y Shilstone J. M. Jr. En los documentos "Concrete Mixture Optimization" [1] y "Performance-based Concrete Mixtures and Specification for Today" [2], además de consideraciones en normas y manuales que incluyen pequeñas modificaciones y criterios.

Esta metodología utiliza tres herramientas de evaluación separada para determinar la granulometría óptima:

- Gráfico de factor de grosor (coarseness factor chart)
- Gráfico de potencia 0.45 (0.45 power chart)
- Gráfico de porcentaje de retenido de agregado

Cada gráfico representa un aspecto de optimización de granulometría, sin considerar la pasta de cemento. Mediante estos tres gráficos se puede simplificar la graduación de los agregados, además de verificar futuros problemas potenciales.

4.2.1 Gráfico del Coeficiente de Grosor

El gráfico del coeficiente de grosor de los áridos es la herramienta incluida por Shilstone, la cual permite predecir la trabajabilidad de la mezcla de hormigón. El propósito de predecir este parámetro es determinar la cantidad de áridos gruesos, intermedios y finos existen en la granulometría de manera de tener una distribución óptima que permita llenar los vacíos con áridos y no solamente con mortero.

El gráfico se realiza mediante el cálculo de dos factores:

El primer factor, es el factor de grosor **CF** el cual define la relación entre los agregados gruesos e intermedios, calculado mediante la siguiente ecuación:

$$CF = \frac{Q}{Q + I} \cdot 100 \%$$

Ecuación 4.1

Donde:

Q : 100 - % que pasa malla 10mm (3/8")

I : % porcentaje de material que pasa malla (3/8") y es retenido en malla N°8

Los valores Q e I representan las partículas gruesas e intermedias respectivamente.

Al analizar la fórmula se puede apreciar que a medida que el factor aumenta significa que existen mayor cantidad de partículas gruesas teniendo como tope el 100% que representa sólo la presencia de partículas gruesas. Un 0% indica que no hay material retenido en la malla 3/8".

El segundo factor es el factor de trabajabilidad **W** ("workability Factor"). Este factor representa el porcentaje de material fino, el cual es el que pasa la malla 2.5mm (N°8).

W : % porcentaje de material que pasa malla 2.5mm. (N°8)

Dado que la cantidad de agregado fino necesario es influenciado por la cantidad de cemento, se realiza una corrección en función de la cantidad de éste. El ajuste queda expresado de la siguiente manera:

$$Adj = 0.0588 \cdot Cc - 19.647$$

Ecuación 4.2

Donde:

Cc : Contenido de cemento.

Finalmente, el factor de trabajabilidad queda expresado de la siguiente manera:

$$W_{adj} = W + Adj$$

Ecuación 4.3

Los valores de CF y W_{adj} son los que se grafican ubicando la coordenada en una de las zonas del diagrama.

En el diagrama de la Figura 4.1 se pueden observar las siguientes zonas:

- Trend bar: es la zona en que el material grueso y fino de un material bien graduado está en equilibrio. Para que se dé esto, el hormigón requiere mucho control además de que la mezcla tiene aplicaciones limitadas. Uno de los usos puede ser en zapatas corridas. Dado que esta es la zona de equilibrio de tamaño de las partículas, los puntos ubicados sobre esta línea de división representan una cantidad mayor de material fino, mientras que si están ubicadas bajo esta zona representa un incremento de material grueso. En la práctica esta zona sólo se representa con una línea divisoria y no una zona deseada de optimización.

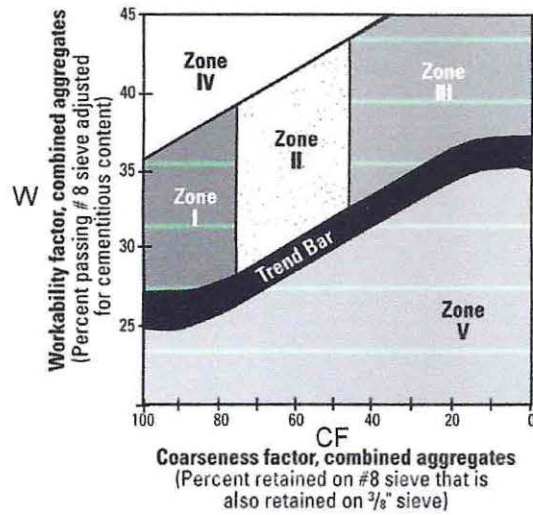


Figura 4.1 Gráfico de Optimización Shilstone [1]

- **Zona I:** esta zona representa una granulometría mal graduada, con ausencia de ciertos tamaños de partículas. Una mezcla con material en esta zona tiene muchas probabilidades de sufrir segregación durante la colocación o consolidación. Esto se debe a que posee una baja cantidad de material intermedio.
- **Zona II:** la zona II es la zona deseada y representa una mezcla óptima con tamaños máximos nominales de 19mm. a 50mm. El hormigón producido en esta zona es un hormigón consistente y de alta calidad.
- **Zona III:** esta zona también es una zona óptima, pero para materiales con tamaño máximo nominal 19mm.
- **Zona IV:** esta zona representa una mezcla con una gran cantidad de material fino. Existen altos riesgos de segregación, cambios en la resistencia, retracción plástica, agrietamiento y un hormigón de mala calidad en general.
- **Zona V:** por el contrario, esta zona representa una mezcla con una excesiva cantidad de material grueso e intermedio, lo que genera una mezcla sin plasticidad.

Dependiendo los usos, las zonas óptimas son la Zona II y III, siendo más común la Zona II, para eso los puntos deben estar ubicados ente:

$$28 < W < 44$$

$$45 < CF < 75$$

Además de ser graficados dentro de la zona etiquetada.

Si la combinación entre factor de grosor (CF) y factor de trabajabilidad (W) está en los límites con la Zona IV y I se requiere un control adicional y algún ajuste en la dosificación después de realizar ensayos adicionales.

En los últimos años se han realizado algunos estudios [25] que crean otros cuadros dentro de la Zona II incluyendo recomendaciones para cada tipo de Hormigón como pavimentos u hormigón estructural.

4.2.2 Gráfico de Potencia 0.45

El gráfico de potencia 0.45 o por su nombre en inglés "0.45 power chart", es un método de medición de algunos parámetros de la granulometría utilizado en el diseño de mezclas asfálticas, incluyendo modificaciones como la utilización de la relación agua/cemento en vez de relleno mineral fino. Dado que es un método existente, Shilstone lo incluyó en la presentación de su método debido a que muestra de manera clara la tendencia de la granulometría de los agregados y describe una granulometría de combinado de agregados ideal.

Al igual que el gráfico de grosor, se aplica sobre el agregado combinado, graficando la cantidad acumulada que pasa por cada tamiz y comparándola con su respectivo espesor (en micrones) elevado a la potencia de 0.45.

Para escoger un agregado combinado bien graduado, al graficarse éste debe seguir la tendencia de una línea recta trazada entre el tamaño máximo nominal y el origen. Además, debe estar dentro de los límites a cada lado de la diagonal cuyos límites se muestran en línea roja.

Una granulometría aceptable también puede estar graficada paralela a la diagonal sin exceder la distancia mínima por lado representada por las líneas rojas.

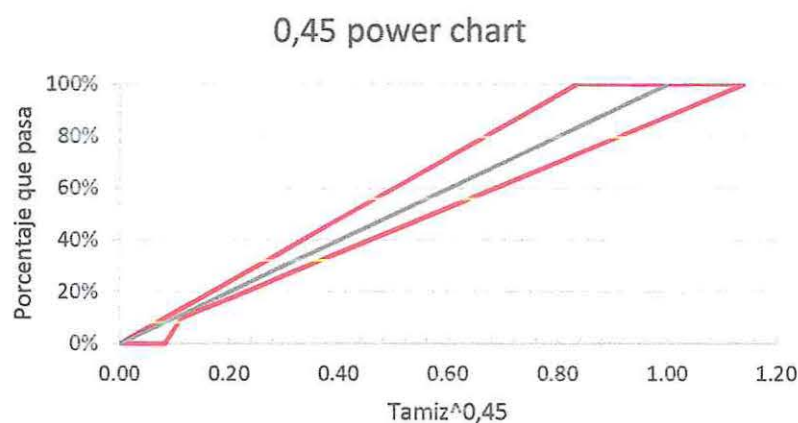


Figura 4.2 Gráfico 0.45

Si los puntos varían atravesando de un lado a otro la línea de tendencia gris, indica que la granulometría está mal graduada con deficiencia de ciertos tamaños.

Este gráfico se usa sólo como una guía y no como una especificación. La mezcla ideal encontrada debe ser evaluada mediante pruebas adicionales de laboratorio.

4.2.3 Gráfico de porcentaje retenido de agregado

También llamado "diagrama 18-8", ilustra gráficamente la distribución de las partículas como un trazado del porcentaje de agregado combinado retenido en cada tamiz [2]. Se encuentra limitado por dos curvas entre el 18 y 8%, que permiten que la distribución no posea la ausencia de partículas de cierto tamaño en la granulometría. El gráfico puede ser usado para indicar mezclas que podrían ser trabajables y tener una demanda razonablemente baja de agua.

En la tabla se muestran los límites los cuales se grafican para determinar las partículas retenidas.

Tabla 4.1 Valores límites del gráfico de porcentaje retenido

tamiz	retenido mínimo	retenido máximo
6"	0%	0%
3"	0%	0%
2"	0%	0%
1 1/2"	0%	0%
1"	0%	18%
3/4"	8%	18%
1/2"	8%	18%
3/8"	8%	18%
4	8%	18%
8	8%	18%
16	8%	18%
30	0%	18%
50	0%	0%
100	0%	0%
200	0%	0%

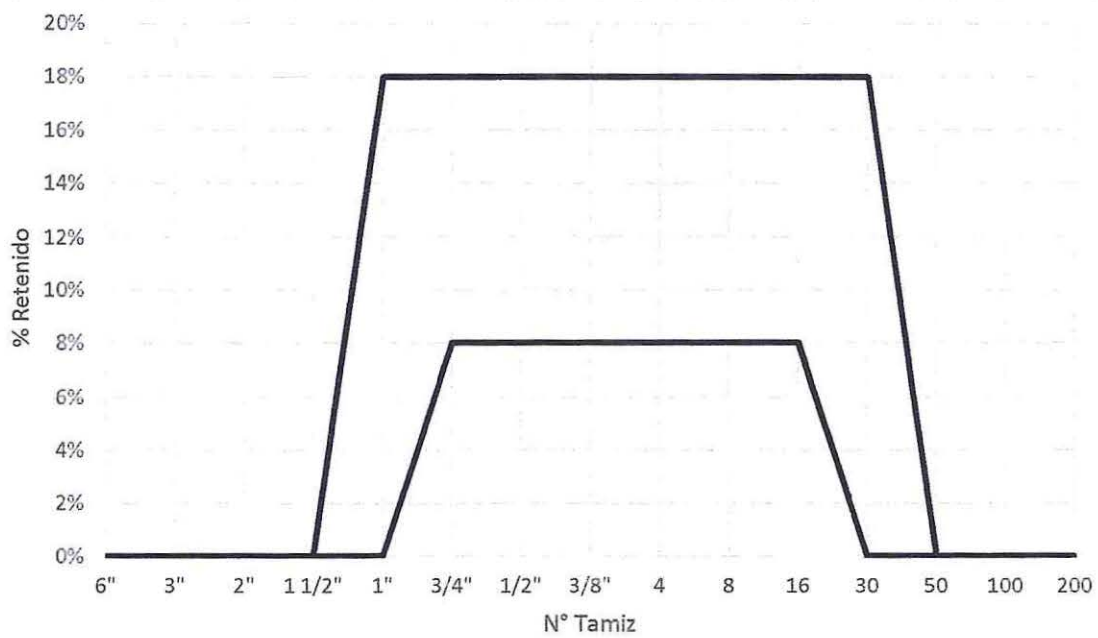


Figura 4.3 Gráfico de porcentaje retenido, "18-8"

Se puede apreciar que los requisitos principales se establecen para los áridos de tamaño intermedio limitando la cantidad máxima para partículas entre los tamices 1" y #30, y la cantidad mínima para partículas entre los tamices 3/4" y #16. Se puede encontrar en algunas normas extranjera o investigaciones una extensión que limita la cantidad retenido de material fino [25].

Si algún punto de la distribución queda fuera de los límites del gráfico se recomienda que la diferencia entre porcentajes retenidos sea menor a 10 por ciento y que la suma del porcentaje retenido en dos tamices adyacentes sea al menos 13 por ciento del total agregado, esto debido a que cuando un tamaño se encuentra deficiente los tamices de al lado tienden a balancear la distribución.

4.3 Verificación Metodología Shilstone a Mezcla Optimizada

4.3.1 Especificaciones de la mezcla diseñada

La mezcla utilizada se basa en la presentada en la obra Ruta 60 CH Camino la Pólvara, realizada mediante un diseño de mezcla enfocada en el rendimiento y especificando la resistencia y la docilidad del hormigón esperada.

Esta mezcla, donde se incluye la dosificación y la granulometría, fue proporcionada por los consultores a cargo del proyecto de pavimentación y validada por el Laboratorio de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de la V región. Dado que se considera la mezcla como una optimizada, se realizará la verificación de los parámetros que utiliza la metodología.

Los valores presentados a continuación como la resistencia y la docilidad, son los valores requeridos y seleccionados en el diseño de la mezcla mencionada en función del proyecto y el tipo de vía utilizado:

- Resistencia Especificada
A flexotracción : 4.5 MPa a los 28 días.
- Docilidad del Hormigón
Asentamiento de cono de Abrams : 6 cm.

La dosificación recomendada para la confección del Hormigón es:

HF 4.5 (80) 40/6

Tabla 4.2 Dosificación de la Mezcla Optimizada proporcionada por la consultora

Material	para 1 m ³
cemento	320
agua libre	168
grava	780.0
gravilla	133
arena	989
plastocrete	1.92
fibra	2.5

Se especifica, además:

- Tamaño máximo de áridos : 40mm.
- Nivel de confianza : 80%
- Relación A/C : 0.52
- Porcentaje de aire : 1.5%

Cantidad de áridos :

Tabla 4.3 Porcentajes de Áridos para la Dosificación

Tipo	%
Grava	41
Gravilla	7
Arena	52

Una vez establecidos los requerimientos de la mezcla y la dosificación se proceden a verificar la optimización de la distribución de los agregados.

4.3.2 Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas. Se obtiene mediante un ensayo realizado con tamices graduados y normados. El ensayo se realiza de acuerdo al ítem 8.102 del Manual de Carreteras [4] donde el resultado se presenta en porcentajes para cada grupo de agregado sobre 200mm. (gravas, gravillas y arenas).

Para desarrollar el ensayo se utiliza tamices tejidos, balanza, mortero, un horno, y herramientas y accesorios.

Después de realizar el procedimiento recomendado en el Manual de Carreteras [4] se obtienen los siguientes resultados para las arenas presentados en la Tabla 4.4, la gravilla en la Tabla 4.5 y las gravas en la tabla 4.6:

Tabla 4.4 Granulometría Arena Mezcla Optimizada

NCh (mm.)	ASTM	% que pasa
50	2"	100.0%
40	1 1/2"	100.0%
25	1"	100.0%
20	3/4"	100.0%
12,5	1/2"	100.0%
10	3/8"	100.0%
5	4	87.0%
2,5	8	59.0%
1,25	16	44.0%
0,63	30	35.0%
0,315	50	23.0%
0,16	100	6.0%
0,08	200	0.0%

Tabla 4.5 Granulometría Gravilla Mezcla Optimizada

NCh (mm.)	ASTM	% que pasa
50	2"	100.0%
40	1 1/2"	100.0%
25	1"	100.0%
20	3/4"	99.0%
12,5	1/2"	51.0%
10	3/8"	24.0%
5	4	3.0%
2,5	8	1.0%
1,25	16	1.0%
0,63	30	1.0%
0,315	50	1.0%
0,16	100	1.0%
0,08	200	0.0%

Tabla 4.6 Granulometría Grava Mezcla Optimizada

NCh (mm.)	ASTM	% que pasa
50	2"	100.0%
40	1 1/2"	98.0%
25	1"	60.0%
20	3/4"	17.0%
12,5	1/2"	0.0%
10	3/8"	0.0%
5	4	0.0%
2,5	8	0.0%
1,25	16	0.0%
0,63	30	0.0%
0,315	50	0.0%
0,16	100	0.0%
0,08	200	0.0%

4.3.3 Gráfico de factor de grosor

Para poder determinar los coeficientes de los áridos y graficar éstos en el diagrama se necesita la granulometría del agregado combinado.

Tabla 4.7 Granulometría Combinada Mezcla Optimizada

Tamiz		grava	gravilla	Arena	combinado
tamiz		%	%	%	%
ASTM	(mm.)	pasa	pasa	pasa	pasa
6"	150	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3"	75	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
2"	50	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
1 1/2"	40	98.0%	100.0%	100.0%	99.2%
1"	25	60.0%	100.0%	100.0%	83.6%
3/4"	20	17.0%	99.0%	100.0%	65.9%
1/2"	12.5	0.0%	51.0%	100.0%	55.6%
3/8"	10	0.0%	24.0%	100.0%	53.7%
4	5	0.0%	3.0%	87.0%	45.4%
8	2.5	0.0%	1.0%	59.0%	30.8%
16	1.25	0.0%	1.0%	44.0%	23.0%
30	0.63	0.0%	1.0%	35.0%	18.3%
50	0.315	0.0%	1.0%	23.0%	12.0%
100	0.16	0.0%	1.0%	6.0%	3.20%
200	0.08	0%	0%	0%	0.10%

Cálculo de factores:

a) Factor CF

Material retenido en malla 3/8":

$$Q = 100\% - 53.7\% = 46.3\%$$

Material retenido entre malla 3/8" y malla #8:

$$I = 53.7\% - 30.8\% = 22.9\%$$

$$CF = \frac{Q}{Q + I} = \frac{46.3\%}{46.3\% + 22.9\%} = 66.9\%$$

b) Factor W

Porcentaje del agregado combinado que pasa por el tamiz #8 (2.5mm.):

$$W = 30.8\%$$

Ajuste por peso de cemento por metro cúbico:

$$Adj = \left[\frac{0.0588 \cdot 320(kg.) - 19,647}{100} \right] = 0.831\%$$

Factor corregido:

$$W_{Adj} = 30.8\% - 0.831\% = 29.97\%$$

De esta manera se grafican ambos porcentajes obteniendo:

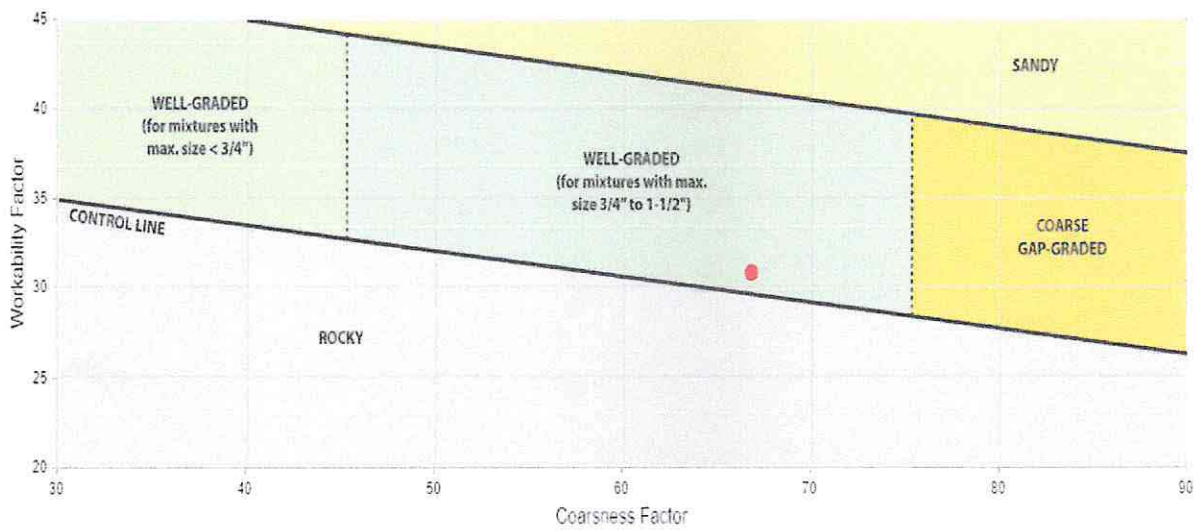


Figura 4.4 Gráfico de Shilstone Granulometría Optimizada

El punto rojo como se explicó en el apartado 4.2.1 representa el factor de grosura en el eje x, y el factor de trabajabilidad en el eje y, donde se puede apreciar que la granulometría se encuentra dentro de los límites recomendados de una granulometría optimizada.

4.3.4 Gráfico de Potencia 0.45

Como se describió en el ítem 4.2.2, el gráfico se confecciona determinando la abertura de los tamices en micrones elevado a la 0.45, cuyos valores representan el eje X y se muestran en la tabla 4.8. Por otro lado, los valores representados en el eje Y corresponden al porcentaje que pasa del agregado combinado, el cual se muestra en la Tabla 4.9:

Esta combinación de valores genera una línea de tendencia del agregado combinado, la cual debe ser comparada a valores límites que representan la cantidad máxima y mínima de porcentaje que pasa que debe tener cada tamiz en comparación al anterior.

Tabla 4.8 Coordenadas Horizontales Gráfico 0.45

tamiz		abertura (micr.)	$^{0.45}$
6"	150	152400	215.0
3"	75	76200	157.4
2"	50	50800	131.1
1 1/2"	40	38100	115.2
1"	25	25400	96.0
3/4"	20	19000	84.2
1/2"	12.5	12700	70.3
3/8"	10	9510	61.7
4	5	4760	45.2
8	2.5	2380	33.1
16	1.25	1190	24.2
30	0.63	595	17.7
50	0.315	297	13.0
100	0.16	149	9.5
200	0.08	74	6.9

Tabla 4.9 Porcentaje que pasa Granulometría Optimizada

Tamiz (ASTM)	(mm.)	% pasa
6"	150	100.0%
3"	75	100.0%
2"	50	100.0%
1 1/2"	40	99.2%
1"	25	83.6%
3/4"	20	65.9%
1/2"	12.5	55.6%
3/8"	10	53.7%
4	5	45.4%
8	2.5	30.8%
16	1.25	23.0%
30	0.63	18.3%
50	0.315	12.0%
100	0.16	3.20%
200	0.08	0.10%

Graficando los valores de las tablas 4.8 y 4.9 en el Gráfico de potencia 0.45, se obtiene lo siguiente:

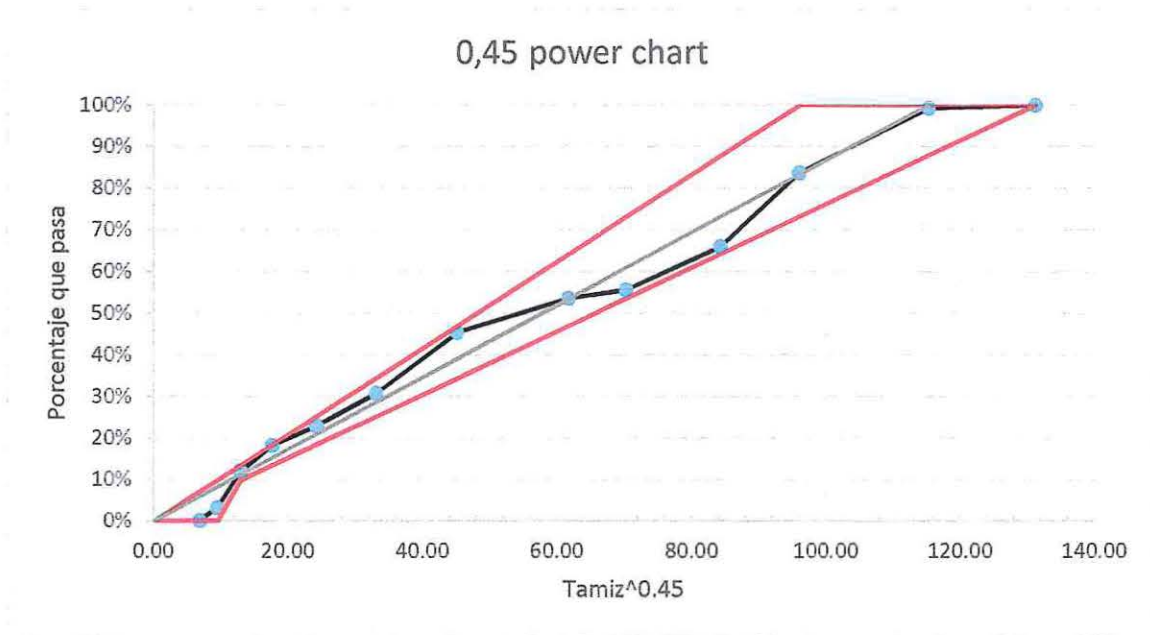


Figura 4.5 Gráfico 0.45 Granulometría Optimizada

Donde la línea recta de color gris representa la tendencia ideal de los puntos, las líneas rojas representan los límites superior e inferior aceptados, y la línea negra corresponde a la unión de los puntos de la tabla 4.8 y 4.9.

Se puede apreciar que la granulometría cumple los límites propuestos para la optimización.

4.3.5 Gráfico de porcentaje retenido

Los valores retenidos del agregado combinado se presentan en la tabla 4.10:

Tabla 4.10 Porcentajes retenido por tamiz Granulometría Optimizada

Tamiz (ASTM)	Tamiz (mm.)	% ret. acum.	%ret.
6"	150	0.0%	0.0%
3"	75	0.0%	0.0%
2"	50	0.0%	0.0%
1 1/2"	40	0.8%	0.8%
1"	25	16.4%	15.6%
3/4"	20	34.1%	17.7%
1/2"	12.5	44.44%	10.3%
3/8"	10	46.32%	1.9%
4	5	54.6%	8.2%
8	2.5	69.3%	14.7%
16	1.25	77.1%	7.8%
30	0.63	81.7%	4.7%
50	0.315	88.0%	6.2%
100	0.16	96.8%	8.8%
200	0.08	100.0%	3.2%

Donde se grafican los valores retenidos por tamiz:

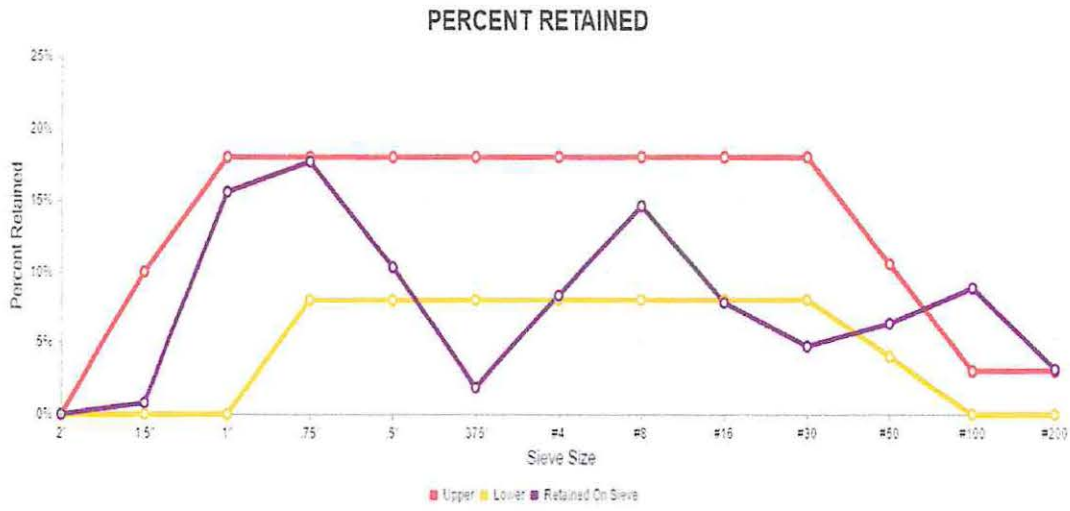


Figura 4.6 Gráfico Porcentaje Retenido Granulometría Optimizada

La línea roja representa el límite superior del porcentaje retenido. La línea amarilla representa el límite inferior del material retenido y la línea morada representa la unión de los porcentajes retenidos por cada tamiz.

Se puede observar que en la mayoría de los casos la granulometría cumple con los límites recomendados, excepto en la malla 3/8" donde el porcentaje retenido es inferior al 2%. Sí se cumple que la diferencia entre tamices adyacentes es menor a 10%, y que no existen más de dos puntos fuera de los límites. La suma de tamices adyacentes también es cercana al 13%.

4.4 Verificación metodología Shilstone a una mezcla basada en dosificación común de la V región.

4.4.1 Especificaciones de la mezcla diseñada

La mezcla utilizada para comparar se basa en la presentada en la obra Ruta 60 CH Camino la Pólvara, incluyendo pequeñas modificaciones en la granulometría como el peso y porcentaje de cada árido, así como el tamizado. Y por otro lado se mantienen varios factores como las especificaciones de diseño de la mezcla y relación agua/cemento, de manera que sólo la granulometría sea el parámetro modificado y de comparación.

Aunque comúnmente para obtener un hormigón de 4.5 MPa a los 28 días en la V región se utilizan dosificaciones con mayor dosis de cemento, se prefiere mantener la cantidad de manera de comparar el efecto sólo de modificar la granulometría por lo tanto esta dosificación se determinó en función de la cantidad de cemento y agua inicial.

- Resistencia Especificada

A flexotracción : 4.5 MPa a los 28 días.

- Docilidad del Hormigón

Asentamiento de cono de Abrams : 6 cm.

La dosificación recomendada para la confección del Hormigón es:

HF 5.0 (80) 40/6

Tabla 4.11 Dosificación Mezcla de Comparación

Material	para 1 m ³
cemento	320 [kg]
agua libre	168 [kg]
grava	596 [kg]
gravilla	397 [kg]
arena	923 [kg]
plastocrete	1.92 [lt]
fibra	2.5 [kg]

Se especifica, además:

Tamaño máximo de áridos : 40mm.

Nivel de confianza : 80%

Relación A/C : 0.52

Porcentaje de aire : 1.5%

Cantidad de áridos :

Tabla 4.12 Porcentajes de Áridos Mezcla de Comparación

Tipo	%
Grava	31
Gravilla	21
Arena	48

La primera modificación a la dosificación son los porcentajes de áridos por metro cúbico, se hace para poder cumplir con la resistencia requerida en el proceso de dosificación.

Una vez establecidos los requerimientos de la mezcla y la dosificación se proceden a verificar la optimización de la distribución de los agregados.

4.4.2 Granulometría

Después de realizar el procedimiento recomendado en el Manual de Carreteras [16] se obtienen los siguientes resultados para cada grupo de agregados:

Tabla 4.13 Granulometría Arena Mezcla de Comparación

NCh (mm.)	ASTM	% que pasa
50	2"	100%
40	1 1/2"	100%
25	1"	100%
20	3/4"	100%
12,5	1/2"	100%
10	3/8"	100%
5	4	76%
2,5	8	61%
1,25	16	47%
0,63	30	38%
0,315	50	28%
0,16	100	8%
0,08	200	2%

Tabla 4.14 Granulometría Gravilla Mezcla de Comparación

NCh (mm.)	ASTM	% que pasa
50	2"	100%
40	1 1/2"	100%
25	1"	100%
20	3/4"	100%
12,5	1/2"	69%
10	3/8"	42%
5	4	3%
2,5	8	3%
1,25	16	3%
0,63	30	3%
0,315	50	3%
0,16	100	3%
0,08	200	3%

Tabla 4.15 Granulometría Grava Mezcla de Comparación

NCh (mm.)	ASTM	% que pasa
50	2"	100%
40	1 1/2"	100%
25	1"	57%
20	3/4"	18%
12,5	1/2"	1%
10	3/8"	1%
5	4	1%
2,5	8	1%
1,25	16	1%
0,63	30	1%
0,315	50	1%
0,16	100	1%
0,08	200	1%

4.4.3 Gráfico de factor de grosor (ambas)

Tabla 4.16 Porcentaje que pasa Granulometría Combinada de Comparación

Tamiz		grava	gravilla	Arena	combinado
ASTM	(mm.)	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa
6"	150	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%
3"	75	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%
2"	50	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%
1 1/2"	40	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%
1"	25	57.0%	100.0%	100.0%	86.7%
3/4"	20	18.0%	100.0%	100.0%	74.6%
1/2"	12.5	1.0%	69.0%	100.0%	62.8%
3/8"	10	1.0%	42.0%	100.0%	57.1%
4	5	1.0%	3.0%	76.0%	37.4%
8	2.5	1.0%	3.0%	58.0%	28.8%
16	1.25	1.0%	3.0%	47.0%	23.5%
30	0.63	1.0%	3.0%	38.0%	19.2%
50	0.315	1.0%	3.0%	28.0%	14.4%
100	0.16	1.0%	3.0%	8.0%	4.8%
200	0.08	1.0%	3.0%	2.0%	1.9%

Calculo de factores:

c) Factor CF

Material retenido en malla 3/8":

$$Q = 100\% - 57.1\% = 42.9\%$$

Material retenido entre malla 3/8" y malla #8:

$$I = 57.1\% - 28.8\% = 28.3\%$$

$$CF = \frac{Q}{Q + I} = \frac{42.9\%}{42.9\% + 28.3\%} = 60.3\%$$

d) Factor W

Porcentaje del agregado combinado que pasa por el tamiz #8 (2.5mm.):

$$W = 28.8\%$$

Ajuste por peso de cemento por metro cúbico:

$$Adj = \left[\frac{0.0588 \cdot 320(kg.) - 19,647}{100} \right] = 0.831\%$$

Factor corregido:

$$W_{Adj} = 28.8\% - 0.831\% = 27.97\%$$

De esta manera se grafican ambos porcentajes obteniendo:

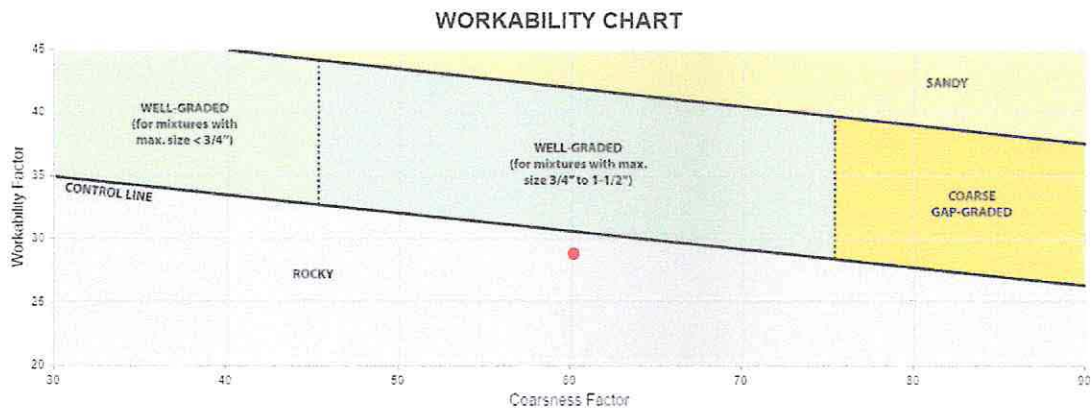


Figura 4.7 Gráfico de Shilstone Granulometría de Comparación

Donde se puede apreciar que la granulometría no se encuentra dentro de los límites recomendados de una granulometría optimizada.

4.4.4 Gráfico de factor 0.45

El porcentaje que pasa es del agregado combinado es:

Tabla 4.17 Porcentaje que pasa Granulometría de Comparación

Tamiz ASTM	(mm.)	% pasa
6"	150	100.00%
3"	75	100.00%
2"	50	100.00%
1 1/2"	40	100.00%
1"	25	86.62%
3/4"	20	74.49%
1/2"	12.5	62.78%
3/8"	10	57.19%
4	5	37.54%
8	2.5	30.32%
16	1.25	23.57%
30	0.63	19.24%
50	0.315	14.42%
100	0.16	4.79%
200	0.08	2.97%

Obteniendo de esta manera el gráfico ilustrado en la figura 4.8

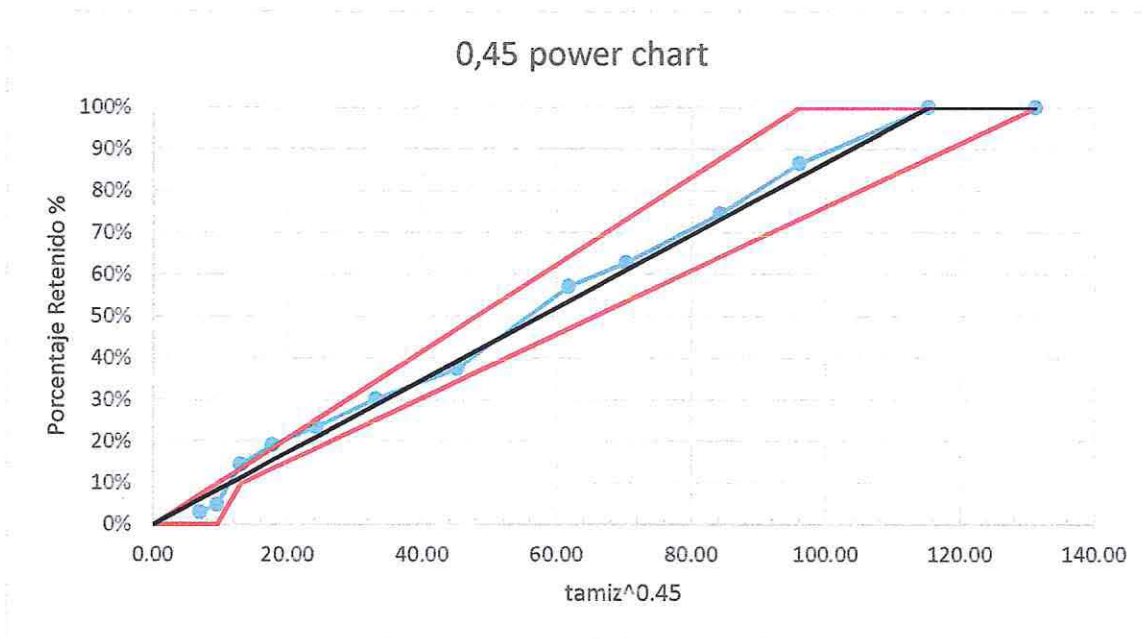


Figura 4.8 Gráfico 0.45 Granulometría de Comparación

Se puede apreciar que la granulometría no cumple los límites propuestos para la optimización, saliendo de los límites recomendados en al menos dos puntos.

4.4.5 Gráfico de porcentaje retenido

Los valores retenidos del agregado combinado

Tabla 4.18 Porcentaje Retenido Granulometría de Comparación

Tamiz (ASTM)	Tamiz (mm.)	% ret. acum.	%ret.
6"	150	0.0%	0.0%
3"	75	0.0%	0.0%
2"	50	0.0%	0.0%
1 1/2"	40	0.0%	0.0%
1"	25	13.4%	13.4%
3/4"	20	25.5%	12.1%
1/2"	12.5	37.2%	11.7%
3/8"	10	42.8%	5.6%
4	5	62.5%	19.6%
8	2.5	71.1%	8.7%
16	1.25	76.4%	5.3%
30	0.63	80.8%	4.3%
50	0.315	85.6%	4.8%
100	0.16	95.2%	9.6%
200	0.08	98.1%	2.9%

Donde se grafican los valores retenidos por tamiz:

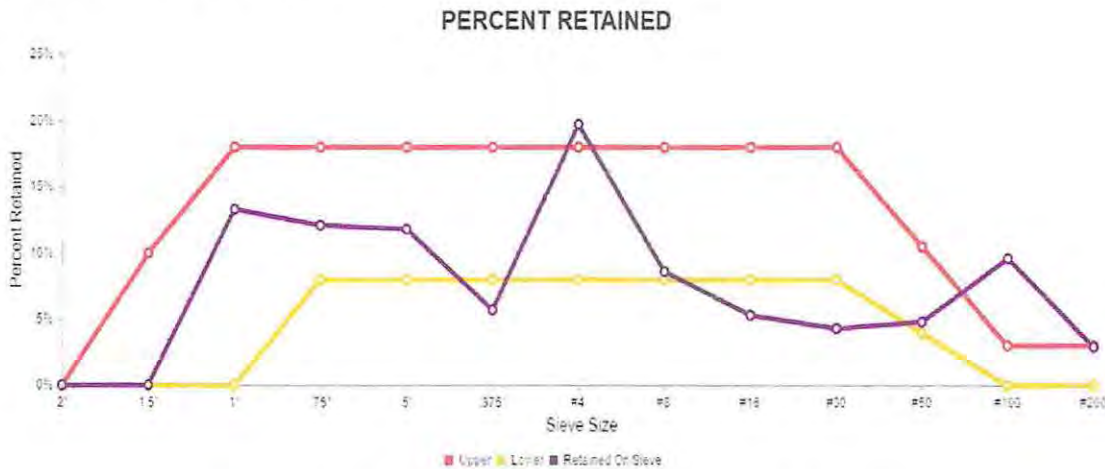


Figura 4.9 Gráfico Porcentaje Retenido Granulometría de Comparación

Se puede observar que en varios puntos la granulometría no cumple con los límites recomendados, excediendo o sin alcanzar los porcentajes establecidos para una granulometría optimizada. Además, se observan puntos consecutivos fuera de los límites, diferencias mayores al 10% entre tamices consecutivos y retención menor al 13% en más de cuatro tamices adyacentes.

4.5 Diseño de Mezcla Optimizada por Shilstone

Una tercera mezcla se presenta como una alternativa mejorada de aquella presentada en el ítem 4.3, la cual, a pesar de cumplir con los aspectos generales del diseño Shilstone, ha sido proporcionada, necesitando realizar un diseño propio y que mejore el grado de optimización anterior.

Las especificaciones de esta mezcla en comparación con la mezcla del ítem 4.3 son similares, excepto en la granulometría, la cual se ajusta más a los gráficos de la optimización Shilstone.

Esta mezcla por motivos de tiempo en el desarrollo del trabajo de título será ensayada a los 28 días. Mientras que las mezclas anteriores serán ensayadas a los 90 días.

4.5.1 Especificaciones de la mezcla diseñada

Las especificaciones de esta mezcla serán las mismas de las mezclas anteriores:

- Resistencia Especificada

A flexotracción : 4.5 MPa a los 28 días.

- Docilidad del Hormigón

Asentamiento de cono de Abrams : 6 cm.

La dosificación para la confección del Hormigón se mantiene, modificando sólo la granulometría.

De esta manera, la tabla 4.19 es la misma que la tabla 4.11:

Para un Hormigón HF 5.0 (80) 40/6

Tabla 4.19 Dosificación Mezcla de Comparación

Material	para 1 m ³
cemento	320 [kg]
agua libre	168 [kg]
grava	780 [kg]
gravilla	133 [kg]
arena	989 [kg]
plastocrete	1.92 [lt]
fibra	2.5 [kg]

Los porcentajes de cada material también se mantienen como se muestra en la tabla 4.20, que corresponde a los mismos valores de la tabla 4.12. Esto permite que el hormigón desde el punto de

vista constructivo no se vea afectado, sin riesgo de segregación o exudación por exceso de finos u otra combinación, debido a que las proporciones se mantienen.

Tabla 4.20 Porcentajes de Áridos Mezcla de Comparación

Tipo	%
Grava	31
Gravilla	21
Arena	48

4.5.3 Gráfico de factor de grosor

Al igual que las combinaciones de agregados anteriores, se calcula el factor de grosor.

Cálculo de factores:

e) Factor CF

Material retenido en malla 3/8":

$$Q = 100\% - 51.5\% = 48.5\%$$

Material retenido entre malla 3/8" y malla #8:

$$I = 51.5\% - 32.2\% = 19.3\%$$

$$CF = \frac{Q}{Q + I} = \frac{48.5}{48.5\% + 19.3\%} = 71.6\%$$

f) Factor W

Porcentaje del agregado combinado que pasa por el tamiz #8 (2.5mm.):

$$W = 32.2\%$$

Ajuste por peso de cemento por metro cúbico:

$$Adj = \left[\frac{0.0588 \cdot 320(kg.) - 19,647}{100} \right] = 0.831\%$$

Factor corregido:

$$W_{Adj} = 32.2\% - 0.831\% = 31.37\%$$

De esta manera se grafican ambos porcentajes obteniendo:

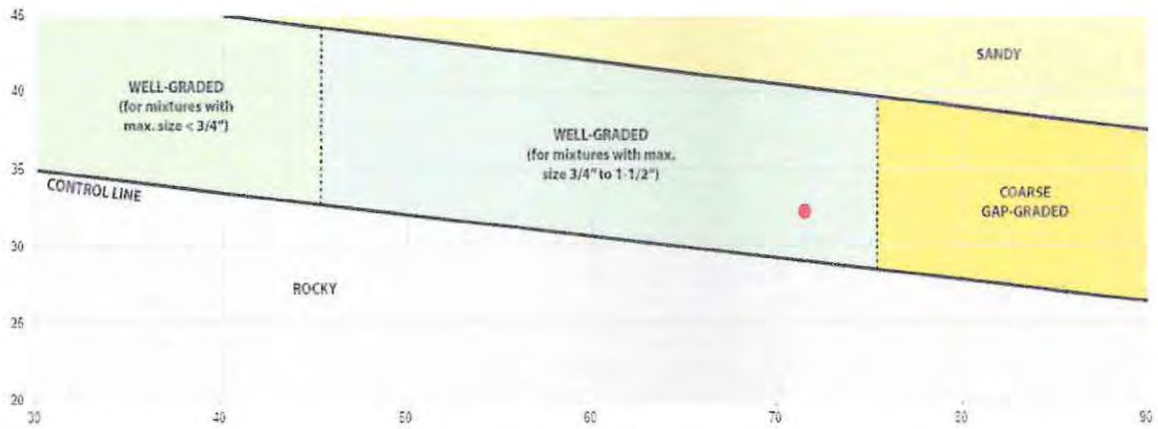


Figura 4.10 – Gráfico de Shilstone Granulometría Corregida

En la figura 4.10 se puede apreciar que la granulometría se encuentra dentro de los límites recomendados de una granulometría optimizada.

4.5.4 Gráfico de factor 0.45

El porcentaje que pasa es del agregado combinado se muestra en la tabla 4.23. con esos valores el gráfico queda de la siguiente manera:

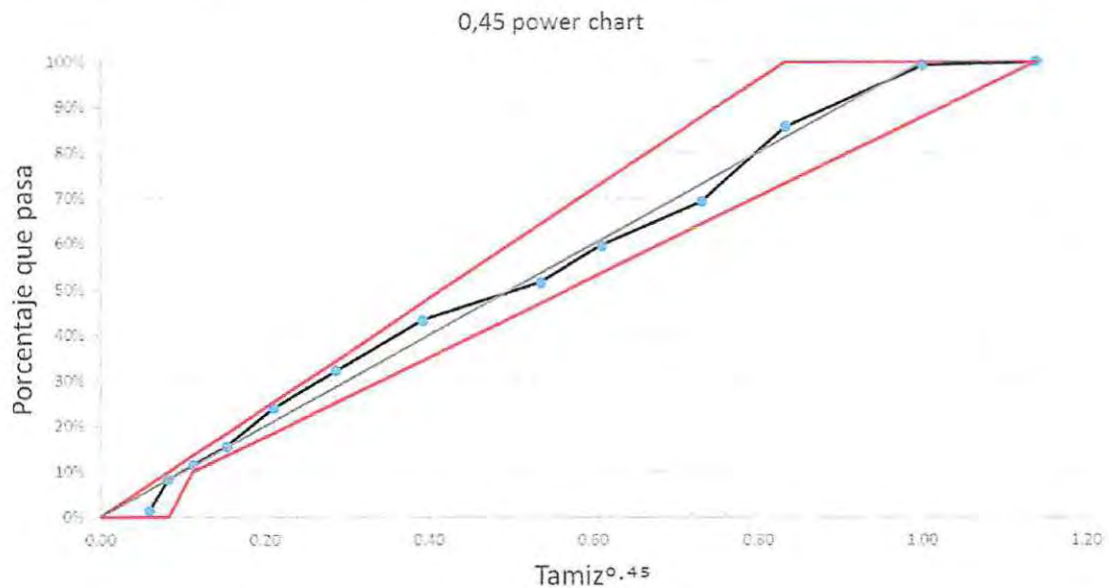


Figura 4.11 Gráfico 0.45 Granulometría de Comparación

Se puede apreciar que la granulometría cumple los límites propuestos para la optimización.

4.4.5 Gráfico de porcentaje retenido

Antes de corregir la mezcla optimizada, este gráfico tenía tres valores que no cumplían con los requisitos de porcentaje. Después de corregir el porcentaje retenido como se muestra en la tabla 4.22 el gráfico queda de la siguiente manera:

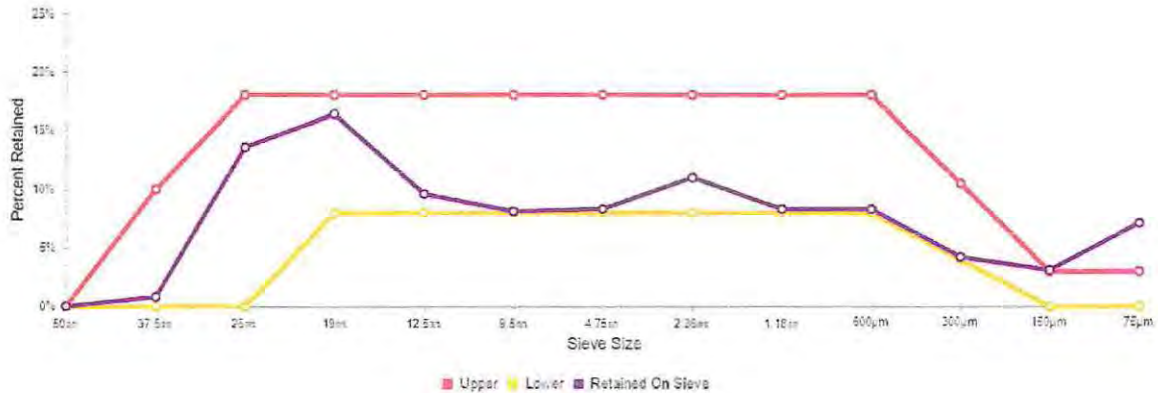


Figura 4.12 Gráfico Porcentaje Retenido Granulometría de Corregida

Ya en este caso los puntos están dentro de los límites requeridos para el diseño, mejorando la distribución anterior.

5 Análisis de las probetas de hormigón

En este capítulo se analizarán los resultados de los ensayos realizados, los cuales, en primer lugar, se describirán mencionando sus medidas, cantidades, metodología y resultados obtenidos con su equivalencia en resistencia.

5.1 Confección de Probetas

Para la evaluación del efecto de la optimización de la granulometría, y por ende de la mezcla, se confecciona 9 probetas de hormigón: 3 prismáticas, 3 cúbicas y 3 cilíndricas por cada mezcla, con un total de 27 probetas con las siguientes medidas:

Tabla 5.1 Medidas de las probetas prismáticas

lado	Medida (mm.)
Ancho	150
Alto	150
Largo	530

Tabla 5.2 Medidas de las probetas Cúbicas

lado	Medida (mm.)
Ancho	150
Alto	150
Largo	150

Tabla 5.3 Medidas de las probetas Cilíndricas

lado	Medida (mm.)
Diámetro	150
Altura	300

La confección se realiza de acuerdo al ítem 8.402.9 y 8.402.15 del Volumen 8 del Manual de Carreteras [4]. Las probetas de hormigón optimizado se realizan en el laboratorio de la obra Camino la Pólvora, mientras que las probetas sin optimizar y la mezcla corregida se realizan en el laboratorio de Vialidad del MOP de la V región.

Los materiales utilizados en laboratorio que incluyen el cemento, los áridos y aditivos son los mismos utilizados en obra.

El propósito es obtener la resistencia de cada una de las probetas y ver el efecto que generan en el hormigón con diferentes distribuciones en la granulometría.

Durante a confección de las mezclas, se pudo observar que la mezcla optimizada poseía una apariencia diferente a mezcla tipo que no estaba optimizada, ésta tenía mayor consistencia y una menor cantidad de agua libre. Además, al realizar el ensayo de cono de Abrams, el asentamiento de la mezcla optimizada fue menor. Esto sucede debido a que uno de los objetivos de la optimización es mejorar a trabajabilidad de Shilstone [1], lo cual se obtiene mejorando la distribución de partículas y, que se ve reflejado en la disminución del porcentaje de vacíos, o que aumenta la densidad, que es uno de los factores que pueden disminuir la resistencia [33]. Por lo tanto, las mezclas optimizadas con el método Shilstone, en su estado fresco, también poseen diferentes propiedades y características.

5.2 Métodos de Ensaye

Una vez transcurridos los 90 días en las dos primeras mezclas (ítem 4.3 y 4.4), se procede a evaluar las propiedades mecánicas de las probetas mediante ensayos de resistencia aplicados a cada tipo de probeta.

A continuación, se describen los métodos y fórmulas utilizadas para obtener los resultados que serán analizados más adelante. Los ensayos de las probetas se realizan de acuerdo al ítem 8.402.11 y 8.402.12 del Volumen 8 del Manual de Carreteras [4].

5.2.1 Expresión de los resultados probetas a compresión

En primer lugar, se debe calcular la sección de ensaye según las siguientes fórmulas:

- Probetas Cúbicas

$$S = \frac{(a_1 + a_2)}{2} \cdot \frac{(b_1 + b_2)}{2}$$

Ecuación 5.1

- Probetas cilíndricas

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

Ecuación 5.2

Donde "a" y "b" son los lados de las probetas cúbicas y "d" el diámetro de las probetas cilíndricas como se muestra también en las figuras 5.1 y 5.2.

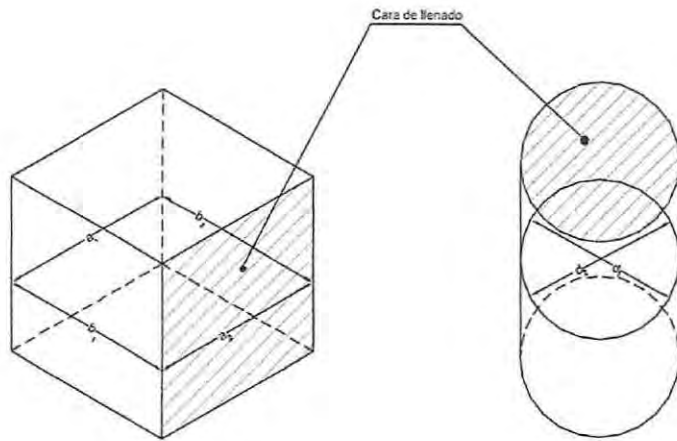


Figura 5.1 Medidas de las Probetas, Caras de Llenado [4].

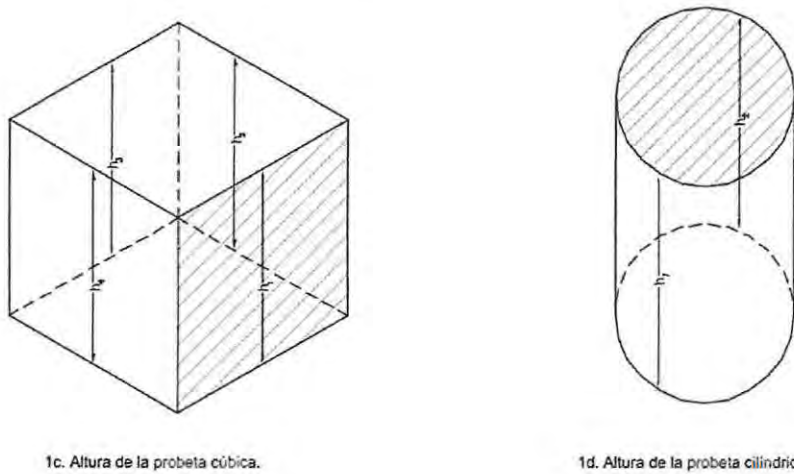


Figura 5.2 Alturas de las Probetas, Caras de Llenado [4].

De esta manera la resistencia a compresión se calcula como la resistencia a la rotura de la siguiente manera:

$$f = \frac{P}{S} \text{ (MPa)}$$

Ecuación 5.3

Donde:

- f : Tensión de rotura, (MPa).
- P : Carga máxima aplicada por la máquina de ensaye, (N).
- S : Sección de ensaye, medida a partir de la dimensión básica real, (mm²).

5.2.2 Expresión de los resultados probetas prismáticas a la flexión:

Para ensayos con cargas $P/2$ en los límites del tercio central de la luz de ensaye:

$$f_t = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2}$$

Ecuación 5.4

Donde:

- f_t : Tensión de rotura, (MPa),
- P : Carga máxima aplicada, (N).
- L : Luz de ensaye de la probeta, (mm).
- b : Ancho promedio de la probeta en la sección de rotura, (mm).
- h : Altura promedio de la probeta en la sección de rotura, (mm).

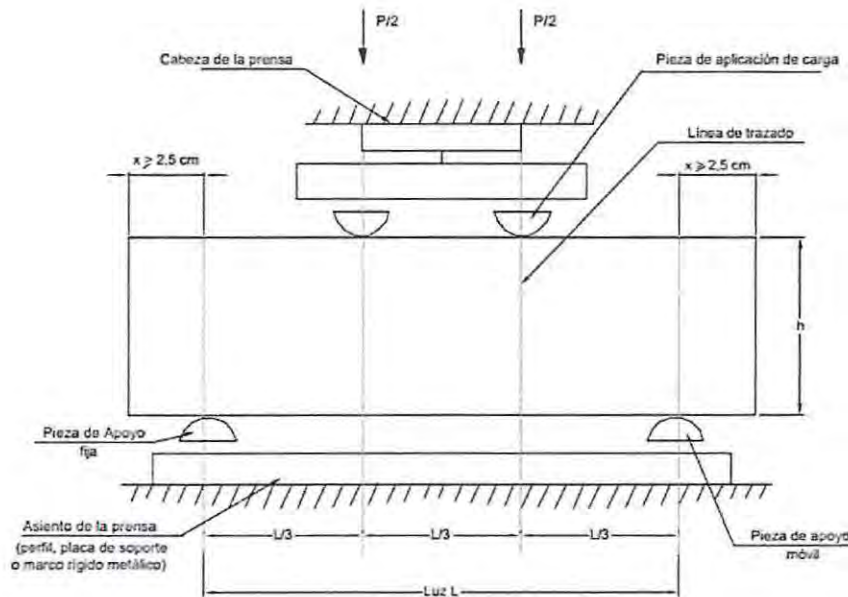


Figura 5.3 Esquema de Ensayo de Tracción por Flexión

La distancia de la Luz utilizada es 450 mm.

En la figura 5.4 y 5.5 se muestran las probetas reales utilizadas para estos ensayos.



Figura 5.4 Probetas Cúbicas antes de ser ensayadas



Figura 5.5 Probetas Prismáticas antes de ser ensayadas

5.2.3 Resultados de los ensayos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al realizar los ensayos en probetas a los 90 días. Estos corresponden a los valores de carga antes de que se produzca la falla de la probeta los resultados se entregan en kN. La tabla 5.4 muestra los resultados de la mezcla optimizada entregada por la Consultora y descrita en el ítem 4.3, mientras que la tabla 5.5 muestra los resultados de carga última de la mezcla a comparar llamada Mezcla Sin Optimizar, descrita en el ítem 4.4.

Tabla 5.4 Resultados de Carga última de los Ensayos
Hormigón Optimizado Consultora

Elemento	Carga máxima (kN)
Vigas	44.18
	44.37
	44.53
Cilindros	823
	857
	893
Cubos	952
	983
	971

Tabla 5.5 Resultados de Carga última de los Ensayos
Hormigón sin Optimizar

Elemento	Carga máxima (kN)
Vigas	39.47
	40.62
	40.59
Cilindros	831
	849
	860
Cubos	935
	963
	984

Las figuras 5.6 y 5.7 muestran las probetas cilíndricas y prismáticas ensayadas.



Figura 5.6 Probeta Cilíndrica después de ser ensayadas



Figura 5.7 Probetas Prismáticas Después de ser ensayadas

Adicionalmente, y después de obtener los resultados de las 18 primeras probetas, se realizan 9 ensayos nuevos a 28 días con una mezcla que corrige los pequeños errores de la granulometría optimizada. Esos resultados se presentan en la tabla 5.6, con el nombre de Hormigón Optimizado Propuesto:

Tabla 5.6 Resultados de Carga última de los Ensayos
Hormigón Optimizado Propuesto

Elemento	Carga máxima (kN)
Vigas	36.05
	34.19
	35.35
Cilindros	746
	754
	733
Cubos	806
	798
	830

Los resultados de las resistencias al aplicar las ecuaciones 5-3 y 5-4 son los siguientes:

5.2.3.1 Cálculo de sección real y resistencia de los cubos

Los valores presentados anteriormente consisten en las cargas de rotura obtenidas de las máquinas de ensaye. Para transformar estas cargas en resistencias se utilizan las fórmulas presentadas en las ecuaciones 5.1 al 5.4. Los resultados de esos cálculos se presentan a continuación:

Tabla 5.7 Cálculo de Sección Real Cubos Hormigón Optimizado Consultora

Elemento	Dimensiones (mm)					Sección real (mm)
	a1	a2	b1	b2	alto	
Cubos	150	150	150	150	151	22500
	150	150	150	150	150	22500
	150	150	150	150	152	22500

Tabla 5.8 Cálculo de Resistencia a Compresión
Cubos Hormigón Optimizado Consultora

Elemento	Carga Máxima (kN)	Sección real (mm)	Resistencia a Compresión Máxima (MPa)	Promedio (MPa)
Cubos	952	22500	42.31	43.05
	983	22500	43.69	
	971	22500	43.16	

Tabla 5.9 Cálculo de Sección Real

Cubos Hormigón sin Optimizar

Elemento	Dimensiones (mm)					Sección real (mm)
	a1	a2	b1	b2	alto	
Cubos	150	150	150	150	150	22500
	150	150	150	150	152	22650
	150	150	150	150	151	22575

Tabla 5.10 Cálculo de Resistencia a Compresión

Cubos Hormigón sin Optimizar

Elemento	Carga Máxima (kN)	Sección real (mm)	Resistencia a Compresión Máxima (MPa)	Promedio (MPa)
Cubos	935	22500	41.56	41.55
	963	22650	42.52	
	984	22575	40.59	

Tabla 5.11 Cálculo de Sección Real

Cubos Hormigón Mezcla Optimizada Propuesta

Elemento	Dimensiones (mm)					Sección real (mm)
	a1	a2	b1	b2	alto	
Cubos	150	150	150	150	150	22500
	150	150	150	150	151	22500
	150	150	150	150	150	22500

Tabla 5.12 Cálculo de Resistencia a Compresión

Cubos Hormigón Mezcla Optimizada Propuesta

Elemento	Carga Máxima (kN)	Sección real (mm)	Resistencia a Compresión Máxima (MPa)	Promedio (MPa)
Cubos	806	22500	35.82	36.06
	798	22500	35.47	
	830	22500	36.89	

Se puede observar claramente que los resultados obtenidos a los 28 días son inferiores. Es imposible comparar resultados a distintas edades de ensaye, por lo que los valores obtenidos a los 28 días deben corregirse con aproximaciones para poder concluir algo. Más adelante se describe cómo estos valores se comparan a los obtenidos a los 90 días.

5.2.3.2 Cálculo de sección real y resistencia de los cilindros

Tabla 5.13 Cálculo de Sección Real
Cilindros Hormigón Optimizado Consultora

Elemento	Dimensiones			Sección real (mm)
	d1	d2	altura	
Cilindros	150	150	303	17671.5
	150	150	300	17671.5
	150	150	301	17671.5

Tabla 5.14 Cálculo de Resistencia a Compresión
Cilindros Hormigón Optimizado Consultora

Elemento	Carga máxima (kN)	Sección real (mm)	Resistencia a Compresión Máxima	Promedio (MPa)
Cilindros	873	17671.5	46.57	49.48
	857	17671.5	48.50	
	893	17671.5	50.53	

Tabla 5.15 Cálculo de Sección Real
Cilindros Hormigón sin Optimizar

Elemento	Dimensiones			Sección real (mm)
	d1	d2	altura	
Cilindros	150	150	305	17671.5
	150	150	304	17671.5
	150	150	303	17671.5

Tabla 5.16 Cálculo de Resistencia a Compresión
Cilindros Hormigón sin Optimizar

Elemento	Carga máxima (kN)	Sección real (mm)	Resistencia a Compresión Máxima (MPa)	Promedio (MPa)
Cilindros	831	17671.5	47.02	47.91
	849	17671.5	48.04	
	860	17671.5	48.67	

Tabla 5.17 Cálculo de Sección Real
Cilindros Hormigón Mezcla Optimizada Propuesta

Elemento	Dimensiones			Sección real (mm)
	d1	d2	altura	
Cilindros	150	150	300	17671.5
	150	150	301	17671.5
	150	150	303	17671.5

Tabla 5.18 Cálculo de Resistencia a Compresión
Cilindros Hormigón Mezcla Optimizada Propuesta

Elemento	Carga máxima (kN)	Sección real (mm)	Resistencia a Compresión Máxima (MPa)	Promedio (MPa)
Cilindros	746	17671.5	42.21	42.12
	754	17671.5	42.67	
	733	17671.5	41.48	

5.2.3.3 Calculo de sección real y resistencia de las vigas.

Tabla 5.19 Cálculo de Resistencia a Flexión
Vigas Hormigón Optimizado Consultora

Elemento	Dimensiones			Luz (mm)	Carga máxima (kN)	Resistencia a Flexotracción Máxima (MPa)	Promedio (MPa)
	Ancho	Largo	Alto				
Vigas	150	530	150	450	44.18	5.89	5.91
	150	530	150	450	44.37	5.92	
	150	530	150	450	44.53	5.94	

Tabla 5.20 Cálculo de Resistencia a Flexión
Vigas Hormigón sin Optimizar

Elemento	Dimensiones			Luz (mm)	Carga máxima (kN)	Resistencia a Flexotracción Máxima (MPa)	Promedio (MPa)
	Ancho	Largo	Alto				
Vigas	150	530	150	450	41.47	5.53	5.63
	150	530	150	450	42.62	5.68	
	150	530	150	450	42.59	5.68	

Tabla 5.21 Cálculo de Resistencia a Flexión
Vigas Hormigón Mezcla Optimizada Propuesta

Elemento	Dimensiones			Luz (mm)	Carga máxima (kN)	Resistencia a Flexotracción Máxima (MPa)	Promedio (MPa)
	Ancho	Largo	Alto				
Vigas	150	530	150	450	36.05	4.81	4.69
	150	530	150	450	34.19	4.56	
	150	530	150	450	35.35	4.71	

Los valores son función de las dimensiones obtenidas y las cargas soportadas por cada probeta. Las resistencias se presentan en MPa, promediando los tres resultados obtenidos por cada probeta y cada mezcla. El análisis de estos resultados se presenta en el capítulo siguiente separando el análisis de las mezclas a 90 días optimizada y sin optimizar, con el análisis de ambas mezclas optimizadas con diferentes resultados en los gráficos.

5.3 Evaluación del Efecto de la Optimización en las propiedades mecánicas

5.3.1 Variación de la Resistencia Metodología Shilstone vs Mezcla común.

Uno de los puntos importantes del desarrollo del Trabajo de Título consiste en identificar el efecto que genera el modificar la mezcla de hormigón. Lo primero que se evaluará será la variación que sufre la resistencia al aplicar la metodología de optimización Shilstone.

5.3.1.1 Probetas Cúbicas:

Tabla 5.22 Comparación de Resistencias Probetas Cúbicas

Probetas	Resistencia Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Resistencia Mezcla sin Optimizar (MPa)	Promedio Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Promedio Mezcla no Optimizada (MPa)	Aumento de Resistencia (%)
Cúbica 1	42.3	41.6	43.05	41.55	3.6
Cúbica 2	43.7	42.5			
Cúbica 3	43.2	40.6			

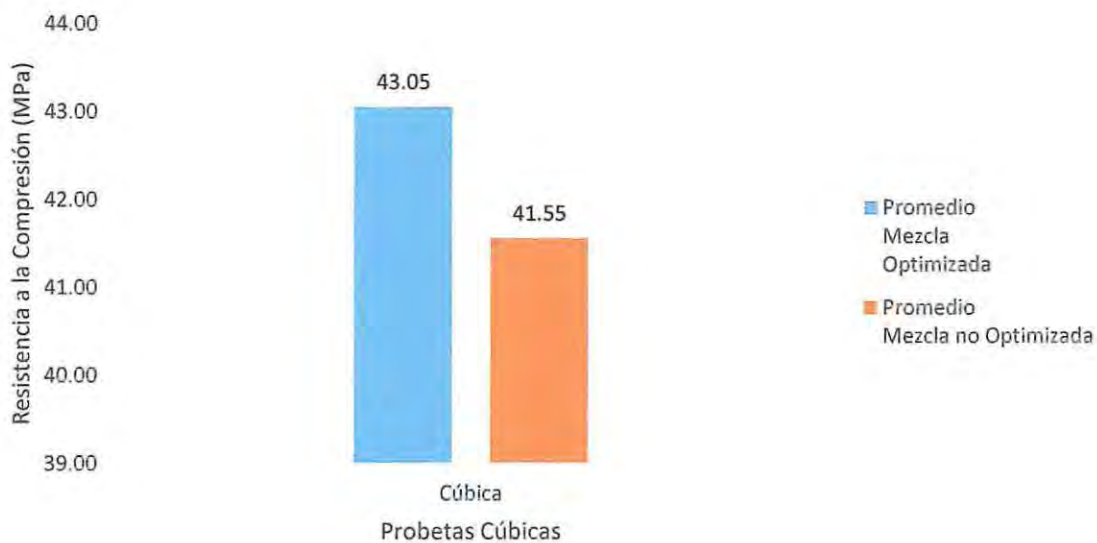


Figura 5.8 Gráfico Comparación de Resistencias Probetas Cúbicas

Al observar los valores se puede apreciar que la resistencia media del hormigón optimizado aumenta un 3.6% aun cuando se trabajó con la misma relación agua/cemento es posible obtener un 3.6% de aumento de resistencia a compresión a los 28 días, esto se puede explicar debido al mejoramiento en la trabazón de áridos al aumentar los puntos de apoyo con una granulometría más densa, particularmente en el tramo de arenas gruesas.

5.3.1.2 Probetas Cilíndricas:

Tabla 5.23 Comparación de Resistencias Probetas Cilíndricas

Probetas	Resistencia Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Resistencia Mezcla sin Optimizar (MPa)	Promedio Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Promedio Mezcla no Optimizada (MPa)	Aumento de Resistencia (%)
Cilíndrica 1	49.4	47.0	49.48	47.91	3.27
Cilíndrica 2	48.5	48.0			
Cilíndrica 3	50.5	48.7			

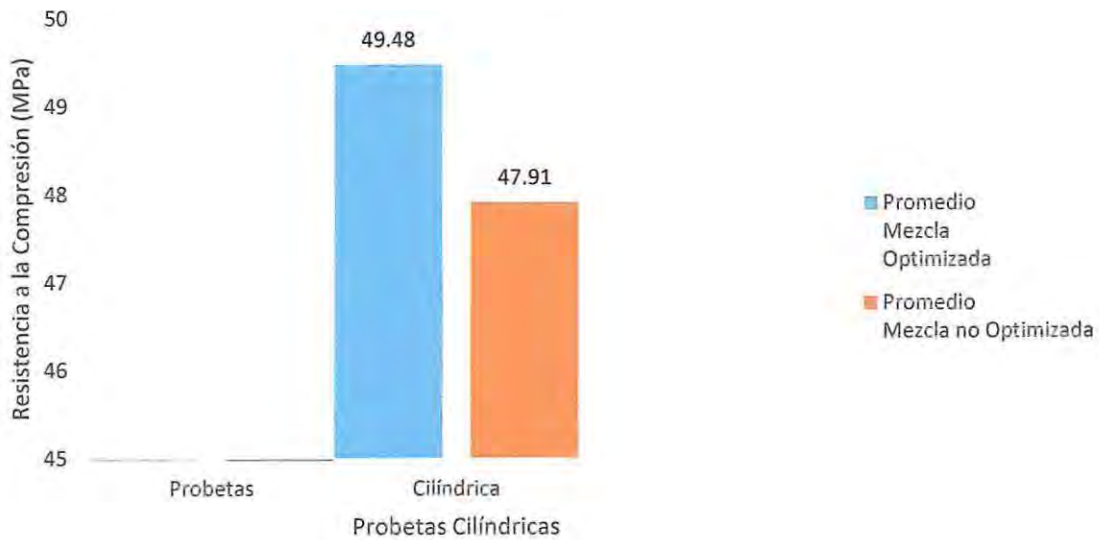


Figura 5.9 Gráfico Comparación de Resistencias Probetas Cilíndricas

Al igual que las probetas cúbicas, las cilíndricas tienen un aumento en la resistencia, lo cual muestra que la optimización sí afecta la resistencia a compresión del hormigón. El porcentaje medio de aumento de la resistencia es del 3.44%, situación que puede explicarse por los mismos motivos que en ensayos de probetas cúbicas.

5.3.1.3 Probetas Prismáticas:

Las probetas prismáticas se evalúan a la tracción por flexión. Los valores de resistencias obtenidos de ambos métodos son los siguientes:

Tabla 5.24 Comparación de Resistencias Probetas Prismáticas

Probetas	Resistencia Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Resistencia Mezcla sin Optimizar (MPa)	Promedio Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Promedio Mezcla no Optimizada (MPa)	Aumento de Resistencia (%)
Viga 1	5.9	5.5	5.91	5.63	5.05
Viga 2	5.9	5.7			
Viga 3	5.9	5.7			

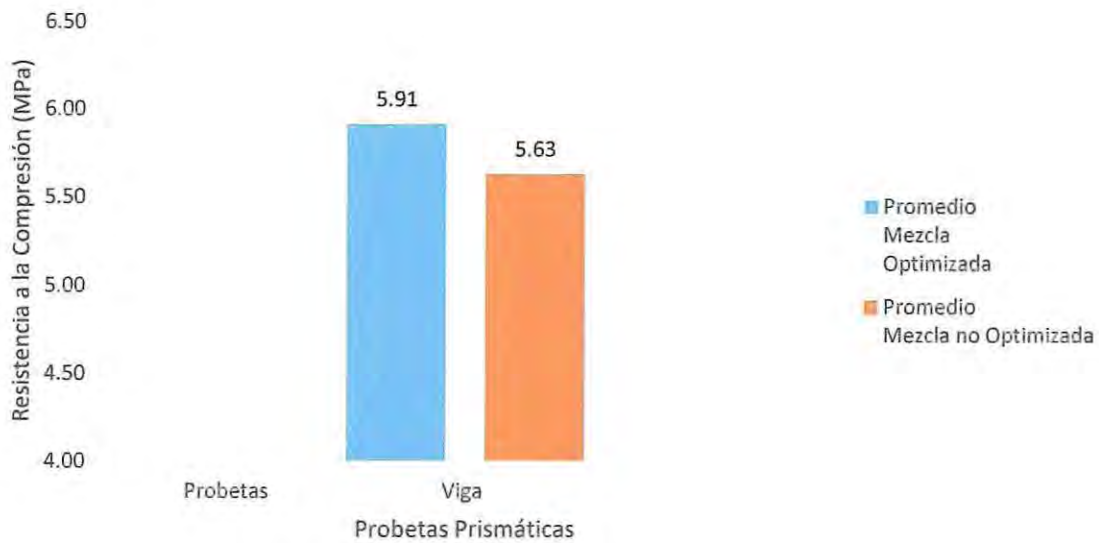


Figura 5.10 Gráfico Comparación de Resistencias Probetas Prismáticas

A diferencia de las probetas analizadas a compresión, las probetas prismáticas poseen una diferencia mayor en el aumento de la resistencia. El 5.05% es un valor importante de la resistencia total. La trabazón de partículas ahora, resulta ser más preponderante en un ensaye a flexotracción por cuanto ésta colabora significativamente a mejorar la resistencia en los esfuerzos internos de corte en la misma masa de hormigón.

Si bien, los valores de las resistencias a la compresión y flexotracción no son considerablemente superiores, sí aumentan en comparación a los valores con una granulometría sin optimizar. El motivo por el cual sólo se ve un aumento del orden del 3-5% es porque la mezcla de comparación utiliza valores iniciales de la mezcla optimizada, es decir, hay proporciones de los materiales como parte del diseño optimizado, en este caso la cantidad de cemento, la cantidad de agua y el peso de los áridos. El utilizar las mismas cantidades de estos materiales es necesario para ver los efectos puntuales de la granulometría sin depender de otros parámetros, por lo que no era posible realizar de otra manera, siendo esta una situación creada para experimentar.

El efecto más importante se observará si se comparan dos mezclas con el objetivo de lograr las mismas resistencias, donde las mezclas alcanzarán las condiciones con diferentes proporciones de los materiales. Hasta ahora se ha observado que, con menor cantidad de cemento, determinado mediante un diseño de mezcla, más una optimización de las granulometrías, se obtienen mayores resistencias. El comparar dos mezclas en las mismas condiciones es sumamente necesario como primer análisis ya que sólo se observa el cambio asociado a la granulometría de los áridos.

5.4 Variación de la Metodología Shilstone Diseño Propuesto.

La figura 4.6 muestra el gráfico de porcentaje retenido del material combinado, en el cual se aprecian algunas inconsistencias con los límites del mismo gráfico. Es por eso que posterior al análisis realizado a 90 días donde se compararon dos mezclas, se procedió a realizar una corrección de la mezcla mediante un nuevo diseño, diferente a la inicial, la cual fue aportada por la consultora que desarrolló el proyecto.

Los resultados de estos ensayos se encuentran en el ítem 5.2, y aunque se realizaron a los 28 días, se realizó una interpolación de éstos, donde se pueden comparar a la mezcla optimizada original. La interpolación a la compresión se realizó a un 120% del valor a 28 días [28, 29, 30], debido a que son los que más se acercan a los valores obtenidos:

La tabla 5.25 muestra los valores interpolados de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas, los cuales se grafican en la figura 5.11

Tabla 5.25 Comparación de Resistencias Probetas Cilíndricas Optimizadas

Probetas	Probetas	Resistencia Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Resistencia Mezcla Propuesta (MPa)	Promedio Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Promedio Mezcla Propuesta (MPa)	Aumento de Resistencia (%)
Cilíndrica 1	Cilíndrica	49,4	50,7	49,48	50,54	2,16
Cilíndrica 2		43,7	42,6			
Cilíndrica 3		43,2	44,3			

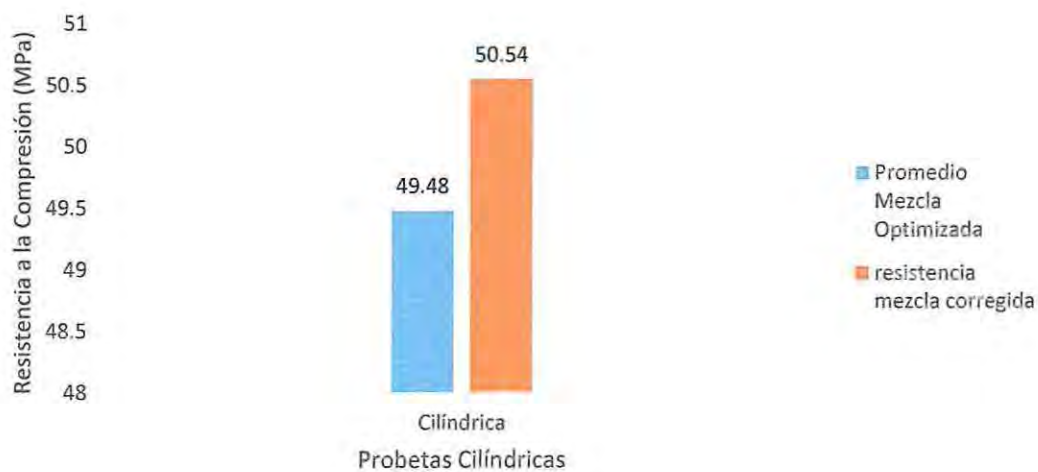


Figura 5.11 Gráfico de comparación de probetas cilíndricas

Se puede apreciar que la resistencia es superior a la anterior, aunque no en valores tan importantes.

Por otro lado, las probetas cúbicas poseen las siguientes resistencias:

Tabla 5.26 Comparación de Resistencias Probetas Cubicas Optimizadas

Probetas	Probetas	Resistencia Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Resistencia Mezcla Propuesta (MPa)	Promedio Mezcla Optimizada Consultora (MPa)	Promedio Mezcla Propuesta (MPa)	Aumento de Resistencia (%)
Cúbica 1	Cúbica	42,3	43,0	43,05	43,27	0,51
Cúbica 2		43,7	42,6			
Cúbica 3		43,2	44,3			

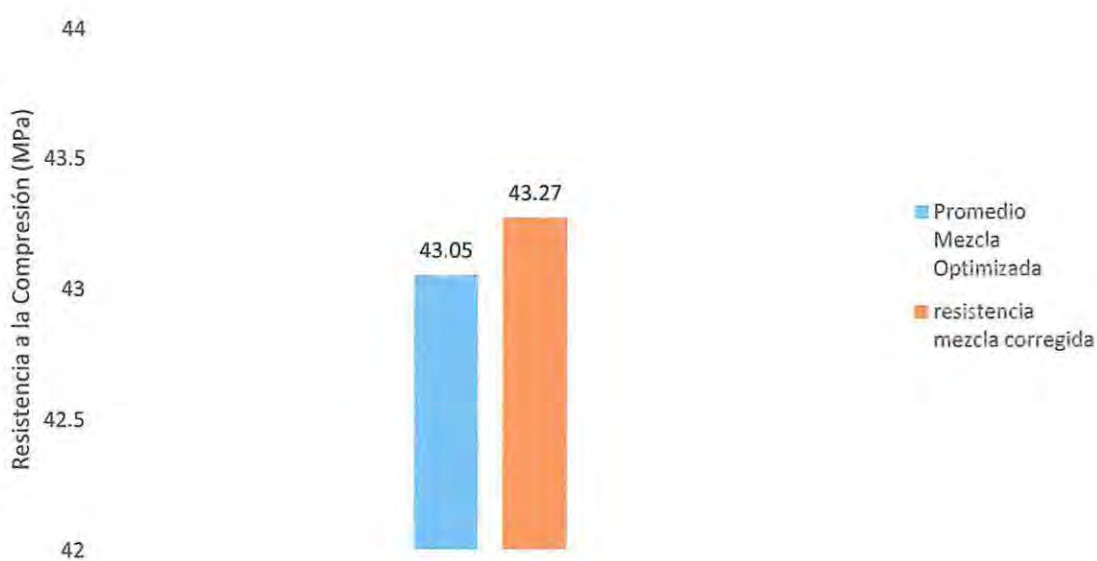


Figura 5.12 - Gráfico de comparación de probetas cilíndricas

Aquí la diferencia es mínima, el gráfico 5.12 y la tabla 5.26 muestran que las resistencias son casi iguales en ambos casos.

Como se ha mencionado previamente, es imposible predecir el comportamiento del hormigón de 28 días a una edad de 90 días, aun así, utilizando aproximaciones obtenidas en estudios similares, se observa que a un 120% de la resistencia obtenida, el hormigón optimizado mediante diseño propio posee mayores resultados en compresión que aquel entregado por la consultora, que se utilizó en el estudio inicial.

Uno de los aspectos relevantes de esta comparación es que, desde el punto de vista teórico, siempre se puede obtener una mejor mezcla y hacer que se cumplan todas las condiciones del método de optimización, llegando a ser un método iterativo en el que cada vez se obtienen mejores resultados.

Partiendo de la hipótesis que el aumento de un 20% por sobre el resultado de la resistencia obtenida en un hormigón a los 28 días se considera equivalente a un hormigón de 90 días, podemos observar que las resistencias aumentan, pero que esta diferencia tiende a ser la misma que existe en diferentes probetas de un mismo ensayo. Es decir, la mejora es leve y sólo se aprecia en las probetas cilíndricas.

Si uno analiza la granulometría optimizada evaluada a los 90 días se puede observar que el gráfico de porcentaje retenido, no cumple los límites propuestos debido a que existe concentración de los áridos en los tamices de mayor diámetro. Las mallas de 1" y ¾" retienen gran parte del peso del material combinado, específicamente, la gravilla utilizada, la cual posee la mitad de su peso retenido sólo en una malla.

Para el diseño realizado, se trató de mejorar la distribución en la banda media del agregado combinado, ya que la distribución sobre el tamiz 3/8" no afecta en el gráfico de grosor si se modifica correctamente.

Ahora, si esta granulometría que no posee buena distribución en los tamices nombrados, sí posee un buen desempeño al momento de ensayar las probetas, es porque el diseño y la mezcla tienen una buena distribución del material intermedio y fino. Es decir, es el material intermedio-fino el más importante al momento de evaluar el desempeño mecánico de un hormigón estructural optimizado para pavimentos, y probablemente a la mayoría de los usos del hormigón sin dejar de lado los aspectos más importantes como la relación agua cemento. El buen resultado mecánico de la primera mezcla se debe a que es el material fino el que llena los vacíos que comúnmente llena el cemento, utilizando de esa manera el cemento para su uso correcto y no como una arena lo cual se da comúnmente en mezclas sin optimizar.

En cuanto a los resultados obtenidos en las probetas prismáticas, podemos decir que no existe una correlación confiable que pueda determinar una relación entre hormigones de diferentes edades, aún así, éstas muestran un desempeño favorable al igual que en los casos anteriores.

6 Conclusiones y comentarios

6.1 Conclusiones

Como resultado de los ensayos realizados, se puede concluir que la metodología de optimización de granulometría contribuye en el aumento de las propiedades mecánicas evaluadas, la resistencia a la compresión y a la flexotracción, lo cual confirma lo presentado por Shilstone [1], cumpliendo así el objetivo general planteado en el presente trabajo de título.

Los porcentajes de variación de las resistencias están entre el 3,4% para compresión y 5,0%, donde la flexión es la propiedad más afectada, y dado que el único parámetro modificado es la distribución de los áridos, se puede concluir que es éste el motivo por el cual se produce este efecto.

De esta manera es posible decir que la resistencia a la compresión y flexión del hormigón dependen principalmente de la relación agua cemento, a la distribución de la granulometría y método de proporción.

Es posible destacar que la mezcla optimizada por método Shilstone logra tensiones de rotura a los 90 días superiores a 5 [MPa] a flexotracción, considerando el uso de sólo 320 [kg/m³] de cemento. Esto está muy por debajo de las mezclas de hormigón entregadas hoy por los proveedores locales que para este nivel de resistencia consideran al menos 390 [kg/m³] de cemento alta resistencia.

La aplicación del Método Shilstone no sólo mejora las propiedades físicas de la mezcla endurecida, sino que permite ahorrar del orden de un 20% la cantidad de cemento a utilizar. Una mezcla tipo Shilstone resulta ser más densa, logrando hormigones no sólo más resistentes, sino que además de mayor durabilidad, impermeabilidad y resistencia a condiciones agresivas que afectan el cemento [18]

Independiente del elemento aglomerante que posee un material compuesto como el hormigón o el asfalto, es necesario que el esqueleto estructural, en este caso el material compuesto por la combinación de áridos, posea buenas características estructurales, y eso es lo que logra la metodología de Shilstone, aprovechar la resistencia que posee cada uno de los áridos, mediante la generación de más puntos de apoyo, de una organización óptima del agregado, de la disminución de los vacíos que llena el mortero y un aumento del contacto entre las partículas. El método de optimización Shilstone aprovecha las cualidades resistentes de los áridos, las cualidades aglomerantes del mortero y las cualidades resistentes del cemento generando un hormigón mucho mejor al que se produce actualmente en la V región.

A través del desarrollo del diseño de la optimización, se observó que el diseño de la mezcla es un proceso mucho más complejo, donde el método de proporción, ensayos y selección de la

granulometría son sólo una parte de él. La manera correcta o completa del proceso de diseño del hormigón debería ser similar al proceso que se tiene actualmente con el asfalto, en el que los áridos son una parte importante, y donde se podrían incluir otros detalles como la forma y textura de los áridos, temas que actualmente son de importancia entre investigadores del área.

El proceso de optimización de la granulometría necesita que se realicen constantes ensayos a los materiales como parte del diseño de la mezcla, como la evaluación de la trabajabilidad de la mezcla a utilizar, la segregación y efecto de la calidad de vibrado para ver si estos afectan los parámetros obtenidos antes de realizar la confección definitiva del hormigón. También es necesario que se verifiquen el efecto de pequeñas variaciones de los parámetros en caso de que las condiciones locales no permitan cumplir totalmente con la metodología de optimización, como disminuciones de la resistencia u otra propiedad en estado fresco del hormigón. Finalmente se debe verificar la resistencia obtenida con el diseño previo de la mezcla, y durante la elaboración de la mezcla en terreno se debe ir verificando si estos valores se mantienen utilizando los materiales con las condiciones en terreno.

Por otro lado, al comparar dos mezclas optimizadas, se puede concluir que dentro de la metodología Shilstone, la herramienta más importante es el gráfico de grosor vs trabajabilidad, siendo los otros dos gráficos una manera de verificar el comportamiento de la granulometría de la mezcla combinada, en las cuales, se puede aplicar criterio en el diseño junto con el análisis mediante ensayos en laboratorio, como recomienda la metodología de optimización. Esto se refleja en estudios actuales del tema que incluyen líneas de tendencia para el porcentaje retenido en vez de limitarlo a un 8% y 18%, lo cual indica que el método aún tiene un margen de mejora y que la optimización de las mezclas aún puede ser más eficaz [31] [32].

Al aplicar el método de optimización de una granulometría se puede destacar que cada herramienta tiene un objetivo determinado, ya sea para el diseño o control del hormigón en sus diferentes estados. El aporte observado del gráfico del coeficiente de grosor y el coeficiente de trabajabilidad Shilstone muestra algo que hasta el día no hoy no se tenía. Se ha podido aprender que es una manera de relacionar la cantidad de material fino con el grueso, un medio para relacionar la cantidad de cemento por mezcla con la cantidad de finos y es una gran herramienta para controlar la banda central de la granulometría donde se tienen muchas falencias en las mezclas. El diseño realizado muestra que la mezcla optimizada no separa la granulometría de la dosificación y de los ensayos, todos estos aspectos van de la mano interactuando uno con otro con el fin de determinar el hormigón más óptimo desde el punto de vista estructural y constructivo. Este gráfico del coeficiente de grosor vs coeficiente de trabajabilidad permite disminuir la cantidad de cemento para reemplazarlo por arenas y material fino. El gráfico de factor 0.45, utilizado en el área del diseño asfáltico, ha sido modificado en la optimización del hormigón, lo que ha permitido observar que el enfoque de la optimización de mejorar el diseño y el control de las mezclas de hormigón es un método muy similar

al utilizado en el asfalto. La información entregada ayuda a identificar la distribución general de todo el agregado combinado, permite observar en que zonas se posee mayor o menor porcentajes de material retenido y muestra la tendencia que posee el agregado combinado. La variación que hay de un tamiz a otro de manera más precisa, se pudo identificar en el gráfico de porcentaje retenido del agregado, el cual ha sido delimitado por diferentes estudios en un mínimo de 8% y un máximo de 18% en los áridos de tamaño medio. La utilización de esta herramienta permitió identificar cuáles son los tamaños de áridos que no están tan presentes en la granulometría, además se observó que siempre sigue una tendencia que no es tan rígida como los límites de 8 y 18% y que puede darse el caso de que una mezcla cumpla con el gráfico de factor 0.45 y no cumpla con el gráfico de porcentaje retenido. Esto demuestra que ambos gráficos enfocados en la granulometría se complementan representando diferente información de un mismo material.

El optimizar la granulometría incluye definir factores importantes y determinantes para el hormigón los cuales no pueden ser ignorados. Por ejemplo, una variación de 58% de material que pasa el tamiz 3/8" en vez de 54%, puede generar una disminución en el porcentaje del coeficiente de grosor de 6% que, en algunos casos, no cumpla con el gráfico de Shilstone. Esto significa que, en el ámbito constructivo, se puede requerir de un control más completo a la hora de elaborar el hormigón, solicitando granulometrías exactas, o de la inclusión de infraestructura más compleja para la confección del hormigón, como la inclusión de plantas de áridos propias, que pesen y distribuyan de manera exacta la cantidad de material por tamiz, ya que, si este valor es diferente al de diseño, los resultados pueden ser muy diferentes.

Finalmente, a lo largo del desarrollo del trabajo de título, se pudo describir el método Shilstone, diseñando una mezcla de hormigón mediante la optimización de la granulometría, realizando ensayos de laboratorio en tres diferentes situaciones, y realizar un análisis comparativo entre las muestras utilizadas, cumpliendo así con los objetivos específicos planteados en este trabajo.

6.2 Comentarios

Además de los beneficios descritos en el trabajo de título, hay elementos, los cuales, aunque no se analizaron directamente, si se pudieron observar en el desarrollo de la obra al aplicar una mezcla optimizada.

Éstos consisten en beneficios constructivos, específicamente:

- No fue necesario el uso de moldajes para las losas de hormigón, esto por motivo de la compactación lograda al tener una mejor distribución de partículas y una mejor adherencia.
- La trabajabilidad de la mezcla permitió un avance mucho más rápido y continuo de la obra al poder contar con maquinaria especializada en mezclas optimizadas.
- La terminación del hormigón fue mejor y necesito menos intervención de mano de obra.



Figura 6.1 Construcción de Losas Optimizadas Obra Camino la Pólvora, 2016.

En resumen, los beneficios no sólo fueron en el diseño, sino también en el proceso constructivo en general y finalmente en el costo de la ejecución de la obra.

7. Bibliografía

1. Shilstone, J. M. Sr. (1990), "*Concrete Mixture Optimization*", Concrete International: Design and Construction, Vol 12, No 6, June 1990, pág. 33-39.
2. Shilstone, J. M. Sr. and Shilstone J. M. Jr. (2002) "Performance-Based Concrete Mixtures and Specifications for Today", Concrete International, Febrero 2002, pág. 80-83.
3. Manual de Carreteras (2016), "Instrucciones y Criterios de Diseño", Volumen 3, MOP-DGOP-Dirección de Vialidad, Chile 2016.
4. Manual de Carreteras (2016), "Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control", Volumen 8, MOP-DGOP-Dirección de Vialidad, Chile 2016.
5. Quiroga, Pedro (2003). Nel "*The Effect of The Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete*", Dissertation Presented for the Degree of Doctor of Philosophy, The University of Texas at Austin, Diciembre 2003.
6. Polat Ryza, Mohabbi Yadollahi Mehrzad, Sagsoz A Emre y Arasan Seracettin (2013), "*The Correlation Between Aggregate Shape and Compressive Strength of Concrete: Digital Image Processing Approach*", International Journal of Structural and Civil Engineering Research, Vol 2, No 3, August, 2013.
7. Bhattacharya Arka, Ray Indrajit and Davalos Julio (2008), "*Effects of Aggregate Grading and Admixture/Filler on Self-Consolidating Concrete*", The Open Construction and Building Technology Journal, 2, pág. 89-95.
8. Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. y Tanesi J. (2008). "Diseño y Control de Mezclas de Concreto". Ed., Asociación de Cemento Portland, México.
9. Bascoy, Daniel y Fornasier, Gastón (2002). "Ese Material Llamado Hormigón", Capítulo 8, Hormigón en estado Fresco. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
10. Becker, E. (2004). "Durabilidad del Hormigón, Comportamiento del Hormigón Estructural Durante su Vida de Servicio. Publicación Loma Negra S.A. pág. 1-60.
11. Technical Report N°22: "Non-Structural Cracks in Concrete", The Concrete Society, 4ta. Ed., 2010.
12. Norma Chilena 170 of. 2016, "Hormigón – Requisitos Generales", Instituto Nacional de Normalización, Chile.
13. Norma Chilena 148 of. 1968, "Cemento – Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales", reimpresión 1999, Instituto Nacional de Normalización, Chile.
14. Koehler, E. P., y Fowler, D. W. (2007). "Role of Aggregates in Self-Consolidating Concrete", ICAR Report 108-F, *International Center for Aggregates Research*, Austin, TX.
15. Norma Chilena 163 of. 2013, "Áridos Para Morteros y Hormigones – Requisitos", Instituto Nacional de Normalización, Chile.
16. Galloway, J. E. Jr. (1994), "Grading, Shape and Surface Properties", American Society for Testing and Materials Special Technical Publication No. 169c, Philadelphia, PA, 1994, pág. 401-410.

17. Norma Chilena 1789 of. 1986, "Hormigón – Determinación de la Uniformidad Obtenida en el Mezclado del Hormigón Fresco, Instituto Nacional de Normalización, Chile.
18. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. "Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State of the Practice Manual". National Concrete Pavement Technology Center. Iowa State University. FHWA Publication No.HIF – 07 – 004(2007). Iowa.
19. Norma Chilena 157 of. 1967, "Cemento – Ensayo de Expansión en Autoclave", Instituto Nacional de Normalización, Chile.
20. Legg F. E. Jr. (1998), "Chapter 2: Aggregates", Concrete Construction Handbook, Dobrowolski J., 4a. Ed., New York, McGraw Hill, 1998.
21. Rasmussen, R. O. (2003), "Computer-Based Guidelines for Job-Specific Optimization of Paving Concrete", International Center for Aggregates Research 11th Annual Symposium: Aggregates – Asphalt Concrete, Bases and Fines, 2003.
22. Larrard, F. (1999), "Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach", London, 1999.
23. Quiroga P. N. and Fowler D. W. (2004), "Guidelines for Proportioning Optimized Concrete Mixture with High Microfines", International Centers for Aggregates Research Report 104-2, Austin TX, 2004.
24. ACI 211.1-91 (2002), "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", ACI Committee 211, 2002.
25. Iowa Department of Transportation (2007), Aggregates Proportioning Guide for PC Concrete Pavement.", Ames, IA, Iowa Department of Transportation, 2007, pág. 8.
26. AASHTO (1998), "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 4th Edition, Supplement", American Concrete Institute and Transportation Officials, Washington D.C., 1998.
27. Abrams, D. A. (1918), "Design of Concrete Mixtures", Lewis Institute, Structural Materials Research Laboratory N°1, PCA LS001, Chicago, 1918.
28. Nilson, Arthur H (1999). "Diseño de Estructuras de Concreto". 12^a Ed. Mc Graw Hill, (1999). Colombia.
29. Guerrín, A., Lavour, R. C., Lecroq, Ph (1978). "Hormigón Armado, Tratado Práctico". Ed. Técnicos Asociados S. A., Barcelona 1978.
30. "Instrucción del Hormigón Estructural (EHE-2008)", Boletín Oficial del Estado, Suplemento del Número 203, Ministerio de la Presidencia, España, julio 2008.
31. Taylor, Peter. "Blended Aggregates for Concrete Mixture Optimization: Best Practices for Joined Concrete Pavements". FHWA-HIF-15-019. U. S. Department of Transportation (2015). Washington DC.
32. Ley, Tyler. "Aggregate Gradations for Concrete Pavement Mixtures". Road Map Track, Octubre 2014.
33. Neville, A. M. (1996), "Properties of Concrete", New York, NY: John Wiley and Sons.

8. Anexos

8.1 Compuestos del Cemento (anexo ítem 2.3)

El cemento es uno de los principales compuestos del hormigón. Está regido por la norma chilena Nch148 of. 1968 "Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales", está compuesto por:



Donde:

- Clínquer: Es el producto que está constituido principalmente por, silicatos cálcicos. Se obtiene por calentamiento hasta una temperatura que no puede ser inferior a la temperatura de fusión incipiente de una mezcla homogénea finamente molida en proporciones adecuadas, formada principalmente por óxidos de calcio (CaO) y silicio (SiO₂) y por óxidos de aluminio (Al₂O₃) y fierro (Fe₂O₃) en proporciones menores.
- Yeso : material que se adiciona en cantidades pequeñas para regularizar el tiempo de fraguado.
- Adiciones: corresponde principalmente a puzolanas y escorias
 - Puzolana: material silíceo-aluminoso que, aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando está finamente dividido y en presencia de agua, por reacción química con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente.
 - Escorias: corresponde a la escoria granulada de alto horno, y es el producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento de mineral de hierro en un alto horno. Este producto tiene como constituyentes principales silicatos y sílico-aluminatos de calcio y su composición química es tal que cumple con el siguiente requisito:

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1$$

Ecuación 8.1

De acuerdo a la norma 148 of. 1968, el cemento se clasifica en:

- Cementos Portland: cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado

- Cementos Siderúrgicos: De acuerdo a la dosis de escoria que posee el cemento se dividen en:
 - Cemento Portland Siderúrgico: Cemento que en su composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado
 - Cemento Siderúrgico: Cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción comprendida entre el 30% y el 75% del producto terminado.

- Cementos Puzolánicos: De acuerdo a la dosis de puzolana que posee el cemento se dividen en:
 - Cemento Portland Puzolánico: corresponde al cemento en la cual su composición de puzolana no es superior al 30% en peso del producto terminado.
 - Cemento Puzolánico: cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción comprendida entre el 30% y el 50% en peso del producto terminado.

- Cementos con agregado tipo A: De acuerdo a la dosis de agregado tipo A que posee el cemento se dividen en:
 - Cemento Portland con agregado tipo A: cemento del cual en su composición entrará agregado tipo A, en una proporción no superior al 30% del peso terminado.
 - Cemento con agregado tipo A: cemento que en su composición entrará agregado tipo A en una proporción comprendida entre el 30% y el 50% del producto terminado.

De acuerdo a la Nch. 148, los porcentajes de cada compuesto químico para los cementos ya definidos son los siguientes:

Tabla 8.1 Requisitos químicos para los cementos

	Cemento Portland	Cementos siderúrgicos		Cementos puzolánicos		Cementos con agregado tipo A	
		Portland siderúrgico	Siderúrgico	Portland puzolánico	Puzolánico	Portland con agregado tipo A	Con agregado tipo A
Pérdida con calcinación máxima (%)	3,0	5,0	5,0	4,0	5,0	7,0	9,0
Residuo insoluble máximo (%)	1,5	3,0	4,0	30,0	50,0	21,0	35,0
Contenido de SO_3 máximo (%)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Contenido de MgO máximo (%)	5,0	-	-	-	-	-	-
Contenido de Mn_2O_3 máximo (%)	-	2,0	2,0	-	-	-	-

Fuente: Nch. 148.of 68

Las propiedades físicas y mecánicas del cemento son:

9. Expansión en autoclave: la cual debe ser menor al 1% y se determinará de acuerdo a la Nch157.

10. Tiempo de fraguado: se determina de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 8.2 Requisitos físicos mecánicos de los cementos

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	Inicial mínimo min	Final máximo h	7 días kg/cm^2	28 días kg/cm^2	7 días kg/cm^2	28 días kg/cm^2
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta resistencia	45	10	250	350	45	55

Fuente: NCh148of68

8.2 Diseño del Pavimento (anexo ítem 3.5)

8.2.1 Determinación del espesor

Una vez obtenidos los datos requeridos de entrada, se procede a obtener el espesor. Este se obtiene mediante cuatro pasos, dos en los que se determina la tensión de carga, la verificación de escalonamiento y la verificación de carga por esquina.

8.2.1.1 Tensión de Tracción Máxima en la Losa con Carga de Borde, Considerando el Efecto de la Temperatura:

a) Ecuaciones:

La tensión de tracción máxima en la losa se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma'_t = \sigma_l \cdot TB \cdot F \cdot \left(1,0 + \left(\frac{5}{9} \right) \cdot b \cdot \Delta T(+) \right) [MPa]$$

Ecuación 8.2

Donde:

σ_l : Tensión de tracción máxima en la losa de hormigón para una condición de carga de borde, en MPa, dada por la ecuación 3.14.

$$\sigma_l = \frac{80012,743}{D^2} \cdot \left[4,227 - 4,547 \cdot \left(\frac{180}{l} \right)^{0,2} - 0,00158 \cdot \left(\frac{E_b \cdot H_b}{k} \right)^{0,5} - 0,0308 \cdot \left(H_b \cdot \left(\frac{E_b}{E_c} \right)^{0,75} \right)^{0,5} \right]$$

Ecuación 8.3

El valor de l se obtiene:

$$l = 5,622 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_c \cdot D^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} [mm]$$

Ecuación 8.4

Donde:

- D : Espesor de losa [mm].
- E_c : Módulo de elasticidad del hormigón [MPa].
- E_b : Módulos de elasticidad de la base [MPa].
- H_b : Espesor de la base [mm].
- k : Módulo de reacción de la subrasante [MPa/m].
- μ : Razón de Poisson para el hormigón, (0,15).

- TB : Factor de ajuste por tipo de berna.
 F : Factor de ajuste por fricción dado por la ecuación 3.15.

$$F = 1.117 - 2.457 \cdot 10^{-7} \cdot D \cdot E_b - 4.549 \cdot 10^{-4} \cdot D + 9.1 \cdot 10^{-5} \cdot E_b - 0.000315 \cdot f$$

Ecuación 8.5

- f : Coeficiente de fricción entre la losa y la base dado por la tabla 3.6.
 b : Factor de ajuste por longitud de losa dado por la ecuación 3.16.

$$\log b = -1.944 + 2.279 \cdot \frac{D}{l} + 91.7 \cdot \frac{L}{l} - 75718996.95 \cdot \frac{D^2}{k \cdot l^4} + \left(\frac{0.731}{l}\right) \cdot \left(\frac{E_b \cdot H_b^{1.5}}{k}\right)^2 - 118.872 \cdot \frac{D^2}{k \cdot l^2} - 8.711 \cdot 10^{10} \cdot \frac{D^3 \cdot L}{k \cdot l^6}$$

Ecuación 8.6

- L : Distancia entre juntas de contracción [m].

- $\Delta T(+)$: Diferencial efectivo de temperatura positivo. Se define como la diferencia Entre la temperatura de la fibra superior e inferior de la losa, en °C, dado por La ecuación 3.17:

$$\Delta T(+) = 12.33 - \frac{2385.715}{D} + 0.707 \cdot WIND + 0.596 \cdot TEMP - 5.924 \cdot 10^{-4} \cdot PERCIP$$

Ecuación 8.7

- WIND : Velocidad media anual del viento [nudos]
 TEMP : Temperatura media anual del ambiente [°C]
 PERCIP : Precipitación media anual [mm]

b) Cálculo:

El primer valor calculado es el de la ecuación 3.14:

$$l = 5,622 \cdot \sqrt{\frac{E_c \cdot D^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} = 5,622 \cdot \sqrt{\frac{29000 \cdot 280^3}{12 \cdot (1 - 0.15^2) \cdot 44.14}} = 1052.76[mm]$$

el diseño se obtiene de manera iterativa, planteando valores tentativos de espesor de losa y base. El diseño fue realizado de esa manera y se presenta con los valores finales que cumplen el diseño.

- Espesor losa : 280[mm]

Espesor base : 300[mm]

Con estos valores se puede desarrollar la ecuación 3.13:

$$\sigma_l = \frac{80012,743}{D^2} \cdot \left[4,227 - 4,547 \cdot \left(\frac{180}{l}\right)^{0,2} - 0,00158 \cdot \left(\frac{E_b \cdot H_b}{k}\right)^{0,5} - 0,0308 \cdot \left(H_b \cdot \left(\frac{E_b}{E_c}\right)^{0,75}\right)^{0,5} \right]$$

$$\sigma_l = \frac{80012,743}{280^2} \cdot \left[4,227 - 4,547 \cdot \left(\frac{180}{1052,76}\right)^{0,2} - 0,00158 \cdot \left(\frac{180 \cdot 300}{44,14}\right)^{0,5} - 0,0308 \cdot \left(300 \cdot \left(\frac{180}{29000}\right)^{0,75}\right)^{0,5} \right]$$

$$\sigma_l = 0.917[MPa]$$

La ecuación 3.15 queda:

$$F = 1.117 - 2.457 \cdot 10^{-7} \cdot D \cdot E_b - 4.549 \cdot 10^{-4} \cdot D + 9.1 \cdot 10^{-5} \cdot E_b - 0.000315 \cdot f$$

$$F = 1.117 - 2.457 \cdot 10^{-7} \cdot 280 \cdot 180 - 4.549 \cdot 10^{-4} \cdot 280 + 9.1 \cdot 10^{-5} \cdot 180 - 0.000315 \cdot 1.4$$

$$F = 0.993$$

La ecuación 3.16:

$$\log b = -1.944 + 2.279 \cdot \frac{D}{l} + 91.7 \cdot \frac{L}{l} - 75718996.95 \cdot \frac{D^2}{k \cdot l^4} + \left(\frac{0.731}{l}\right) \cdot \left(\frac{E_b \cdot H_b^{1.5}}{k}\right)^2 - 118.872 \cdot \frac{D^2}{k \cdot l^2} - 8.711 \cdot 10^{10} \cdot \frac{D^3 \cdot L}{k \cdot l^6}$$

$$\log b = -1.944 + 2.279 \cdot \frac{280}{1052.76} + 91.7 \cdot \frac{175}{1052.76} - 75718996.95 \cdot \frac{280^2}{44.14 \cdot 1052.76^4} + \left(\frac{0.731}{1052.76}\right) \cdot \left(\frac{180 \cdot 300^{1.5}}{44.14}\right)^2 - 118.872 \cdot \frac{280^2}{44.14 \cdot 1052.76^2} - 8.711 \cdot 10^{10} \cdot \frac{280^3 \cdot 175}{44.14 \cdot 1052.76^6}$$

$$\log b = -1.44$$

$$b = 0.036$$

La ecuación 3.17:

$$\Delta T(+) = 12.33 - \frac{2385.715}{D} + 0.707 \cdot WIND + 0.596 \cdot TEMP - 5.924 \cdot 10^{-4} \cdot PERCIP$$

$$\Delta T(+) = 12.33 - \frac{2385.715}{280} + 0.707 \cdot 1.3 + 0.596 \cdot 13.5 - 5.924 \cdot 10^{-4} \cdot 649.4$$

$$\Delta T(+) = 12.39[^\circ C]$$

Una vez obtenidos todos los factores, se procede a determinar la tensión de tracción máxima de la losa de hormigón para una condición de carga de borde de acuerdo a la ecuación 3.12:

$$\sigma'_t = \sigma_l \cdot TB \cdot F \cdot \left(1,0 + \left(\frac{5}{9} \right) \cdot b \cdot \Delta T(+) \right) [MPa]$$

$$\sigma'_t = 0,917 \cdot 0,92 \cdot 0,993 \cdot \left(1,0 + \left(\frac{5}{9} \right) \cdot 0,036 \cdot 12,39 \right) [MPa]$$

$$\sigma'_t = 1,047 [MPa]$$

8.2.1.2 Tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, considerando efecto de temperatura, en las condiciones de prueba AASHO.

a) Ecuaciones:

Esta tensión se determina a través de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_t = \sigma_{l(AASHO)} \cdot F_{AASHO} \cdot \left(1,0 + \left(\frac{5}{9} \right) \cdot b_{AASHO} \cdot \Delta T(+)_{AASHO} \right)$$

Ecuación 8.8

$$\sigma_{l(AASHO)} = \frac{80012,743}{D^2} \cdot \left[4,125 - \left(\frac{7,286}{D^{0,15}} \right) \right]$$

Ecuación 8.9

Donde:

$$F_{AASHO} = 1,192 - 0,000497 \cdot D$$

Ecuación 8.10

$$\log b_{AASHO} = -1,944 + 0,134 \cdot D^{0,25} - 0,0137 \cdot D^{0,5} + \frac{29,0679}{D^{0,75}} - \frac{30,15}{D} - \frac{546,368}{D^{1,5}}$$

Ecuación 8.11

$$\Delta T(+)_{AASHO} = 25,308 - \frac{2527,859}{D}$$

Ecuación 8.12

b) Cálculo:

Dado que se tiene el espesor de la losa se calculan las ecuaciones 3.19 a la 3.22:

$$\sigma_{l(AASHO)} = \frac{80012.743}{D^2} \cdot \left[4.125 - \left(\frac{7.286}{D^{0.15}} \right) \right] = \frac{80012.743}{280^2} \cdot \left[4.125 - \left(\frac{7.286}{280^{0.15}} \right) \right]$$

$$\sigma_{l(AASHO)} = 1.016 [MPa]$$

$$F_{AASHO} = 1.192 - 0.000497 \cdot D = 1.192 - 0.000497 \cdot 280$$

$$F_{AASHO} = 1.053$$

$$\log b_{AASHO} = -1.944 + 0.134 \cdot D^{0.25} - 0.0137 \cdot D^{0.5} + \frac{29.0679}{D^{0.75}} - \frac{30.15}{D} - \frac{546.368}{D^{1.5}}$$

$$\log b_{AASHO} = -1.944 + 0.134 \cdot 280^{0.25} - 0.0137 \cdot 280^{0.5} + \frac{29.0679}{280^{0.75}} - \frac{30.15}{280} - \frac{546.368}{280^{1.5}}$$

$$\log b_{AASHO} = -1.425$$

$$b_{AASHO} = 0.038$$

$$\Delta T(+)_AASHO = 25.308 - \frac{2527.859}{D} = 25.308 - \frac{2527.859}{280}$$

$$\Delta T(+)_AASHO = 16.28 [^{\circ}C]$$

De esta manera, el valor de la tensión de tracción AASHO de la ecuación 3.18 queda:

$$\sigma_t = \sigma_{l(AASHO)} \cdot F_{AASHO} \cdot \left(1.0 + \left(\frac{5}{9} \right) \cdot b_{AASHO} \cdot \Delta T(+)_AASHO \right)$$

$$\sigma_t = 1.016 \cdot 1.053 \cdot \left(1.0 + \left(\frac{5}{9} \right) \cdot 0.038 \cdot 16.28 \right)$$

$$\sigma_t = 1.43 [MPa]$$

8.2.1.3 Verificación de escalonamiento

a) Ecuaciones:

Para la verificación de escalonamiento se utilizan las ecuaciones para pavimentos sobre bases granulares las cuales son las siguientes:

$$ESCAL_{GR,BAL} = W_{18}^{0,461188} \cdot (0,006742 \cdot N5 - 0,125288 \cdot GR - 0,148135 \cdot BAL + DEFLEX^{0,369655} + 0,457194 \cdot DREN - 0,373423)$$

Ecuación 8.13

Donde:

ESCAL _{GR,BAL}	:	Escalonamiento promedio de juntas transversales (mm).
W ₁₈	:	Ejes equivalentes acumulados (millones).
N5	:	Número de vías con precipitación mayores a 5 (mm).
DEFLEX	:	Deflexión de esquina de la losa de acuerdo a ecuación 3.24.
DREN	:	0 si existe dren; 1 en cualquier otro caso.
GR	:	1 si es base granular; 0 en cualquier otro caso.
BAL	:	1 si es base abierta ligada; 0 en cualquier otro caso.

$$DEFLEX = \left(\frac{P}{k \cdot l^2} \right) \cdot \left(1,1 - \frac{0,88 \cdot a \cdot \sqrt{2}}{l} \right)$$

Ecuación 8.14

Donde:

P	:	Carga de rueda, 4086 kg.
a	:	Radio del área de carga, 14.37 cm.
l	:	Radio de rigidez relativa sistema losa fundación, cm. Se obtiene dividiendo por 10 la ecuación 3.14.
k	:	Módulo de reacción de los subrasante [MPa/m].

b) Cálculo:

la condición de diseño es que el valor de escalonamiento no supere los 5 mm.

En primer lugar, los coeficientes utilizados son:

DREN	=	1
GR	=	1

PRECIP : Precipitación media anual [mm].

También se debe determinar el gradiente negativo de temperatura ($\Delta T(-)_2$) equivalente producto de la curvatura por construcción y humedad. El valor se define como:

0 a 0.044 [$^{\circ}\text{C}/\text{mm}$] = Para clima húmedo
(precipitación media anual ≥ 760 [mm]).

0.022 a 0.066 [$^{\circ}\text{C}/\text{mm}$] = Para clima seco
(precipitación media anual < 760 [mm]).

Y por último:

$$\Delta T(-) = \Delta T(-)_1 + \Delta T(-)_2$$

Ecuación 8.16

Con el gradiente de temperatura se obtiene la tensión de esquina del siguiente gráfico:

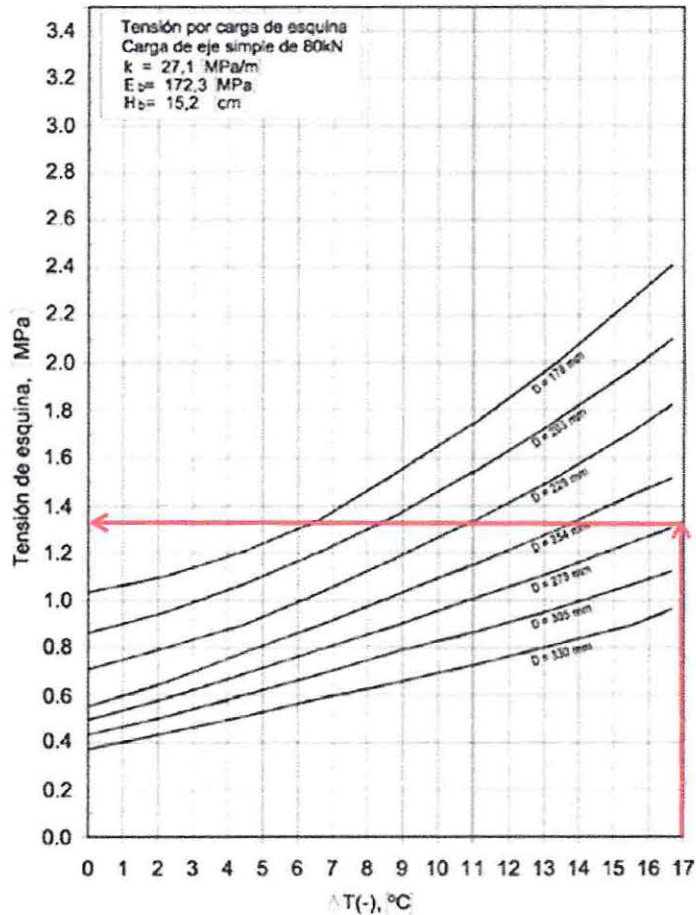


Figura 8.1 Gráfico cálculo tensión de esquina, Manual de Carreteras [3].

b) Cálculos:

Los valores de los coeficientes utilizados para Valparaíso son:

WIND	=	1.3 [nudos]
TEMP	=	13.5 [°C]
PRECIP	=	649.4 [mm]

Con estos valores:

$$\Delta T(-)_1 = -28.62 + \frac{2377.897}{D} + 0.817 \cdot WIND + 0.227 \cdot TEMP + 2.884 \cdot 10^{-4} \cdot PRECIP$$

$$\Delta T(-)_1 = -28.62 + \frac{2377.897}{280} + 0.817 \cdot 1.3 + 0.227 \cdot 13.5 + 2.884 \cdot 10^{-4} \cdot 649.4$$

$$\Delta T(-)_1 = -15.81 [^{\circ}C]$$

$$\Delta T(-)_2 = -3.753 [^{\circ}C]$$

$$\Delta T(-) = \Delta T(-)_1 + \Delta T(-)_2 = -15.81 - 3 - 753 = -19.57 [^{\circ}C]$$

De acuerdo al gráfico de la figura 3-1, el valor de $\sigma_{t,esquina}$, es igual a:

$$\sigma_{t,esquina} = 1.33 [MPa] < 1.43 [MPa] = \sigma_t$$

Lo cual cumple la condición de carga de esquina.

De esta manera se verifica que el diseño del pavimento cumple con todas las condiciones de diseño de acuerdo al Manual de Carreteras [16] Volumen 3.