

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



ANALISIS ANOVA DEL EFECTO DE LA GRANULOMETRIA DENTRO DEL
GRAFICO DE SHILSTONE EN EL DESEMPEÑO GLOBAL DE LOS
PAVIMENTOS DE HORMIGON.

BLAS ALEJANDRO RAMÓN LARRAIN BOFILL

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Javier Castro Sepúlveda

Profesor Co-referente
Carlos Wahr Daniel

Julio de 2019

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



ANALISIS ANOVA DEL EFECTO DE LA GRANULOMETRIA DENTRO DEL
GRAFICO DE SHILSTONE EN EL DESEMPEÑO GLOBAL DE LOS
PAVIMENTOS DE HORMIGON.

Memoria de titulación presentada por
BLAS ALEJANDRO RAMÓN LARRAIN BOFILL

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Javier Castro Sepúlveda

Profesor Co-referente
Carlos Wahr Daniel

Julio de 2019

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quiero agradecer a mis padres por todo el amor y esfuerzo que han puesto en hacer de mí quien soy. A mi mamá, por nunca abandonar la difícil tarea de criarnos con un amor incondicional, ¡cómo te entiendo ahora! A mi papito lindo, ¿qué haría sin ti? Gracias por la paciencia que me has tenido en este cierre de ciclo más extenso de lo que hubiésemos querido. Gracias por siempre estar. Son lo máximo, no puedo estar más orgulloso y agradecido de los papás que me han tocado.

A mi linda familia. ¡Amor mío, como nos ha costado! Mil gracias por tu entrega, sacrificio y amor que me das día a día y de manera incondicional. Siempre creíste en mí, varias veces me levantaste cuando yo simplemente quería dejar todo de lado. Eres lo máximo, nuestros caminos se cruzaron para nunca separarse.

A mis pequeños hijos, Gaspar, Blas, Antonieta y Jacinta ¡mis motores de vida, como los amo! Aún no se dan cuenta, pero me han hecho crecer mucho.

A mis hermanitos, gracias por hacer de mi niñez plena, si bien, después cada uno tomo su camino, siempre los traigo en mi pensamiento y corazón (aunque no los llame).

No puedo dejar de agradecer a mi abuelita linda, por su ayuda y preocupación en silencio, especialmente en esta etapa de mi vida. Un beso gigante, siempre recuerdo mis idas a almorzar a su casa en las ventanas grandes que se me formaban, siempre con sus sabios consejos. Hace poco gané un angelito.

A mi profesor guía Javier Castro. Por su infinita paciencia, por creer y confiar en mí, a pesar del tiempo que me tomó concluir este proyecto.

¡A mis socias Ñañito y Parrita, Como los quiero cabrohs! Hicieron de mi paso por la universidad un recuerdo inolvidable.

También agradecer profundamente a mi segunda familia, mis suegros Tía Gema, Mercedes y Juan, a mis cuñados Ignacia, Cristobal y Juan Pablo que siempre estuvieron alentándome para seguir y cerrar este ciclo. Los quiero mucho, gracias por todo. Quiero detenerme de manera especial en Cris, sin duda sabemos cómo nos costó este proceso, agradecer tus sabios consejos y amistad.

A ti Eric, fundamental en este cierre de ciclo, no dimensionas toda la ayuda que recibí de ti.

No quiero dejar de agradecer a los Profesores de Cátedra, que hicieron enamorarme día a día de esta linda carrera.

Finalmente a todos mis amigos y compañeros que forme por mi paso por esta hermosa universidad, no quiero detenerme en nadie, solo decir que los recuerdo con mucho cariño. De seguro nos cruzaremos de nuevo, como ya me ha pasado con muchos de ustedes.

*A mí querida Abuela
A mis Padres
A ti Camila, por tanto amor
A mis hijos.*

RESUMEN

La especificación para el diseño de hormigones está migrando desde una lógica prescriptiva a una basada en desempeño. Es así como se ha plasmado en la nueva normativa chilena NCh 170:2016, donde se incluyen varios requerimientos de desempeño, en particular para la durabilidad del concreto, exigiendo que el proyectista defina el grado de exposición que tendrá la estructura para condiciones internas y externas.

Si bien la normativa se actualizó, deja de lado aspectos importantes que influyen en el desempeño del hormigón, por ejemplo, la importancia y los beneficios de los áridos dentro de la mezcla, ya que independientemente del sistema de agregados utilizado, para asegurar la calidad y el comportamiento del concreto, se fija un contenido mínimo de cemento, y una relación agua – cemento máxima. Entonces, si bien las mezclas están tendiendo a ser por desempeño, se pone poca atención al efecto de la granulometría en el comportamiento global que tendrá el hormigón.

Por la misma razón, en Chile se han incorporado nuevos requerimientos que consideran los efectos de la granulometría en las especificaciones de mezclas para pavimentos de hormigón. Uno de los requerimientos que se está incorporando en proyectos licitados por la Dirección de Vialidad, es que la granulometría de los áridos sea optimizada mediante el Gráfico de Shilstone, ejemplo de lo anterior es el camino la pólvora Ruta Ch60 desarrollado en la Región de Valparaíso.

El objetivo de este trabajo, es aportar con resultados experimentales a un mejor entendimiento de la influencia de la granulometría en el Método de Shilstone, en específico, determinar si existe correlación entre la zona del gráfico y las propiedades mecánicas medidas en el proyecto.

Para evaluar las diferentes granulometrías, se generó una matriz experimental donde se confeccionaron 15 mezclas distintas, generando una malla de puntos en el Gráfico de Shilstone. A cada se le evaluó su Cono de Abrams, la compresión y la flexo-tracción a 28 días. Para evitar que variables externas influyan en el resultado, se mantuvo el D_a del árido de 20 mm, razón a/c de 0.45 y un volumen de pasta (V_p) de 30%.

Si bien, a partir de los resultados obtenidos no se pudo establecer una correlación entre el cono de Abrams, la resistencia a compresión y flexo-tracción con los factores del Gráfico de Shilstone, es importante destacar que se lograron conos en un rango de 20 y 50 mm, valores recomendados por la ACI 325 para ser utilizados en trenes pavimentadores. Respecto al análisis ANOVA, no existe relación entre los parámetros del gráfico de Shilstone ni la interacción entre éstos. Por lo anterior, no se puede garantizar una zona dentro del gráfico que garantice el correcto desempeño de la estructura.

ABSTRACT

The specification for the design of concrete is migrating from a prescriptive to a performance-based logic. This is how it has been reflected in the new Chilean regulation NCh 170: 2016, which includes various performance requirements, in particular for the durability of concrete, requiring the designer to define the degree of exposure that the structure will have for internal and external conditions.

Although the regulation was updated, it ignores important aspects that influence the performance of concrete, for example, the importance and benefits of aggregates within the mixture, since regardless of the aggregate system used, to ensure quality and the behavior of the concrete, a minimum content of cement is fixed, and a maximum water - cement ratio. So, while mixtures are tending to be for performance, little attention is paid to the effect of granulometry on the overall behavior of concrete.

For the same reason, in Chile, new requirements have been incorporated that consider the effects of granulometry in the specifications of mixtures for concrete pavements. One of the requirements that is being incorporated into projects tendered by the Roads Department is that the granulometry of the aggregates is optimized by means of the Shilstone Chart, an example of the above is the route the gunpowder Route Ch60 developed in the Valparaíso Region.

The objective of this work is to contribute with experimental results to a better understanding of the influence of the granulometry in the Shilstone Method, in specific, to determine if there is a correlation between the area of the graph and the mechanical properties measured in the project.

To evaluate the different granulometries, an experimental matrix was generated where 15 different mixtures were made, generating a mesh of points in the Shilstone Graph. Each was evaluated its Cone of Abrams, compression and flexo-traction to 28 days. To avoid external variables influencing the result, the D_a of aggregate of 20 mm was maintained, ratio a / c of 0.45 and a volume of pulp (V_p) of 30%.

Although, from the results obtained it was not possible to establish a correlation between the Abrams cone, the compressive strength and flexo-traction with the factors of the Shilstone Graph, it is important to note that cones were achieved in a range of 20 and 50 mm, values recommended by the ACI 325 for use in paver trains. Regarding the ANOVA analysis, there is no relationship between the parameters of the Shilstone graph and the interaction between them. Therefore, you can't guarantee an area within the graph that guarantees the correct performance of the structure.

SIMBOLOGÍA

ANOVA	: Análisis de la varianza.
FG	: Factor Grueso.
FT	: Factor de Trabajabilidad.
D_A	: Tamaño máximo absoluto de agregado en la mezcla de hormigón.
V_p	: Volumen de pasta, consiste en el volumen que se genera al mezclar agua con cemento.
a/c	: Es la razón que existe entre la cantidad de agua y la de cemento en la mezcla.
D_n	: Tamaño máximo nominal del agregado en la mezcla de hormigón.
LEMCO	: Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras.
Q	: Clasificación del árido grueso según Método de Shilstone.
I	: Clasificación del árido intermedio según Método de Shilstone.
W	: Clasificación del árido fino según Método de Shilstone.
c	: Contenido de cemento.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	3
1.2.2. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO.....	4
1.4. METODOLOGÍA.....	5
1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	6
2. REVISIÓN DE LITERATURA Y TEORÍA	8
2.1. ESPECIFICACIÓN DE MEZCLAS DE HORMIGÓN.	8
2.1.1. ESPECIFICACIÓN BASADA EN LA PRESCRIPCIÓN.	8
2.1.2. ESPECIFICACIÓN BASADA EN COMPORTAMIENTO.	8
2.1.3. AVANZANDO DE LO PRESCRIPTIVO AL DISEÑO POR DESEMPEÑO.	10
2.2. AVANCES EN CHILE.....	12
2.3. METODOS DE DOSIFICACIÓN DE ÁRIDOS.....	14
2.3.1. NCH163.OF2013	14
2.3.2. MÉTODO DE FULLER.....	16
2.3.4. MÉTODO DE BOLOMEY.	18
2.2.3. MÉTODO DE FAURY.....	21
2.3.4. MÉTODO DE SHILSTONE.....	29
3. BASES DEL DISEÑO Y TRABAJO EXPERIMENTAL.....	34
3.1. MALLA DE PUNTOS EN EL GRÁFICO DE SHILSTONE.	34
3.2. ÁRIDO.	36
3.2.1. BANDAS GRANULOMÉTRICAS	36
3.2.2. TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO.....	37
3.2.3. DENSIDADES.....	38
3.2.4. OBTENCIÓN DE GRANULOMETRÍAS.....	39

3.3. DOSIFICACIONES.	44
3.3.1. CONTENIDO DE CEMENTO.	45
3.3.2. CONTENIDO DE AGUA.	45
3.3.3. CONTENIDO DE ÁRIDOS.	46
3.4. ENSAYOS DE LABORATORIO.	49
3.4.1. CONFECCIONAMIENTO DE HORMIGONES.	49
3.4.2. CONO DE ABRAMS.	51
3.4.3. CONFECCIÓN Y CURADO DE PROBETAS PARA ENSAYOS A COMPRESIÓN.	52
3.4.4. CONFECCIÓN Y CURADO DE PROBETAS PARA ENSAYOS A FLEXOTRACCIÓN.	54
3.4.5. REFRENTADO DE PROBETAS CILÍNDRICAS.	55
3.4.6. ENSAYOS A COMPRESIÓN.	56
3.4.7. ENSAYOS A TRACCIÓN POR FLEXIÓN.	57
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	60
4.1. CONO DE ABRAMS	60
4.2. COMPRESIÓN A 28 DÍAS.	66
4.3. FLEXOTRACCIÓN A 28 DÍAS.	75
5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	83
5.1. CONCLUSIONES	83
5.2. RECOMENDACIONES	84
6.-BIBLIOGRAFÍA.	85
ANEXO A	88
ANEXO B	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Bandas granulométricas áridos finos. (Nch163of.2013,2013).....	14
Tabla 2.2: Bandas granulométricas áridos gruesos. (Nch163of.2013, 2013)	15
Tabla 2.3: Bandas granulométricas combinadas. (Nch163of.2013, 2013)	16
Tabla 2.4: Valores de a en función al tipo de árido y la consistencia del hormigón (Cánovas, 2007)	18
Tabla 2.5: Valores de A , en función de la tipología de árido y de la puesta en obra. (Fernández Cánovas, 2007)	23
Tabla 2.6: Valores de K , en función de la tipología de árido y de la consistencia. (Fernández Cánovas, 2007)	24
Tabla 3.1: Coordenadas Malla.	36
Tabla 3.2: Bandas Granulométricas Tamizadas en Laboratorio para ser Utilizadas en Confección de Granulometrías.	37
Tabla 3.3: Densidad y Absorción del Árido Grueso [Kgf/m^3]	38
Tabla 3.4: Densidad y Absorción del Árido Intermedio. [Kgf/m^3].....	38
Tabla 3.5: Densidad y Absorción de arena <#8.....	38
Tabla 3.7: Parámetros fijos.	44
Tabla 3.8: Dosificaciones de mezclas en estado SSS.....	48
Tabla 4.1: Resultados Cono de Abrams	60
Tabla 4.2: Medias Poblacionales por Niveles para Cono de Abrams.....	62
Tabla 4.3: Parámetros de ANOVA para Determinar Región de Rechazo de la Hipótesis.	62
Tabla 4.4: Tabla Resultados Parámetros del Análisis de Varianza.....	63
Tabla 4.5: Resultados de Compresión corregidos por criterio Chauvenet.	66
Tabla 4.6: Resultados a Compresión.....	70
Tabla 4.7: Relación entre la resistencia a compresión a los 28 días y la relación agua-cemento según el Método para dosificar hormigones del código ACI 211 of 91.	71
Tabla 4.8: Medias Poblacionales por Niveles para Compresión a 28 Días.	72
Tabla 4.9: Tabla Resultados Parámetros del Análisis de Varianza del Ensayo a Compresión. ...	72
Tabla 4.10: Resultados a Flexión corregidos por su desviación estándar.	75
Tabla 4.11: Resultados a flexión.	79
Tabla 4.12: Medias Poblacionales por Niveles para Flexión a 28 días.....	80
Tabla 4.13: Tabla Resumen de Resultados Parámetros de ANOVA para Ensayo a Flexión.....	81
Tabla A.1: Resultados a Compresión con Outliers.....	88
Tabla A.2: Resultados a Flexión con Outliers.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.6: Gráfico de Shilstone.	31
Figura 3.2: Punto FG = 60 y FT = 31.25 del Gráfico de Shilstone.	40
Figura 3.2: Curvas Granulométricas para un FT=27.....	42
Figura 3.3: Curvas Granulométricas para un FT=31.25.....	42
Figura 3.4: Curvas Granulométricas para un FT=35.5.....	43
Figura 3.5: Curvas Granulométricas para un FT=39.75.....	43
Figura 3.6: Curvas Granulométricas Utilizadas.	44
Figura 3.8: Secado de Áridos.....	50
Figura 3.9: Materiales Pesados.	50
Figura 3.10: Moldes Viguetas y Cilindros.....	51
Figura 3.11: Cono de Abrams de C75W40 - 4cm.	52
Figura 3.12: Humedad y Temperatura Cámara Húmeda.	53
Figura 3.13: Cámara Húmeda.	54
Figura 3.14: Piscina de Curado.....	55
Figura 3.15: Máquina de Refrentado.....	56
Figura 3.16: Máquina Ensayo Compresión.	57
Figura 3.17: Máquina Ensayadora a Flexotracción.	58
Figura 3.18: Viguetas ensayadas a Flexotracción.	59
Figura 4.1: Gráfico Cono de Abrams.	61
Figura 4.2: Gráfico resultados compresión a 28 con FT constante.....	68
Figura 4.3: Gráfico resultados compresión a 28 con FG constante.	68
Figura 4.4: Gráfico resultados a compresión 28 días.....	69
Figura 4.5: Gráfico resultados flexión a 28 con FT constante.....	77
Figura 4.6: Gráfico resultados compresión a 28 con FG constante.	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMÁTICA

Históricamente, los métodos de dosificación de hormigones han estado basadas en lo prescriptivo, estableciéndose límites en el tipo, cantidad y proporción de los componentes de la mezcla para asegurar el rendimiento que se desea alcanzar (Ozyldum, 2011).

El problema de especificar hormigones con los métodos prescriptivos, es que su confección va enfocada en que los componentes sean de alta calidad, o se agregue mayor cantidad de uno para modificar alguna propiedad del hormigón, ya sea trabajabilidad, resistencia, durabilidad, entre otros. Estos criterios, si bien en múltiples ocasiones funcionan, hay otras, en donde resultan mezclas incompatibles y sobredimensionadas, perjudicando los costos del proyecto y potencialmente reduciendo la durabilidad y vida útil de la estructura (Olek, 2012) (Taylor P, 2012) y (Shilstone Sr & Shilstone Jr, 2002).

Por lo anterior, con el tiempo han existido cambios en las normativas a un diseño de mezclas de hormigón con especificaciones basadas en desempeño, donde los requerimientos vayan enfocados en la necesidad particular de cada proyecto, permitiendo que se fomente el uso eficiente de los materiales sin limitar el tipo, cantidad y proporción de los componentes de la mezcla, permitiendo también la incorporación de los distintos avances tecnológicos (ej. Materiales Cementantes, Aditivos y fibras entre otros) (Taylor P, 2012). Entonces, al no ser una especificación prescriptiva, entrega libertad al proyectista en su diseño, dando pie a la innovación y a la inclusión de nuevas tecnologías (Ley, 2018).

Este enfoque, se ve reflejado en la actualización a la norma NCh 170 del año 2016, incorporando, por ejemplo, especificaciones claras respecto a la durabilidad de la estructura ya sea por efectos internos (Contenido de sulfatos, de cloruros y reacciones árido alcalino) y agentes externos (Congelación y deshielo, ataque de sulfatos, ataque de agentes corrosivos y hormigones de baja permeabilidad), definiéndose para cada caso niveles de exposición que es deber del proyectista determinar.

Por otro lado, si bien existe una actualización de la norma NCh170 el año 2016, ésta deja de lado aspectos importantes que influyen en el desempeño del hormigón. El problema es la poca atención que se le da a los áridos dentro de las mezclas, ya que para asegurar la calidad y el comportamiento del concreto, se fija un contenido mínimo de cemento, y una relación de agua – cemento máxima, independientemente del sistema de agregados utilizado (Olek, 2012).

El estudio se focalizará en la granulometría de los áridos, y de cómo ésta influye en el desempeño global de la mezcla. Si bien la problemática abarca todo tipo de estructura, nos enfocaremos en los requerimientos particulares de los pavimentos de hormigón, por lo que se busca analizar la granulometría de las mezclas y ver cómo éstas repercuten en la trabajabilidad que se necesita de acuerdo a los métodos constructivos, también analizar su influencia en la resistencia a flexión ante las cargas de tráfico, y por último analizar cómo influyen en la durabilidad del concreto ante los agentes externos a los cuales será sometido el pavimento a lo largo de su vida útil.

Lo que se requiere, es desarrollar herramientas que permitan al diseñador conocer el efecto de sus decisiones sobre la dosificación en las propiedades de la mezcla. Uno de los requerimientos que se está incorporando en algunos proyectos licitados por la Dirección de Vialidad y que justamente va en línea en una optimización en la distribución granulométrica, es el Método de Shilstone (MOP, 2014), el cual, da énfasis en lograr mediante áridos combinados una granulometría continua, otorgando a la mezcla un buen desempeño en su trabajabilidad.

El objetivo de este trabajo, es aportar con resultados experimentales a un mejor entendimiento de la influencia de la granulometría en el Método de Shilstone, en específico, determinar si existe correlación entre la zona del gráfico con la trabajabilidad, resistencia compresión y resistencia a flexo-tracción medidas en el proyecto. De esta forma, se quiere determinar cuán efectiva es la ubicación de la mezcla dentro del gráfico, evaluando, la relevancia que tiene el método al momento de especificar hormigones.

1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Este trabajo estableció la siguiente hipótesis y objetivos generales y específicos.

1.2.1. HIPÓTESIS

Existe correlación entre la ubicación de la granulometría en el Gráfico de Shilstone y el comportamiento que tendrá la mezcla en ensayos a compresión, flexo-tracción y asentamiento medido con el cono de Abrams.

1.2.2. OBJETIVO GENERAL

Determinar la existencia de una correlación entre los parámetros del Gráfico de Shilstone y el comportamiento que tendrán las mezclas ante los ensayos a flexo-tracción, compresión y docilidad.

1.2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para cumplir el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la zona optima dentro del Gráfico de Shilstone, en relación al comportamiento a compresión y flexo-tracción del concreto.
- Constatar que en zona 2 del gráfico se logran trabajabilidades requeridas para colocar pavimentos usando trenes pavimentadores.
- Analizar la dependencia que existe entre las propiedades medidas (flexo-tracción y compresión a 28 días y Cono de Abrams) y los parámetros con los que se confecciona el Gráfico de Shilstone (Factor Grueso y Factor de Trabajabilidad).
- Entregar respaldo empírico al método de Shilstone, para validar su uso como herramienta para especificar pavimentos de hormigón en Chile.
- Corroborar la influencia de la optimización granulométrica en la respuesta que tendrá el hormigón en relación a las propiedades descritas.

1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO

Si bien, la problemática que existe en los actuales métodos de dosificación de hormigones abarca todo tipo de estructura, nos enfocaremos en los requerimientos particulares de los pavimentos de hormigón.

La memoria se enfoca en el método de optimización de áridos propuesto por Shilstone. En el gráfico, se acotó el análisis de los parámetros a los siguientes rangos: para un Factor de Trabajabilidad (FT) entre 27 y 40 y para un factor grueso (FG) entre 45 y 75. Abarcando principalmente la zona 2 del gráfico y a los límites de ésta con las zonas 1, 4 y 5.

Para que en el análisis realizado a las distintas granulometrías ubicadas en Gráfico de Shiltone, no influyese ningún otro parámetro en los resultados, se adoptaron los siguientes criterios al momento de dosificar los hormigones:

- 1- Que existiese un mismo tamaño máximo nominal (Dn) de agregado de 20 mm.
- 2- La dosificación debía tener un mismo volumen de pasta de 30%.
- 3- La relación agua cemento es de 0.45.
- 4- El contenido de cemento fue de 380,2 kg/m³ dadas las condiciones 2 y 3.

El trabajo experimental se desarrolló en el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obra (LEMCO), donde a cada mezcla se le midió su resistencia a flexo-tracción a los 28 días, compresión a los 28 días y docilidad mediante el Cono de Abrams.

Respecto a los materiales utilizados, los áridos que se ocuparon fueron donados por la empresa “Melón Áridos Ltda” en Concón, los cuales fueron extraídos de la rivera del Río Aconcagua. La empresa “Melón” en Santiago donó los sacos de cemento, éstos fueron de alta resistencia (Cemento Melón Extra).

Finalmente, a los resultados obtenidos se les realizó un análisis de varianza ANOVA y una regresión lineal.

1.4. METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo se aplicó la siguiente metodología, que consiste en cinco etapas.

a) Revisión Bibliográfica

Se estudiaron los aspectos fundamentales de los distintos métodos de dosificación de hormigones y de áridos. Se estudió el método de Shilstone y después de un análisis crítico se plantearon las interrogantes a resolver en esta memoria. Se fijó la hipótesis y se formularon los objetivos del proyecto.

b) Definición de variables del trabajo experimental

Se establecen los alcances del estudio. Se determinan los límites del gráfico en que se enmarcará el proyecto. Se genera la malla de puntos dentro del Gráfico de Shilstone que será analizada. Además, se crea el factorial de ensayos que se le realizará a cada mezcla. Los ensayos contemplados para la tesis son: Compresión a 28 días, Flexo-tracción a 28 días y Cono de Abrams.

Se calculan las proporciones de las bandas granulométricas para obtener los parámetros necesarios para cubrir la malla de puntos del Gráfico de Shilstone.

Se defina la metodología para el análisis de resultados.

c) Desarrollo del trabajo experimental

Se establece el laboratorio de trabajo. Se preparan los áridos a partir de la proporción calculada de cada banda granulométrica. Se confeccionan las mezclas y posteriormente se realizan las probetas. Se monitorea el proceso de curado de las muestras. Finalmente se realizan los ensayos y se obtienen los resultados.

d) Análisis de resultados

Se realiza un análisis de los resultados de cada ensayo realizado para cada punto dentro del Gráfico de Shilstone. Se analiza la correlación entre las propiedades mecánicas alcanzadas y la ubicación dentro de la malla de puntos mediante una regresión lineal y un ANOVA.

e) Discusión y Conclusiones

Se discuten aspectos importantes en función del análisis realizado y se generan las conclusiones contrastando los resultados con la hipótesis planteada, y también, revisando el cumplimiento de los objetivos establecidos al comienzo del proceso investigativo.

1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Esta memoria se encuentra estructurada en cinco capítulos, los cuales contienen básicamente lo siguiente:

Capítulo 1: “Introducción”. En este capítulo se encontrarán los antecedentes del tema de investigación y la problemática objeto de estudio. También se exponen los objetivos a cumplir y se formula la hipótesis a comprobar. Se establecen los alcances del proyecto y la metodología de trabajo con la que se busca dar solución a las interrogantes, finalizando con una breve descripción de lo que se encontrará en cada capítulo de este documento.

Capítulo 2: “Revisión de Literatura y Teoría”. Se entrega un resumen de los aspectos teóricos que se ha recopilado sobre la problemática de la bibliografía analizada, los cuales han sido organizados en este capítulo. En este capítulo se presentan los tipos de especificaciones que existen hoy para dosificar mezclas de hormigón. También se incorpora una descripción de los distintos componentes del concreto y cómo éstos influyen en el comportamiento que tendrá el pavimento de hormigón en estado fresco y endurecido.

Se describen las principales técnicas de dosificación de áridos, de esta manera se introduce el Método de Shilstone, explicando el gráfico, sus usos e importancia que ha ido adquiriendo en Chile junto a las interrogantes que surgen de su implementación.

Capítulo 3: “Bases del Diseño y Trabajo Experimental”. Se definen las variables experimentales. Se presenta el factorial de ensayos, junto con los puntos dentro del gráfico que fueron analizados. Se explican las variables que se dejaron fijas para que no influyesen en las variaciones de los resultados. Se detallan los ensayos que se aplicaron en el estudio de la Memoria.

Capítulo 4: “Análisis de Resultados”. Se presentan los resultados de los ensayos para cada una de las mezclas realizadas. Además, se realiza un análisis detallado de estos resultados, comparándolos entre sí y con el estado del arte. Se incluye un análisis de varianza y se finaliza con una regresión lineal a los resultados.

Capítulo 5: “Conclusiones y Recomendaciones”. Se presentan las conclusiones finales del estudio y las recomendaciones asociadas a los resultados obtenidos y la discusión generada. Se contrastan los resultados con la hipótesis planteada, y también, revisando el cumplimiento de los objetivos establecidos al comienzo de la investigación.

Además, existe una sección de referencias donde se detallan los documentos utilizados en este estudio y una sección de anexos donde se entregan los resultados obtenidos en laboratorio, los resultados obtenidos del análisis ANOVA y las propiedades de los áridos donados.

2. REVISIÓN DE LITERATURA Y TEORÍA

Existen distintos métodos para dosificar áridos dentro de la mezcla de hormigón, como lo son, el Método de Faury, NCh 163 of 2013, Método de Shilstone entre otros, los cuales serán descritos en esta sección. Además se presentarán los tipos de especificaciones que existen para dosificar hormigones, detallando sus problemas y beneficios. También se define qué es una mezcla de hormigón, junto a sus propiedades, características y componentes. En este capítulo también se exponen los avances que han existido en Chile para un diseño por desempeño.

2.1. ESPECIFICACIÓN DE MEZCLAS DE HORMIGÓN.

Existen dos métodos para el diseño de mezclas de hormigón, una de ellas es basada en lo prescriptivo, y la otra basada en desempeño. A continuación se explica cada una de ellas.

2.1.1. ESPECIFICACIÓN BASADA EN LA PRESCRIPCIÓN.

Los métodos de dosificación de hormigones basados en lo prescriptivo, son instructivos que establecen límites en el tipo, cantidad y proporción de los componentes de la mezcla para asegurar el rendimiento que se sea alcanzar (Ozyldum, 2011).

La especificación de hormigones basado en la prescripción está focalizada en las siguientes propiedades (ACI 211, 2010):

- Componentes del concreto
- Mezcla de los componentes
- Dosificación, mezclado y transporte del concreto en estado fresco.

Se confía en las relaciones observadas o implícitas entre las propiedades especificadas y deseadas, aunque el rendimiento del producto final, pueda o no ser descrito (Chamberlin, 1995)

2.1.2. ESPECIFICACIÓN BASADA EN COMPORTAMIENTO.

Para especificar hormigones basado en comportamiento, se define el resultado requerido, los criterios para evaluar el desempeño y los métodos de verificación sin especificar cómo se obtendrán los resultados. (ACI 211, 2010).

Una especificación por rendimiento, es un conjunto de instrucciones, que describen los requisitos funcionales para un hormigón fresco y endurecido según sea su aplicación y necesidad. Las instrucciones deben ser claras, alcanzables, medible y exigible. Por ejemplo, los criterios de desempeño para columnas interiores en un edificio podrían ser peso y la resistencia a la compresión,

no siendo la durabilidad una mayor preocupación. Por otro lado, las necesidades para una carpeta de rodadura podrían incluir requerimientos para la resistencia, permeabilidad, agrietamiento y criterios específicos relacionados con la durabilidad, ya que si bien el hormigón será sometido a cargas pesadas de tráfico, también será sometida a las inclemencias del ambiente durante su vida útil (P2P Committee , 2004).

Al especificar basados en desempeño, deben claramente especificarse los métodos de control y los criterios de aceptación que se utilizarán para verificar y hacer cumplir los requisitos. Se debe entregar flexibilidad al contratista y al productor para proporcionar una mezcla que cumpla con los criterios de desempeño en la forma en que elijan (Ozyldum, 2011).

Las especificaciones por rendimiento, deben evitar requisitos para los medios y métodos a utilizar, y no deben colocar limitaciones para los componentes y las proporciones de estos en la mezcla de hormigón (Ozyldum, 2011).

El concepto general de cómo funcionaría una especificación por desempeño para el hormigón, se formularía de la siguiente manera (P2P Committee , 2004):

1. Habría un sistema establecido de calificación y certificación que establece los requisitos para un sistema de gestión de calidad, capacitación del personal y requerimientos para las instalaciones donde se producirá el hormigón
2. La especificación tendría disposiciones que definen claramente los requisitos funcionales del hormigón endurecido de acuerdo a las necesidades del proyecto.
3. Los productores y contratistas se asociarán para asegurar que se desarrolle, entregue e instale la mezcla especificada. mezcla correcta.
4. El producto entregado, no será una lista detallada de componentes de la mezcla ni sus proporciones, más bien una certificación de que la mezcla cumpla con los requisitos de especificación incluyendo pruebas y resultados que así lo garanticen.
5. También existirá un conjunto claro de instrucciones que describirán qué sucede cuando el concreto no se ajusta con los criterios de rendimiento.

Al especificar basado en desempeño, se promueve un mejor uso de los materiales, ya que está enfocado en las propiedades del concreto (trabajabilidad, resistencia, durabilidad) necesarias para lograr la capacidad que se requiere durante su vida de servicio y que tenga un comportamiento duradero (Bickley, 2014).

Al no ser una especificación con estructura rígida, entrega libertad al proyectista en su diseño, dando pie a la innovación y a la inclusión de nuevas tecnologías (Ley, 2018).

2.1.3. AVANZANDO DE LO PRESCRIPTIVO AL DISEÑO POR DESEMPEÑO.

Durante años los métodos de dosificación de hormigones se han basado en métodos prescriptivos, que en general, son relaciones empíricas que se han ido plasmando en instructivos. Estas especificaciones establecen un límite en el tipo, cantidad y proporción de los componentes de la mezcla para asegurar que el rendimiento sea alcanzado (Chan, 2003).

El problema al especificar hormigones con los métodos históricos, es que su confección va enfocada en que los componentes sean de alta calidad, o se agregue mayor cantidad de uno para modificar alguna propiedad del concreto (trabajabilidad, resistencia, durabilidad, entre otros). Estos criterios, si bien en múltiples ocasiones funcionan, hay otras, en donde resultan mezclas incompatibles y sobredimensionadas, perjudicando los costos del proyecto y potencialmente reduciendo la durabilidad y vida útil de la estructura (Olek, 2012) (Shilstone Sr & Shilstone Jr, 2002).

En general, se percibe que el contenido de cemento controla la resistencia. El problema, surge en que al basarnos en la prescripción, al especificar un contenido mínimo de cemento se puede exceder lo necesario para alcanzar la resistencia y durabilidad deseada, siendo estos contenidos de cemento muchas veces conservadores ante las necesidades del proyecto.

Actualmente los métodos prescriptivos promueven el sobredimensionamiento como un factor de seguridad. Esto repercute fuertemente en el medioambiente producto de la huella de carbono emitida por las emanaciones de la industria cementera. Más aun cuando:

- La producción de cemento emite el 5% del CO₂ mundial.
- El consumo de energía eléctrica de la industria cementera es de 2% del consumo mundial (FICEM, 2013).

El Estudio realizado por Chamberlin en 1995 ha demostrado que el diseño prescriptivo de mezclas de hormigón, no siempre tienen el resultado deseado, consecuencia de lo anterior es el aumento de los costos de mantención quitándole competitividad respecto al asfalto. Cabe destacar que en la creación de los antiguos métodos no se contaba con los avances tecnológicos de hoy (ej. materiales cementantes, aditivos y fibras entre otros) (Taylor P, 2012)

Por lo anterior, desarrollar un método de diseño de mezclas de hormigón basada en comportamiento, en donde no se límite el uso eficiente de los materiales va a ser beneficioso y sustentable. A medida que los presupuestos se hacen más estrictos y se presta cada vez más atención a las medidas medioambientales, se está comenzando a centrar la atención en hacer mezclas que son más eficientes en el uso del material sin comprometer el rendimiento de la ingeniería.

Este cambio se está viendo de alguna medida en la actual normativa en Chile, donde se ha actualizado la norma NCh 170 del 2016 incorporando, por ejemplo, especificaciones claras respecto a la durabilidad de la estructura ya sea por efectos internos (contenido de sulfatos, de cloruros y reacciones árido alcalino) y agentes externos (congelación y deshielo, ataque de sulfatos, ataque de agentes corrosivos y hormigones de baja permeabilidad), definiéndose para cada caso niveles de exposición que son deberes del proyectista determinar. Por otro lado entrega alternativas de desmolde como la madurez del hormigón, manteniendo de todas formas los tiempos fijos de desmolde de acuerdo a elemento estructural. En conclusión, se genera una norma híbrida, es decir se utilizan ambos enfoques en la especificación de los hormigones.

A pesar de los avances tecnológicos, un número de desafíos han retardado el desarrollo de más especificaciones basadas en desempeño. Estos son:

1. Resistencia al cambio: Son métodos utilizados históricamente, por lo que las especificaciones ya son familiares, teniendo poca experiencia en el diseño por desempeño (Falker, 2009).
2. Resistencia al cambio en la distribución de responsabilidades: En la construcción de pavimentos de hormigón, el riesgo puede definirse como la responsabilidad durante la vida útil del desempeño del pavimento, el cual, en el diseño prescriptivo, las agencias toman el 100% de la responsabilidad ya que se rigen en realizar correctamente el paso a paso de las especificaciones, donde generalmente no son responsables de la calidad del comportamiento que tendrá el producto final (Falker, 2009). En cambio en diseño por desempeño, quien diseñe se lleva el riesgo y la responsabilidad, ya que según sus criterios se evaluará el desempeño que tendrá el producto final.
3. Falta de ensayos que midan desempeño de acuerdo a las necesidades del proyecto: Una de las mayores barreras en el cambio a diseño por desempeño es la falta de ensayos que sean

realizables, de bajo costo, consistentes y estandarizados para medir el comportamiento del concreto en el momento oportuno (Bickley, 2014).

Sumado a lo anterior, existen ciertas ideas que se han tenido a lo largo de la historia que son erradas:

1. “Incrementar el contenido de cemento, siempre aumenta la resistencia”.

Peter Taylor a partir de un estudio elaborado el año 2015 concluye que una vez se alcanza la máxima resistencia del concreto, el aumentar el contenido de cemento no aumenta la resistencia del concreto para una relación agua cemento fija. Además, el incremento del contenido de cemento, aumenta la permeabilidad, aumenta el riesgo de las retracciones de fraguado, puede aumentar la segregación de la mezcla y se pueden generar grietas tempranas. Para evitar estos problemas, el contenido de cemento no debe ser mayor al cual se alcanza la resistencia requerida. En el estudio, la máxima resistencia para una relación agua cemento fija, se obtenía cuando la razón entre el volumen de pasta y el volumen de vacíos de los áridos combinados y compactados alcanzaba el valor de 1.5 (Taylor P, 2012).

2. “Resistencia se correlaciona con Durabilidad”.

Generalmente la resistencia se utiliza como indicador cualitativo del desempeño que en general tendrá la mezcla. Mientras la resistencia es importante para el desempeño que tendrá la estructura, no tiene necesariamente relación directa con la durabilidad. El potencial de durabilidad puede ser definido como la capacidad del concreto de mantener la capacidad de servicio, en un ambiente dado, durante su vida de diseño sin deterioros significantes (Obla, 2003).

2.2. AVANCES EN CHILE.

En Chile, se están actualizando los métodos de dosificación en línea a un diseño por desempeño. Como ejemplo de lo anterior es la actualización de la norma NCh 170 del 2016 en donde se eliminan conceptos históricos como lo es la relación agua / cemento y se incluyen conceptos nuevos como madurez del hormigón y conceptos relativos a la durabilidad del concreto. Además se incorpora un capítulo completo donde se entregan especificaciones claras respecto a la durabilidad de la estructura, ya sea por efectos internos y agentes externos (NCh 170, 2016).

En la misma línea, existe una actualización que se encuentra en estudio del volumen 5 del Manual de Carreteras, en particular el apartado 5.410 “Pavimentos de Hormigón” (Rocco, 2017).

Sin embargo, como se mencionó al principio de este capítulo, si bien la normativa se actualizó, se pone poca atención a la importancia y beneficios de los áridos en la mezcla y cómo estos contribuyen en el comportamiento que tendrá el hormigón. De las múltiples características de los áridos, el estudio se focalizará en la granulometría de los áridos, y de cómo será el efecto de ésta, en el desempeño global.

Durante la recopilación de información, se aprecia que el Gráfico de Shilstone, es un método de optimización granulométrica de los áridos que está siendo utilizado por distintas entidades del país.

Por ejemplo, el método es incorporado en las licitaciones propuestas por parte de la Dirección de Vialidad como medio de optimización granulométrica en los proyectos que contemplan el uso de hormigón en sus pavimentos. Un ejemplo de lo anterior es la licitación que tuvo el camino La Pólvara (Ruta Ch60) (MOP,2015).

Igualmente, Cementos Polpaico, incorpora el Gráfico de Shilstone como método de optimización de sus dosificaciones (revista BIT, 2013).

Al ver que el Gráfico de Shilstone es un método que va en la línea a un diseño por desempeño aplicado a la optimización granulométrica de los áridos, y en vista a su bajo respaldo teórico y experimental en Chile y el extranjero, es que se ha decidido realizar mediante métodos estadísticos, un análisis de sensibilidad al Gráfico de Shilstone, con el fin de encontrar la zona óptima para la realidad chilena y dar respaldo a las practicas que se están adquiriendo.

Para entender el estado de arte actual, se describirán distintos métodos de dosificación de áridos, partiendo por lo que actualmente rige en nuestra normativa, pasando por distintos métodos que tienen como objetivo lograr una banda granulométrica de distribución continua, finalizando con el Gráfico de Shilstone, del cual se basará nuestro trabajo.

2.3. METODOS DE DOSIFICACIÓN DE ÁRIDOS

Los métodos de dosificación de áridos, son mecanismos para otorgar a los áridos una granulometría óptima, generando graduaciones continuas para optimizar las mézclas, para ello se han generado distintos métodos.

A continuación se describirán los métodos de dosificación normados y analíticos.

La diferencia fundamental entre los métodos analíticos y del ACI o la NCh, radica en que estos últimos intentan llegar a la dosificación final de una manera más práctica, haciendo correcciones por asentamiento y resistencia para su obtención. Los métodos analíticos no sugieren corregir la dosificación inicial, suponen que con la aplicación de los procedimientos que proponen se cumplen los requisitos de trabajabilidad y resistencia requeridos (Giraldo, 2004).

2.3.1. NCH163.OF2013

Este método de diseño de áridos emplea bandas granulométricas para áridos gruesos, finos y combinados, las que se indican a continuación.

Las bandas granulométricas consisten en límites superiores e inferiores del porcentaje de árido que pasa por cada tamiz.

La Tabla 2.1 indica las bandas granulométricas que rigen para los áridos finos según su tamaño máximo D_n .

Tabla 2.1: Bandas granulométricas áridos finos. (Nch163of.2013,2013)

Tamices mm	Tamaño máximo, D_n , mm		
	% acumulado que pasa		
	Hormigón y mortero	Mortero	
	4,75	2,36	1,18
9,5	100	-	-
4,75	95 - 100	100	-
2,36	80 - 100	95 - 100	100
1,18	50 - 85	70 - 100	95 - 100
0,600	25 - 60	40 - 75	50 - 100
0,300	5 - 30	10 - 35	15 - 40
0,150	0 - 10	2 - 15	2 - 20
Módulo de finura	3,45 - 2,15	2,83 - 1,75	2,38 - 1,40
Retenido entre tamices 0,315 y 0,150	-	< 25	< 25
% retenido entre dos tamices sucesivos	-	< 45	

Las bandas granulométricas según tamaño máximo nominal para los áridos gruesos se presentan en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Bandas granulométricas áridos gruesos. (Nch163of.2013, 2013)

Tamices mm	% acumulado que pasa para los siguientes grados (definidos por tamaños límites en mm)								
	63 - 37,5	50 - 25	50 - 4,75	37,5 - 19	37,5 - 4,75	25 - 4,75	19 - 4,75	12,5 - 4,75	9,5 - 2,36
75	100	-	Nota	-	Nota	-	-	-	-
63	90 - 100	100	100	-	-	-	-	-	-
50	35 - 70	90 - 100	90 - 100	100	100	-	-	-	-
37,5	0 - 15	33 - 70	-	90 - 100	90 - 100	100	-	-	-
25	-	0 - 15	35 - 70	20 - 55	-	90 - 100	100	-	-
19	0 - 5	-	-	0 - 15	35 - 70	-	90 - 100	100	-
12,5	-	0 - 5	10 - 30	-	-	25 - 60	-	90 - 100	100
9,5	-	-	-	0 - 5	10 - 30	-	20 - 55	40 - 70	90 - 100
4,75	-	-	0 - 5	-	0 - 5	0 - 10	0 - 10	0 - 15	10 - 30
2,36	-	-	-	-	-	0 - 5	0 - 5	0 - 5	0 - 10
1,18	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5

Finalmente, cuando se combinan los áridos se emplea la Tabla 2.3, donde el árido combinado debe quedar lo más paralela posible y entre las curvas límites. Se utilizan bandas para tamaños máximos de 20 ó 40 mm. Además cada tamaño se divide cuatro curvas (1, 2, 3 y 4), que son combinadas formando tres zonas que poseen el siguiente significado.

- Zona 1: Aceptables para granulometrías discontinuas. Curvas límite 3 y 4.
- Zona 2: Combinación preferida. Curvas límite 1 y 2.
- Zona 3: Aceptable, con mayor necesidad de cemento y agua. Curvas 2 y 3.

Tabla 2.3: Bandas granulométricas combinadas. (Nch163of.2013, 2013)

Tamiz mm	D _{máx.} 38,1 mm				D _{máx.} 19 mm			
	% que pasa acumulado				% que pasa acumulado			
	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4
38,10	100	100	100	100	-	-	-	-
19,00	50	58	67	75	100	100	100	100
9,50	36	44	52	60	45	55	65	75
4,75	24	32	40	47	30	35	42	48
2,36	18	25	31	38	23	28	35	42
1,18	12	17	24	30	16	21	28	34
0,60	7	12	17	23	9	14	21	27
0,30	3	7	11	15	2	3	5	12
0,15	0	0	2	5	0	0	0	2

2.3.2. MÉTODO DE FULLER.

En el método de Fuller la curva granulométrica de referencia, para obtener una buena compacidad y docilidad, es la denominada Parábola de Gessner, que viene definida por la ecuación 2.1:

$$y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad [\text{EC. 2.1}]$$

donde,

y = Tanto por ciento en volumen que pasa por cada tamiz de abertura d.

d = Abertura en mm de cada uno de los tamices de la serie empleada.

D= Tamaño máximo del árido en mm.

Posteriormente se calcula el llamado módulo granulométrico (o de finura) de cada fracción m_i , que es la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie utilizada, dividido entre cien. Se procede a describir el método explicado por Fernando Cánovas.

$$m_i = \frac{\sum \% \text{retenidos acumulados (hasta malla } 0,16\text{mm)}}{100} \quad [\text{EC. 2.2}]$$

El paso a seguir, es realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los diferentes áridos a la curva de Fuller, para ello puede emplear un sistema de tanteos o uno basado en los módulos granulométricos. El sistema de tanteo, consiste en un procedimiento gráfico con el propósito de

conseguir que el árido resultante se adapte lo máximo posible a la curva teórica; así pues, deben realizarse tanteos hasta que las áreas por encima y por debajo de la curva de referencia queden compensadas. Con algo de práctica, suelen hacer falta pocos tanteos para lograr que la curva de composición se ajuste lo mejor posible a la curva de referencia.

El método basado en los módulos granulométricos es más exacto que el sistema de tanteos.

Considerando que el árido está fraccionado en n tamaños, siendo m_1, m_2, \dots, m_n los módulos granulométricos de cada fracción y $m_{t2}, m_{t3}, \dots, m_{tn}$ los módulos granulométricos de las curvas de Füller cuyos tamaños máximos coinciden con los de las fracciones 2,3,... n ; siendo t_1, t_2, \dots, t_n los porcentajes que hay que tomar para que la granulometría de la mezcla se ajuste a la curva de referencia, se tendrá el siguiente sistema de n ecuaciones con n incógnitas:

$$\left. \begin{aligned} t_1 + t_2 + \dots + t_n &= 100 \\ m_{t2} &= \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2}{t_1 + t_2} \\ m_{t3} &= \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2 + t_3 m_3}{t_1 + t_2 + t_3} \\ m_{tn} &= \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2 + \dots + t_n m_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \end{aligned} \right\} \quad [EC. 2.3]$$

En el caso de emplear dos fracciones de árido para la resolución del sistema anterior, tenemos

$$t_1 = 100 \frac{m_2 + m_{t2}}{m_2 + m_1} \quad [EC. 2.4]$$

$$t_2 = 100 - t_1 \quad [EC. 2.5]$$

Análogamente, se sigue el mismo procedimiento para más fracciones de áridos.

Una vez encontrada la proporción en la que hay que mezclar las distintas fracciones de los áridos, de 1,025 m³ se resta el volumen relativo del cemento más el del agua, necesarios para obtener la consistencia buscada, y el volumen resultante se divide proporcionalmente entre los porcentajes obtenidos de la mezcla de los áridos. Se utiliza la cifra 1,025 como una aproximación empírica que tiene en cuenta la retracción que sufrirá el hormigón. La pasta hidratada ocupa un volumen menor que la suma de agua más cemento antes de hidratarse, debido a las pérdidas de agua del hormigón antes del fraguado, entre otras causas.

2.3.4. MÉTODO DE BOLOMEY.

Este método puede ser considerado como un perfeccionamiento del método de Füller; los datos para efectuar la dosificación por este método suelen ser los mismos que los utilizados por el método de Füller.

Donde difieren, es en la forma en que se determina en qué proporción se mezclan las distintas fracciones de árido, es en éste punto donde se aportan las modificaciones respecto al método anterior, pues Bolomey utiliza una curva de referencia de granulometría variable en función de la consistencia deseada en el hormigón y la forma de los áridos (teniendo en cuenta el tamaño máximo de árido, al igual que Füller). Esta curva viene definida por la siguiente Ecuación 2.6:

$$y = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad [\text{EC. 2.6}]$$

donde,

y : Tanto por ciento en volumen que pasa por cada tamiz de abertura d.

d : Abertura en mm de cada uno de los tamices de la serie empleada.

D : Tamaño máximo del árido en mm.

a : Parámetro que toma distintos valores en función del tipo de árido y de la consistencia del hormigón. Dichos valores se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Valores de a en función al tipo de árido y la consistencia del hormigón (Cánovas, 2007)

tipo de árido	consistencia del hormigón	valor de a
Rodado	Seca - plástica	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Machacado	Seca - plástica	12
	Blanda	13
	Fluida	14

Para realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los áridos a la curva tomada como referencia, tal como en el método de Füller, se puede emplear un sistema de tanteos o bien uno teórico basado en los módulos granulométricos. En éste método se considera que el porcentaje de cemento que entra en la composición viene dado por la siguiente expresión:

$$t_o = \frac{\frac{\text{peso del cemento por m}^3}{\text{densidad relativa del cemento}} 100}{\text{vol. total de componentes por m}^3 - \text{vol. de agua por m}^3} \quad [\text{EC. 2.7}]$$

Se considera que el módulo granulométrico del cemento es nulo.

Si se supone que el árido está fraccionado en n+1 tamaños y se designan por $m_0, m_1, m_2, \dots, m_n$, los módulos granulométricos de cada fracción (estos se definen según la ecuación 2.2., descrita en el apartado anterior) se tendrá el siguiente sistema de n+1 ecuaciones con n+1 incógnitas:

$$\left. \begin{aligned} t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n &= 100 \\ m_{t1} &= \frac{t_0 m_0 + t_1 m_1}{t_0 + t_1} \\ m_{t2} &= \frac{t_0 m_0 + t_1 m_1 + t_2 m_2}{t_0 + t_1 + t_2} \\ m_{tn} &= \frac{t_0 m_0 + t_1 m_1 + t_2 m_2 + \dots + t_n m_n}{t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n} \end{aligned} \right\} \quad [\text{EC. 2.8}]$$

Los módulos granulométricos $m_{t1}, m_{t2}, m_{t3} \dots m_{tn}$ no son los correspondientes a las curvas de Bolomey para cada tamaño máximo de la fracción de árido considerado, sino los modificados; de forma que si llamamos C_n a la curva de Bolomey para el tamaño máximo del árido n, la curva C_{n-1} para el árido de tamaño n-1 se deduce tomando los $100/m$ de las ordenadas sobre los mismos tamaños de la curva C_n , siendo m la ordenada correspondiente al tamaño n-1, así sucesivamente se procederá para las ordenadas de las curvas C_{n-2} , correspondientes al tamaño máximo del árido n-2.

Si el árido tiene dos fracciones, teniendo en cuenta que módulo granulométrico del cemento $m_0 = 0$, se deducen las ecuaciones:

$$t_1 = 100 \frac{100(m_2 - m_{t2}) - t_0 m_2}{m_2 + m_1} \quad [\text{EC. 2.9}]$$

$$t_2 = 100 - (t_0 - t_1) \quad [\text{EC. 2.10}]$$

La dosificación por metro cúbico del hormigón, al igual que en el método anterior, se determina sabiendo que los componentes del hormigón deben sumar 1025 dm³.

A continuación se presentan valores para el coeficiente de a para la curva de Bolomey dependiendo de la forma del agregado y de la consistencia de la mezcla y el asentamiento.

Tabla 2.4: Coeficientes de Bolomey (Girardo, 2004)

Formas de Agregado	Consistencia de la Mezcla	Asentamiento	A
Redondeada	Seca – Plastica	0 - 50	10
	Blanda	50 - 100	11
	Fluida	100 - 200	12
Angular	Seca – Plastica	0 - 50	10
	Blanda	50 - 100	11
	Fluida	100 - 200	12

2.2.3. MÉTODO DE FAURY.

Este método es aplicable a hormigones en masa o armados, siendo especialmente útil cuando se requiere dosificar mezclas en la construcción de hormigones para piezas prefabricadas en las que predomina la superficie del molde sobre su volumen, es decir, aquellas en las que el efecto pared tiene un valor preponderante.

El tamaño máximo del árido D se determina mediante la siguiente ecuación:

$$D = d_1 - (d_1 - d_2) \frac{x}{y} \quad [\text{EC. 2.11}]$$

donde,

d_1 : Mayor de los tamices sobre el que queda retenido algo del árido más grueso.

d_2 : Tamiz inmediatamente inferior $d_2 = d_1/2$.

x: Proporción de los granos superiores a d_1 .

y: Proporción de los granos comprendidos entre d_1 y d_2

Para este método se debe considerar el denominado radio medio, que es la relación existente entre el volumen (para el cálculo se considera el volumen de las zonas más armadas) y la superficie del molde.

$$R = \frac{V}{S} \rightarrow \frac{\text{Sección neta de hormigón (zona más armada)}}{\text{Perímetro (molde + armadura)}} \quad [\text{EC. 2.12}]$$

Donde V es el volumen delimitado por MNM'N', en la Figura 2.3., estando situada M'N' en un plano separado a una distancia igual al tamaño máximo del árido, del plano tangente a las barras superiores del armado. Se le debe descontar el volumen de las barras de armado.

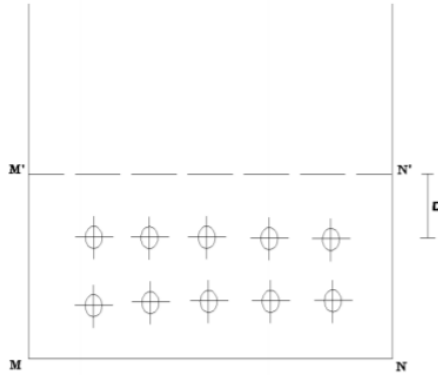


Figura 2.1: Clasificación de áridos según tamaño de tamiz. (Correa, Diana; 2011)

S es la superficie determinada por la suma de las tres caras M'M, MN, NN' más la superficie total de las barras en contacto con el hormigón.

Debido al efecto pared, el tamaño máximo de árido D a emplear para una pieza determinada de radio medio R, debe cumplir:

$$0,8 < \frac{D}{R} < 1,0 \quad [\text{EC. 2.13}]$$

El método de Faury considera como curva de referencia, que permite obtener la máxima compacidad, a una función constituida por dos rectas de diferente pendiente, una corresponde a la mezcla de granos finos y medios de tamaño 0 a D/2 y la otra a los granos gruesos de tamaños D/2 a D. El punto de encuentro entre las dos rectas corresponde a un valor de abscisas de D/2 y el valor de las ordenadas "y" será función del valor de D, de la forma de los áridos, del efecto pared y de la potencia de compactación, dicho valor se define por la siguiente ecuación:

$$y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad [\text{EC. 2.14}]$$

Donde,

D: Tamaño máximo del árido en mm.

R: Radio medio de la pieza a hormigonar en mm.

A: Coeficiente que depende de la forma de los áridos y de los medios de compactación del hormigón, cuyo valor viene indicado en la Tabla 2.5.

B: Coeficiente que depende de la potencia de compactación y que toma el valor de B=1,5 para las condiciones usuales de puesta en obra en hormigón armado y que se aproxima a B=1 cuando la compactación es muy enérgica.

Tabla 2.5: Valores de A, en función de la tipología de árido y de la puesta en obra. (Fernández Cánovas, 2007)

Puesta en Obra	Valores de A		
	Arenas y gravas rodadas	Arenas rodadas y árido grueso de machaqueo	Árido fino y grueso de machaqueo
Consistencia muy fluida, puesta en obra sin compactar	≥ 32	≥ 34	≥ 36
Consistencia muy fluida, compactación débil	30 – 32	32 – 34	36 – 38
Consistencia blanda, compactación media	28 – 30	30 – 32	34 – 36
Consistencia seca, compactación cuidada	26 – 28	28 – 30	32 – 34
Consistencia muy seca, compactación potente	24 – 26	26 – 28	30 – 32
Consistencia tierra húmeda, compactación muy potente	22 – 24	24 – 26	28 – 30
Compactación excepcionalmente potente	≤ 22 a determinar	≤ 24 a determinar	≤ 28 a determinar

Si el hormigón se ha de colocar en masas indefinidas el efecto de pared es nulo, teniendo un valor de cero el tercer término de la Ecuación 2.14.

El conjunto de áridos de tamaño menor a D/2 debe satisfacer la ley granulométrica:

$$P = \frac{100}{\sqrt[5]{\frac{D}{2}} - 0,365} (\sqrt[5]{d} - 0,365) \quad [\text{EC. 2.15}]$$

donde,

P: Porcentaje de volumen absoluto de los granos que pasan por el tamiz de abertura d, incluyendo en éste al cemento.

El volumen de los huecos existentes entre los distintos granos de áridos y de cemento H dependerá de la consistencia de la mezcla, de la naturaleza de los áridos, de su tamaño máximo y de la potencia de compactación, dicho volumen viene definido por la siguiente ecuación:

$$H = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad [\text{EC. 2.16}]$$

donde,

K: Coeficiente que depende de la consistencia del hormigón, de la naturaleza de los áridos y de la potencia de compactación, sus valores están indicados en la Tabla 2.6.

K': Coeficiente que depende de la potencia de compactación y que toma el valor de 0,003 para compactaciones normales y de 0,002 para compactaciones muy enérgicas.

Tabla 2.6: Valores de K, en función de la tipología de árido y de la consistencia. (Fernández Cánovas, 2007)

Puesta en Obra	Valores de K		
	Arenas y gravas rodadas	Arenas rodadas y árido grueso de machaqueo	Árido fino y grueso de machaqueo
Consistencia muy fluida, puesta en obra sin compactar	≥ 0,370	≥ 0,405	≥ 0,405
Consistencia blanda, compactación media	0,350 - 0,370	0,375 - 0,405	0,430 - 0,460
Consistencia seco plástica, compactación muy cuidada	0,330 - 0,350	0,355 - 0,385	0,400 - 0,430
Consistencia tierra húmeda, compactación muy potente	0,250 - 0,330	0,330 - 0,350	0,350 - 0,370
Compactación excepcionalmente potente	≤ 0,250	≤ 0,330	≤ 0,350

En el caso de hormigón en masa indefinida (despreciando el efecto pared), se anularía el último término de la expresión, correspondiente al efecto pared.

La cantidad de agua en dm^3 / m^3 a emplear en el hormigón, se obtiene de multiplicar la proporción de huecos hallada por 1000; en caso de emplear aireantes se debe restar, al volumen de huecos, el aire incorporado.

El porcentaje en volumen absoluto de las partículas de cemento con relación al volumen absoluto de los materiales sólidos, viene dado por:

$$\%C = \frac{C}{1000P_c(1 - H)} \quad [\text{EC. 2.17}]$$

donde,

%C: Porcentaje en volumen absoluto de cemento.

C: Dosificación del cemento en Kg/m³

PC: Densidad relativa del cemento en Kg/dm³

H: Volumen de huecos en l/dm³

Para el ajuste de la granulometría a la curva propia del método, se explica a continuación el sistema de los índices ponderales, tal y como se hizo para los métodos anteriores, por considerarlo más preciso que el método de los tanteos.

Para la determinación de las proporciones en que hay que mezclar los diferentes tamaños de áridos, en el supuesto de dos tipologías de áridos y arena, se plantea el siguiente sistema de ecuaciones:

La primera ecuación está determinada por la siguiente expresión:

$$c + a + g_1 + g_2 = 1 \quad \text{[EC. 2.18]}$$

donde,

c: Proporción de cemento.

a: Proporción de arena.

g₁: Proporción árido medio.

g₂: Proporción árido grueso.

La segunda ecuación se determina, teniendo en cuenta que los índices ponderales de los granos de mortero, incluido el cemento, de tamaños inferiores a 6,3mm son los mismos para el hormigón diseñado y para el hormigón de referencia. Se realiza el siguiente procedimiento:

Se adjudica a cada tamaño un índice ponderal, esto se consigue aplicando la escala de la Figura 2.2. Esta escala permite hallar el índice ponderal de cualquier árido que esté limitado por sus tamaños extremos.

El índice se determina encontrando el punto medio entre los límites del tamaño del árido (en la parte inferior de la escala) y leyendo el índice correspondiente a dicho punto (en la parte superior de ésta). El índice ponderal de la mezcla de los áridos se determina sumando todos los productos de las proporciones de volúmenes absolutos de los granos de cada tamaño, por el índice ponderal que corresponde a cada uno de ellos.

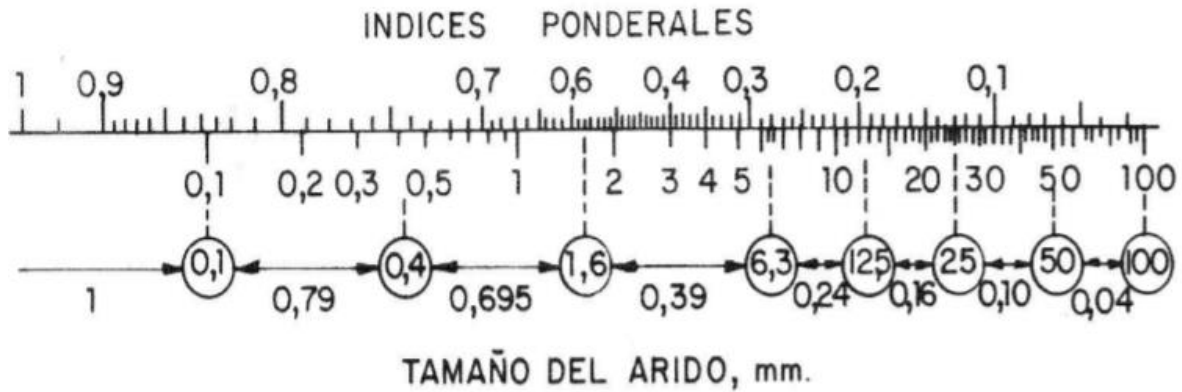


Figura 2.2: Escala de índices ponderales. (Fernández Cánovas, 2007)

Si, las proporciones f, F, M y G que representan el “filler”, arena fina, media y gruesa respectivamente, son las contenidas en la arena disponible, el índice ponderal del conjunto de granos inferiores a 6,3mm es el siguiente:

$$(C + af).1 + aF.0,79 + aM.0,695 + aG.0,39 = c + a(f + 0,79F + 0,695M + 0,39G)$$

Este índice ponderal debe ser igual al del conjunto de granos menores a 6,3mm del hormigón de referencia, que se obtiene midiendo las ordenadas correspondientes en dicha curva y calculando el índice ponderal. En la gráfica de la Figura 2.3 se define el caso particular de tres áridos.

Así pues, se tiene que el índice de dicho conjunto viene dado por la siguiente expresión:

$$\left| \frac{\alpha}{100} 1 + \frac{\beta}{100} 0,79 + \frac{\gamma}{100} 0,695 + \frac{\delta}{100} 0,39 \right|$$

**%QUE PASA EN
VOLUMEN ABSOLUTO**

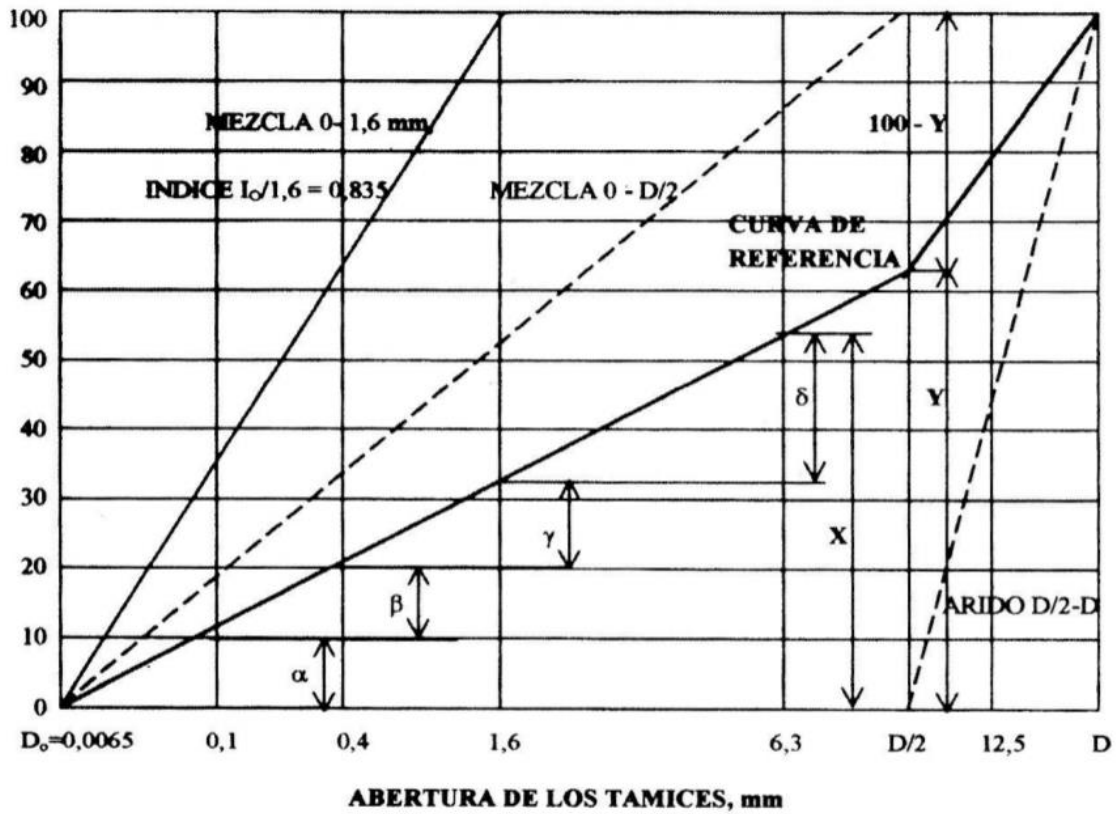


Figura 2.3: Representación gráfica de la curva de Faury. (Fernández Cánovas, 2007)

Este mismo resultado se puede obtener utilizando la escala de la Figura 2.4. En ella, en la parte superior se leen los índices ponderales que corresponden a las dimensiones máximas de los granos que se leen en la parte inferior de ésta.



Figura 2.4: Escala de Índices ponderales para diferentes tamaños de árido. (Fernández Cánovas, 2007)

Si se utiliza la curva de referencia, y "x" es el tanto por ciento de granos menores de 6,3 mm, el índice ponderal a determinar se incluye en la expresión.

$$\frac{x}{100} I'_{0/6,3}$$

Con esta expresión se obtiene la segunda ecuación:

$$c + a \times I'_{0} + g_1 \times I'_{g1} + g_2 \times I'_{g2} = \frac{\frac{x}{100} I'_{0}}{6,3} \quad [\text{EC. 2.19}]$$

donde,

c, a, g1 y g2: Definidos en la ecuación 2.18. anterior.

í'a: índice ponderal de los granos de arena de tamaño inferior a 6,3mm.

í'g1: índice ponderal de los granos de árido fino de tamaño inferior a 6,3mm.

í'g2: Índice ponderal de los granos de árido grueso de tamaño inferior a 6,3mm.

í'0: índice ponderal del mortero de referencia, (del hormigón formado por la mezcla de áridos de tamaño inferior a 6,3mm).

La tercera ecuación se encuentra teniendo en cuenta que el índice ponderal del hormigón diseñado y el de referencia es el mismo; el procedimiento es análogo al anterior; se debe primero calcular el índice de cada árido, y luego sumándolos se obtiene el del conjunto, posteriormente se iguala al índice del hormigón de referencia:

$$c + a \times I_a + g_1 \times I_{g1} + g_2 \times I_{g2} = I_0 \quad [\text{EC. 2.20}]$$

donde,

c, a, g1 y g2: Definidos en la Ecuación 2.18. anterior.

í'a: índice ponderal de la arena.

í'g1: índice ponderal del árido medio.

í'g2: índice ponderal del árido grueso.

í'0: índice ponderal del hormigón de referencia.

El hormigón de referencia está compuesto por una mezcla de granos de 0 a D/2 en proporción de Y% y de granos de D/2 a D en proporción (100-Y)%. Por lo tanto, el índice ponderal de la primera fracción se obtiene en la escala de la Figura 2.4, y el de la segunda, de la escala de la Figura 2.2.

Con estas tres ecuaciones se resuelven y se obtienen las proporciones de los áridos.

2.3.4. MÉTODO DE SHILSTONE.

El Método de Shilstones fue publicado el año 2002 en la revista "Concrete International" por James Shilstones padre y James Shilstone hijo, periodo donde ya se discutía la necesidad de pasar de un diseño prescriptivo a un diseño por desempeño, en donde se establezca el rendimiento que se quiere alcanzar con el concreto.

Basaron su investigación en la importancia de la distribución granulométrica de los agregados en el concreto, ya que minimiza la necesidad de los otros componentes en la mezcla. También, una granulometría continua es importante para evitar la segregación, además juega un rol importante en la trabajabilidad que tendrá y finalmente incide directamente en la permeabilidad que tendrá el concreto.

Otros beneficios de optimizar la granulometría con áridos combinados, son los siguientes:

- Para una dosis de cemento y consistencia fija, existe una configuración de áridos óptima, que dará una mayor resistencia a la mezcla (Taylor, 2014).
- Una mezcla óptima tiene una menor interferencia de las partículas y responde mejor a vibraciones de alta frecuencia y alta amplitud, evitando segregación (Taylor, 2014).
- El contenido de pasta debe ser no mayor al necesario para proveer lubricación durante la colocación y el llenar los vacíos dejados por los agregados (Taylor, 2014), (Shilstone y Shilstone, 2002).

Una de las premisas de Shilstone, es que el contenido de pasta no debe ser mayor al requerido para lubricar durante la colocación y enlazar las partículas de áridos, para que así, resistan en conjunto las solicitaciones que tendrá la estructura durante su vida útil.

Para entender de donde nace el Método, Shilstone explica en su publicación, que después del uso constante del programa seeMIX, creado en 1990, programa que ayuda a los usuarios a proporcionar mezclas de hormigón y entrega gráficos de la graduación de los áridos combinados, pudo notar que la graduación de los áridos, influye de manera importante en el rendimiento que tendrá la mezcla en cuanto a su trabajabilidad, concluyendo que una granulometría discontinua (especialmente los tamices #4 y #8), el exceso de arena y materiales cementantes causaban diversos problemas en las mezclas tales como segregación y disminución de la trabajabilidad.

En la confección de la mezcla, al hacer la graduación de los áridos continua, Shilstone lograba disminuir el uso de agua, mejorando la movilidad de la mezcla e incrementando la resistencia.

Ellos recopilaron esta información e hicieron análisis gráfico a distintas mezclas para todo tipo de estructura, optimizando su proporción para dar el mejor uso a los materiales locales. A partir de los resultados desarrollaron un modelo de diseño de mezclas basadas en desempeño para satisfacer los requerimientos de la mayoría de los hormigones de resistencia normal con uso de materiales de la zona.

El Método de Shilstone grafica dos factores que se cree dan a la mezcla trabajabilidad y evita su segregación. Estos factores servirían para determinar el tamaño y uniformidad de la distribución de agregados combinados en la mezcla.

Para determinar estos factores, y de acuerdo a la Figura 2.5, el Método de Shilstone divide el tamaño de los áridos en tres partes:

- **Árido Grueso (Q):** Corresponde a aquellos tamaños que quedan retenidos en el tamiz 3/8"
- **Agregados Intermedios (I):** Corresponde a aquellos áridos que pasan por el tamiz 3/8" pero son retenidos en el tamiz #8. Se consideran que son las partículas intermedias las que llenan los grandes huecos, ayudando a la movilidad de la mezcla. A su vez reduce la dosis de agua por lo que incrementa la resistencia reduciendo la cantidad de mortero en la mezcla.
- **Áridos Finos (W):** Corresponden a los áridos que pasan por el tamiz #8, con ajuste debido al contenido de cemento.

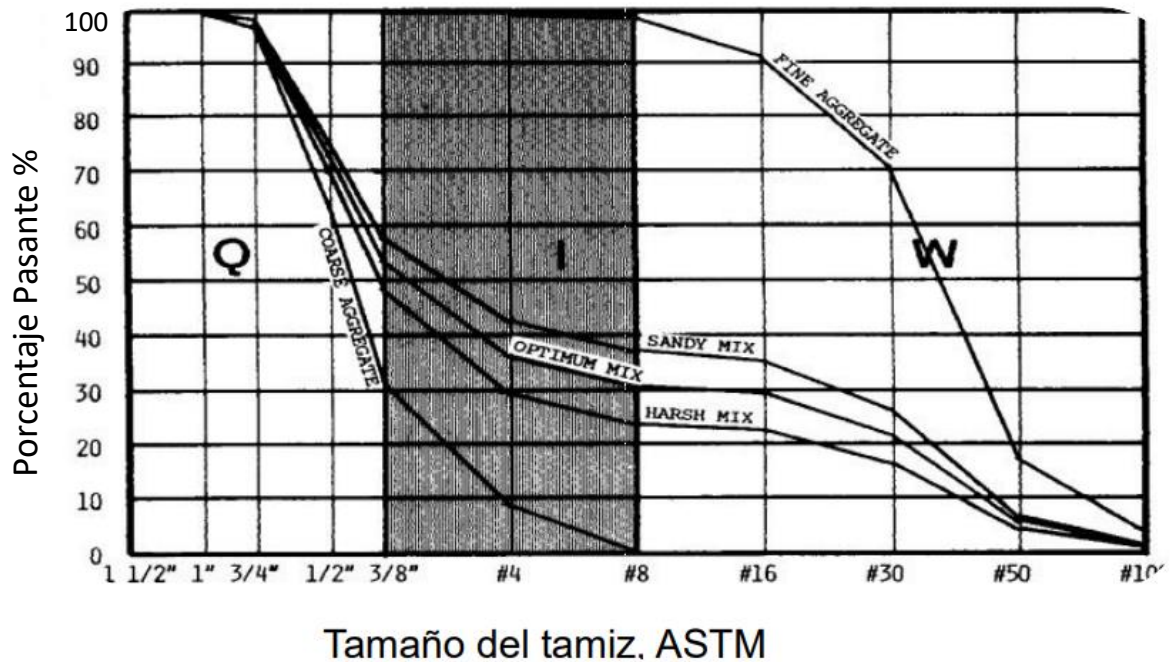


Figura 2.5: Clasificación de áridos según tamaño de tamiz. (Matus, 2014)

Una vez que se tiene la granulometría de los áridos para las bandas combinadas, se calculan los dos factores, los cuales se definen a continuación:

- **Factor Grueso (FG):** Consiste en la razón entre el porcentaje acumulado de árido que es retenido hasta el tamiz 3/8" y el porcentaje acumulado que es retenido hasta el tamiz #8.

$$FG = \left(\frac{Q}{Q + I} \right) * 100 \quad [EC. 2.21]$$

Esto quiere decir mientras más alto es el valor de la granulometría intermedia, menor será el factor grueso, encontrándose una razón mayor de agregado intermedio en la mezcla. Por otro lado si aumenta lo retenido en el tamiz 3/8" encontraremos razón más gruesa.

- **Factor de Trabajabilidad (FT):** Consiste al porcentaje de áridos que pasa por el tamiz #8, con una corrección por el contenido de cemento.

$$FT = W + \left(\frac{2.5(C - 564)}{94} \right) \quad [EC. 2.22]$$

Donde:

W = % Que pasa por el tamiz # 8.

C= Contenido de cemento (lbs/yr³).

A continuación, en la Figura 2.6 se presenta el Gráfico de Shilstone, que está configurado por los dos factores presentados anteriormente, estos son: en el eje de las abscisas el Factor Grueso (FG) y en el eje de las ordenadas el Factor de Trabajabilidad (FT).

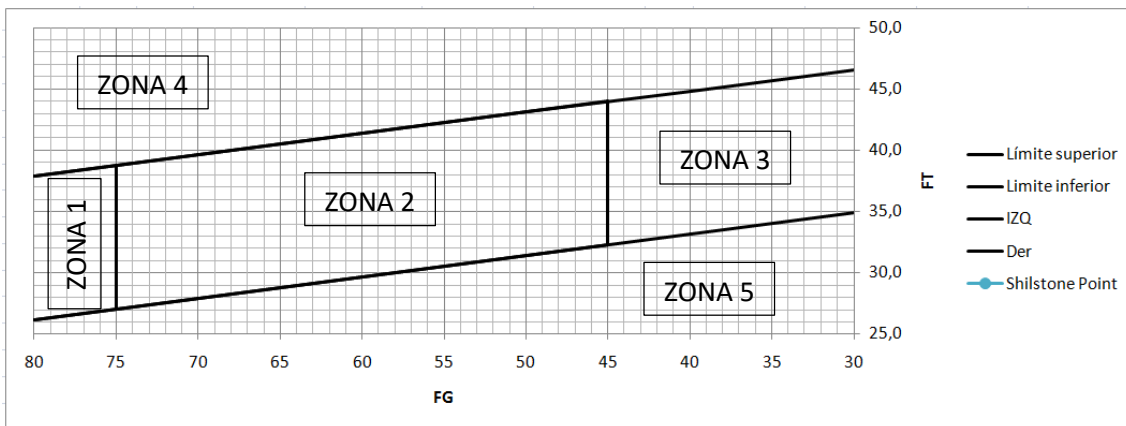


Figura 2.6: Gráfico de Shilstone.

Zonificación del Gráfico.

Como se aprecia en la Figura 2.6, el Gráfico de Shilstone se divide en cinco zonas las cuales tienen las siguientes características:

- Zona I: Es aquella que presenta una granulometría discontinua, con presencia de partículas no cohesivas, las cuales son propensas a generar segregación en el hormigón durante su colocación y/o consolidación. Las mezclas de áridos de esta zona tienden a producir agrietamiento local, burbujas y problemas de rugosidad.
- Zona II: Es la zona que es recomendada para hormigones que emplean áridos con tamaños máximos entre 50 mm y 19 mm, por lo general al utilizar esta distribución de áridos se obtienen hormigones trabajables y de baja permeabilidad. Por otro lado, se debe tener una consideración con aquellos áridos que se encuentren cerca de la barra de tendencia o de la zona I y IV, a ellos se les debe hacer un control más detallado y ajuste de las proporciones para que las partículas no queden fuera de esta zona.
- Zona III: Esta zona es recomendada para áridos con tamaño máximo de 19 mm.
- Zona IV: Los áridos que se encuentra en esta zona, tienen mayor contenido de árido fino (W) que de agregado grueso, sumado a su granulometría discontinua, al usarlos en una mezcla de hormigón, estos presentan segregación al momento del vibrado. También, conlleva a tener una baja resistencia y alta probabilidad de agrietamiento. Además, al tener mayor contenido de finos requieren un mayor contenido de agua.
- Zona V: Es aquella mezcla que en general presenta una mayor proporción de árido grueso y bajo contenido áridos finos (W), generando mezclas poco plástica de difícil trabajabilidad y presenta vacíos superficiales.

Sectorización de la zona 2 del grafico de Shilstone según método constructivo.

Según el método de colocación existen tres zonas que son graficadas en la Figura 2.7. Éstas son la A, B y C. Para mezclas ubicadas en zona A, los pavimentos exhiben un buen comportamiento al ser colocados por trenes pavimentadores, para los ubicados en zona B son mezclas más finas por lo que la pavimentación mecánica formada en terreno es más apropiada. Finalmente la zona C es para pavimentos colocados y terminados con trabajo manual (ACI 325, 2014).

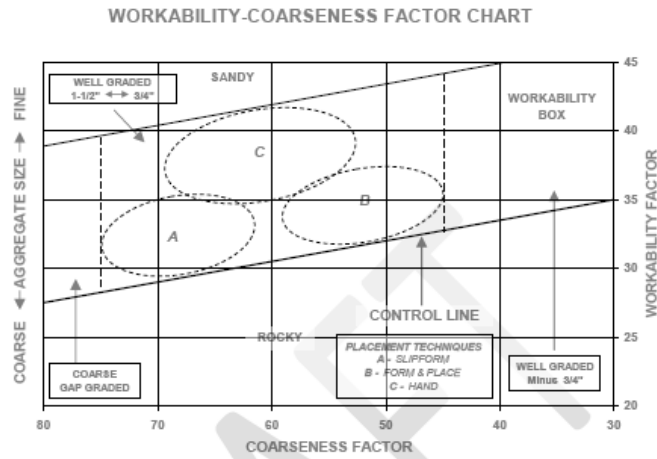


Figura 2.7: Ubicación recomendada según método constructivo (ACI 325, 2014).

Como se mencionó anteriormente, el método tiene poco respaldo teórico y experimental en Chile y el extranjero, sin embargo está siendo usado como método de optimización granulométrica en algunos proyectos. Además, se suma el interés del ICH (Instituto del Cemento y del Hormigón) por mejorar el tipo de especificación mecanicista que existe al momento de confeccionar los hormigones para pavimentos, incorporando nuevas metodología o tecnologías que aseguren el desempeño que tendrá la estructura.

Se decidió armar una matriz experimental donde se busca dar sustento y validación al Método de Shilstone. La metodología de trabajo se presentará en el capítulo 3 de esta memoria.

3. BASES DEL DISEÑO Y TRABAJO EXPERIMENTAL.

El objetivo es realizar un análisis de sensibilidad al “Gráfico de Shilstone”, con el fin de encontrar un sector donde la utilización de los parámetros que lo componen, ya sea el Factor de Trabajabilidad o el Factor Grueso de la granulometría de los áridos utilizados, garanticen el correcto desempeño que tendrá el pavimento. Para ello se realizan mezclas para distintos puntos dentro del gráfico, las cuales se ensayaron dentro del laboratorio.

Con el fin de analizar solo el efecto de la granulometría en las propiedades resultantes, y para evitar la influencia de otros parámetros, se mantuvo constante:

- La relación agua/cemento.
- Volumen de pasta.
- Tipo de agregado
- Tamaño máximo nominal del agregado
- Graduación bajo el tamiz #8.

Se realizó un análisis global de la Zona II del Gráfico de Shilstone, midiendo la sensibilidad de las variables del gráfico ante las propiedades a medir del hormigón. Paralelamente, también se acotó aun más el análisis al cuadrante CF [75, 60] y WF [35.5, 27] disminuyendo con ello la separación entre puntos, brindando así, un análisis más detallado en aquella zona. Se quiso analizar qué sucedía en esa sección ya que la literatura indica que es donde las mezclas son ideales cuando son colocados los pavimentos vía trenes pavimentadores (ACI325, 2014). Además la Dirección Nacional de Vialidad (MOP) ha incluido el Gráfico de Shilstone para optimizar las mezclas en sus licitaciones, como por ejemplo para la construcción del camino CH-60 Camino la Pólvora (MOP, 2012) o la Ruta G84.

3.1. MALLA DE PUNTOS EN EL GRÁFICO DE SHILSTONE.

La Figura 3.1 indica los puntos que se analizaron en el estudio. En total, fueron 15 mezclas distintas, en donde el factor que se varió para lograr aquellos puntos fue la granulometría. Todas las mezclas, como se aprecia en la Figura 3.1, ocupan un lugar específico en el Gráfico de Shilstone. Las razones por lo que se escogieron aquellos puntos fue la recopilación de información en la literatura y de las inquietudes generadas en la Comisión de Pavimentos de Hormigón del Instituto del Cemento y Hormigón de Chile. La comisión es una mesa de trabajo constituida por representantes del sector público, como lo es el Ministerio de Vivienda y Urbanismo y el Ministerio de Obras Públicas, además de consultores, contratistas, académicos y representantes de empresas que se dedican al rubro con

el fin de colaborar con la búsqueda de mejores alternativas y buenas prácticas que beneficien a todos los actores responsables en el mercado de la construcción de pavimentos de hormigón.

Las razones por la que se eligió esa malla de puntos fueron:

- Por la experiencia y recomendación de miembros de la comisión, las mezclas con un "Factor de Trabajabilidad" sobre 40, presentan problemas de trabajabilidad al momento de su utilización en terreno, por lo que no fueron consideradas en el alcance de este estudio.
- Se analizará en mayor profundidad el cuadrante inferior izquierdo, puesto que Vialidad lo propone como alternativa para la optimización granulométrica de los áridos (MOP, 2012).
- Si bien miembros de la comisión de pavimentos de hormigón dijeron que los puntos con un FG menor a 60 son mezclas de mayor costo en el mercado, de igual forma se analizarán ya que no es parte del alcance restringir el análisis por cuestiones económicas.
- Generar puntos equi-espaciados, con el fin de encontrar la zona II o reducir su área para la realidad chilena. Por lo demás facilita el análisis de varianza para estudiar la dependencia e influencia en el comportamiento del hormigón.
- Se busca un sector óptimo, que garantice que al momento de escoger granulometrías ubicadas dentro de ese sector, lograrán un mayor desempeño de acuerdo a las características a analizar.
- Se busca determinar el efecto aislado de los parámetros (FT y FG), para ello se mantuvieron constante el resto de las variables.

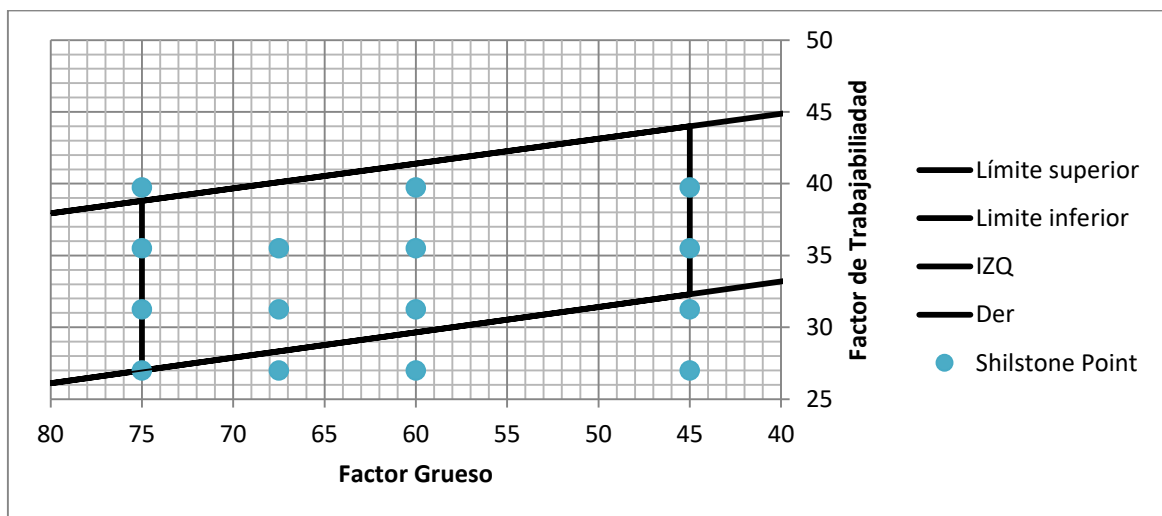


Figura 3.1: Malla de Análisis.

En la Tabla 3.1 se presenta el código asignado a cada mezcla para diferenciarlas entre ellas. El código se presenta de la siguiente manera:

$$C_W_$$

Donde el número que acompaña “C” indica el factor grueso de la mezcla y el número que acompaña “W” indica el factor de trabajabilidad. Finalmente, ambas combinadas indican la ubicación de la mezcla dentro de Gráfico de Shilstone.

Tabla 3.1: Coordenadas Malla.

CF	WF	Código
60,0	31,25	C60W31
60,0	35,50	C60W35
45,0	39,75	C45W40
75,0	39,75	C75W40
60,0	39,75	C60W40
45,0	31,25	C45W31
45,0	35,50	C45W35
60,0	27,00	C60W27
75,0	27,00	C75W27
45,0	27,00	C45W27
75,0	35,50	C75W35
75,0	31,25	C75W31
67,5	27,00	C67W27
67,5	31,25	C67W31
67,5	35,50	C67W35

3.2. ÁRIDO.

3.2.1. BANDAS GRANULOMÉTRICAS

Se utilizaron dos áridos distintos, cuyas bandas granulométricas presentaban distintos tamaños máximos.

Con el fin de alcanzar los puntos dentro del gráfico de Shilstone los áridos fueron tamizados en los tramos importantes para el análisis. Se tamizó en el tamiz #8 y en el 3/8”, dando por resultado las siguientes bandas granulométricas presentadas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Bandas Granulométricas Tamizadas en Laboratorio para ser Utilizadas en Confección de Granulometrías.

Tamiz		Porcentaje Pasante		
		Agregado		
ASTM	mm	Árido Grueso	Árido Intermedio	Árido Fino
2 in.	50	100%	100%	100%
1,5 in.	37,5	100%	100%	100%
1 in.	25	100%	100%	100%
3/4 in.	19	99%	100%	100%
1/2 in.	12,5	50%	100%	100%
3/8 in.	9,5	0%	100%	100%
#4	4,75	0%	63%	100%
#8	2,36	0%	0%	100%
#16	1,18	0%	0%	72%
#30	0,6	0%	0%	57%
#50	0,3	0%	0%	37%
#100	0,15	0%	0%	9%
#200	0,075	0%	0%	2%

La Tabla 3.2 presenta los porcentajes pasantes de cada una de las bandas granulométricas resultantes del tamizado. Estas son las bandas granulométricas base para la confección de las mezclas definitivas, ya que al combinarlas en distintas proporciones, se logra la distribución granulométrica que representa cada punto del Gráfico de Shilstone a estudiar.

3.2.2. TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO.

El tamaño máximo nominal (Dn) utilizado fue único y de 20 mm. Sabiendo que en Chile el tamaño máximo de agregado utilizado en pavimentos es de 40 mm, se decidió ocupar 20 mm, ya que es menos complejo de manipular en laboratorio, además, a medida que disminuimos el Dn, aumenta la resistencia a flexión, y, a mayor tamaño máximo, existe una mayor dispersión en los resultados. (Menéndez, 2010).

3.2.3. DENSIDADES.

Posterior a haber obtenido la granulometría, se obtuvieron las nuevas densidades de cada banda granulométrica junto a su absorción.

Para la obtención de la densidad real en estado seco, la densidad neta y la absorción del árido grueso, se utilizó la norma NCh 1117 of 2010. Los resultados se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Densidad y Absorción del Árido Grueso [Kgf/m³]

	Muestra A	Muestra B	Promedio
Densidad Real (ρ_{RS})	2650	2660	2650
Densidad Neta (ρ_N)	2740	2750	2740
Absorción (Ab)	1,27	1,17	1,22

Como la banda granulométrica del árido intermedio tiene áridos con tamaño mayor e inferior al tamiz #4, para obtener sus densidades y absorción, fue necesario utilizar tanto la norma que regula las gravas (NCh 1117 of 2010) como la que regula las arenas (NCh 1239 of 2009). Los resultados finales se presentan en la Tabla 3.4. Cuyo resultado es finalmente la fracción de masa que representa la arena sumado a la fracción de masa de la grava de la banda analizada.

Tabla 3.4: Densidad y Absorción del Árido Intermedio. [Kgf/m³]

	Arena	Grava	Resultado
Densidad Real (ρ_{RS})	2610	2610	2610
Densidad Neta (ρ_N)	2700	2730	2710
Absorción (Ab)	1,30	1,69	1,43

Para la tercera banda, la obtención de la densidad real en estado seco, la densidad neta y la absorción del árido, se hizo mediante la norma (NCh 1239 of 2009) ya que contiene arena de tamaño inferior al tamiz #8. Los resultados finales se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Densidad y Absorción de arena <#8. [Kgf/m³]

	Muestra A	Muestra B	Promedio
Densidad Real (ρ_{RS})	2520	2550	2540
Densidad Neta (ρ_N)	2700	2740	2720
Absorción (Ab)	2,56	2,59	2,57

3.2.4. OBTENCIÓN DE GRANULOMETRÍAS.

Para lograr los puntos de la malla establecidos en el estudio, se mezclaron las bandas granulométricas en distintas proporciones para alcanzar las curvas que se ajustan al punto dentro del gráfico.

Es así como al sumar, $Q\% \text{Arido Grueso} + I\% \text{Arido Intermedio} + W\% \text{Arido Fino}$, Se obtiene la Banda granulométrica combinada asociada al punto de la malla. Con $Q\% + I\% + W\% = 100\%$.

Cada uno de los puntos tiene asociado los parámetros FG y FT del gráfico de Shilstone, por lo que la forma de determinar los distintos porcentajes se explicará mediante el siguiente ejemplo.

Ejemplo: Cálculo de Q%, I% y W% para obtener un FG=60 y FT=31,25.

Primero, a partir de la fórmula del Factor de Trabajabilidad (EC 2.22) se obtiene W% que representa el contenido del árido fino.

$$FT - \left(\frac{2.5(C - 564)}{94} \right) = W$$

Donde al reemplazar:

$$FT = 31,25; C = 641 \text{ [lbs/yr}^3\text{]}.$$

Se obtiene W% = 29,21%. Lo que significa que al agregar un 29.21% de árido fino se obtiene un Factor de Trabajabilidad de 31.25 para un contenido de cemento de 380.2 kg/m³.

Para obtener el Factor grueso se necesita la ecuación (EC 2.21) que depende del valor de Q e I, quedando expresada de la siguiente manera:

$$FG = \left(\frac{Q}{Q + I} \right) * 100$$

Considerando, que $Q\% + I\% = 100\% - W\%$ y que para este ejercicio el FG = 60, al resolver el siguiente sistema de ecuaciones entre la EC 3.1 y 3.2

$$0.6 = \left(\frac{Q}{Q + I} \right) \quad [EC 3.1]$$

$$Q + I = 70,8 \quad [EC 3.2]$$

Obtenemos el valor final de árido grueso Q% = 42,50% y árido intermedio I% = 28,3%.

Finalmente, si mezclamos los áridos obtendremos el valor de FG = 60 y un FT = 31,25, siendo graficado en la Figura 3.2.



Figura 3.2: Punto FG = 60 y FT = 31.25 del Gráfico de Shilstone.

El mismo procedimiento se realizó con todos los puntos del estudio, generando 15 granulometrías distintas.

Las granulometrías utilizadas para los distintos puntos dentro del Gráfico de Shilstone se presentan en la Tabla 3.6, en ella se aprecia que las granulometrías con el mismo factor de trabajabilidad tienen la misma distribución granulométrica para los áridos que pasan por el tamiz #8.

Esto es importante, ya que si bien la fórmula del Factor de Trabajaabilidad depende del porcentaje que pasa por el tamiz #8, es importante que el porcentaje que pasa de cada uno de los tamices inferiores al #8 sea el mismo, de esta forma, se busca que la distribución bajo el tamiz #8 no influyese en los resultados. Esto es posible lograr ya que el contenido de cemento es constante para el estudio.

Tabla 3.6: Curvas granulométricas para las 15 mezclas

Tamiz	C67W35	C67W31	C67W27	C75W31	C75W35	C45W27	C75W27	C60W27	C45W35	C45W31	C60W40	C75W40	C45W40	C60W35	C60W31
2 in	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1,5 in	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1 in	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3/4 in	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1/2 in	78%	76%	75%	74%	75%	83%	72%	78%	85%	84%	81%	77%	86%	80%	79%
3/8 in	55%	52%	49%	47%	50%	66%	44%	55%	70%	68%	63%	54%	72%	60%	58%
#4	47%	44%	40%	40%	44%	51%	37%	44%	57%	54%	53%	48%	59%	50%	47%
#8	33%	29%	25%	29%	33%	25%	25%	25%	33%	29%	38%	38%	38%	33%	29%
#16	24%	21%	18%	21%	24%	18%	18%	18%	24%	21%	27%	27%	27%	24%	21%
#30	19%	17%	14%	17%	19%	14%	14%	14%	19%	17%	21%	21%	21%	19%	17%
#50	12%	11%	9%	11%	12%	9%	9%	9%	12%	11%	14%	14%	14%	12%	11%
#100	3%	3%	2%	3%	3%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
#200	1%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	0%

La Figura 3.2, es la distribución granulométrica de todas las mezclas con un Factor de Trabajabilidad de 27. Como se aprecia, el porcentaje que pasa de cada uno de los tamices de tamaño inferior al #8, es el mismo para las cuatro mezclas. Además, se constata que a mayor factor grueso la curva se desplaza hacia la derecha, esto se explica porque existe un mayor contenido de árido grueso y menor del intermedio.

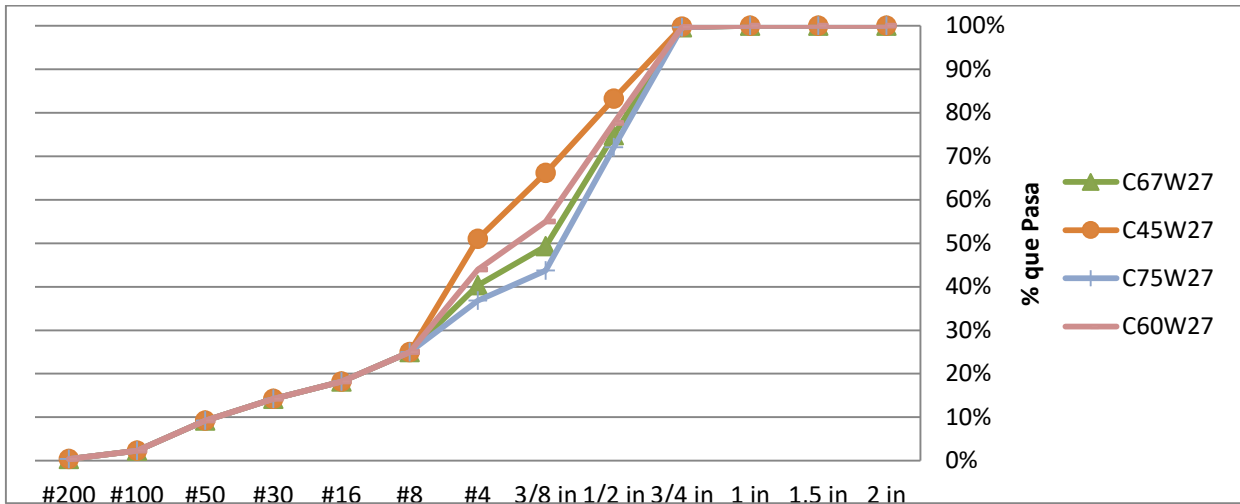


Figura 3.2: Curvas Granulométricas para un FT=27.

La Figura 3.3 grafica la distribución granulométrica de las mezclas con un Factor de Trabajabilidad de 31.25. Las apreciaciones son las mismas a la Figura 3.2, es decir, se mantiene el porcentaje que pasa de cada tamiz bajo el #8. Además, a mayor Factor grueso, la curva se desplaza hacia la derecha.

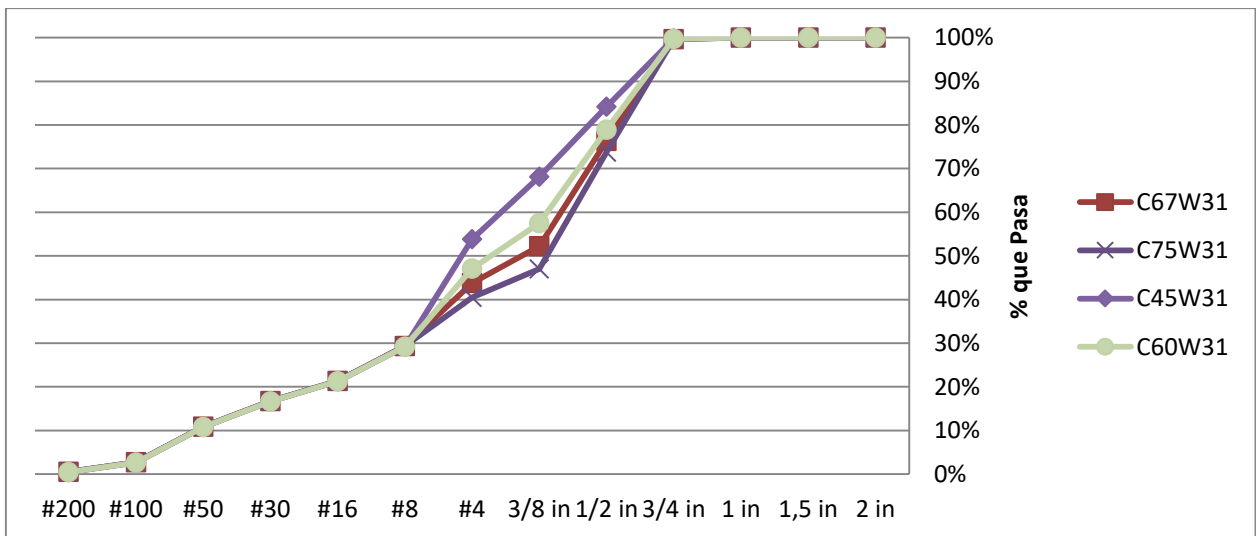


Figura 3.3: Curvas Granulométricas para un FT=31.25.

Las Figura 3.4 y 3.5, muestran la distribución granulométrica de todas las mezclas con un Factor de Trabajabilidad de 35.5 y 39.75 respectivamente. Al igual que las Figuras 3.2 y 3.3 los gráficos tienen el mismo comportamiento.

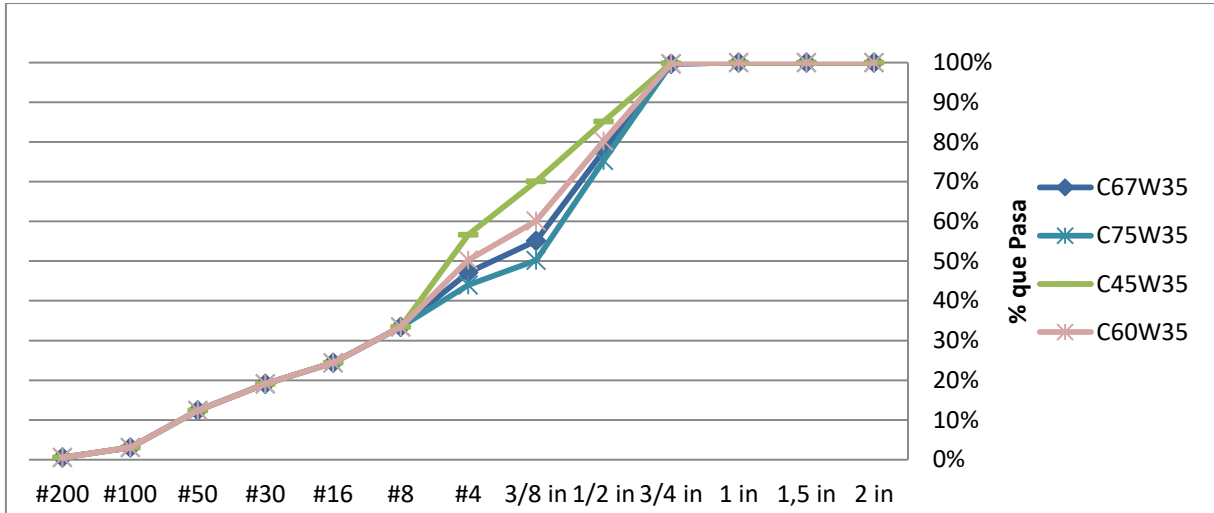


Figura 3.4: Curvas Granulométricas para un FT=35.5.

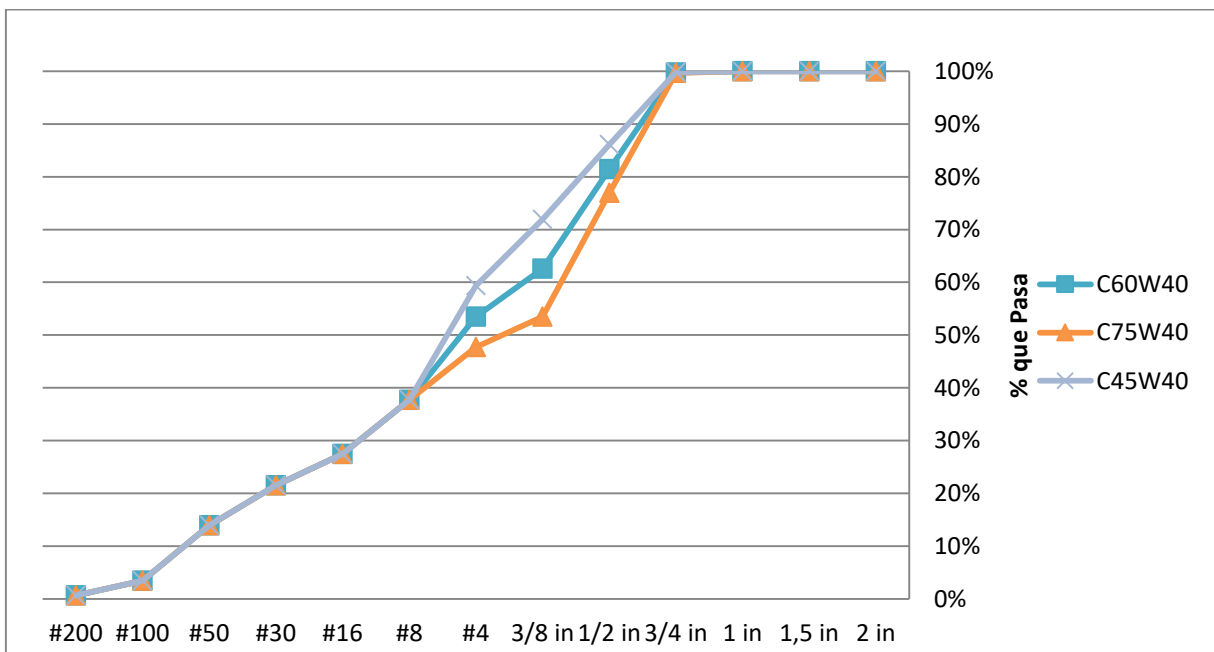


Figura 3.5: Curvas Granulométricas para un FT=39.75.

Como se ve en la Figura 3.6, se muestran las quince mezclas del análisis. Se aprecia que a mayor Factor de Trabajabilidad la curva tiende a subir. Esto se produce, porque existe un mayor contenido de áridos finos.

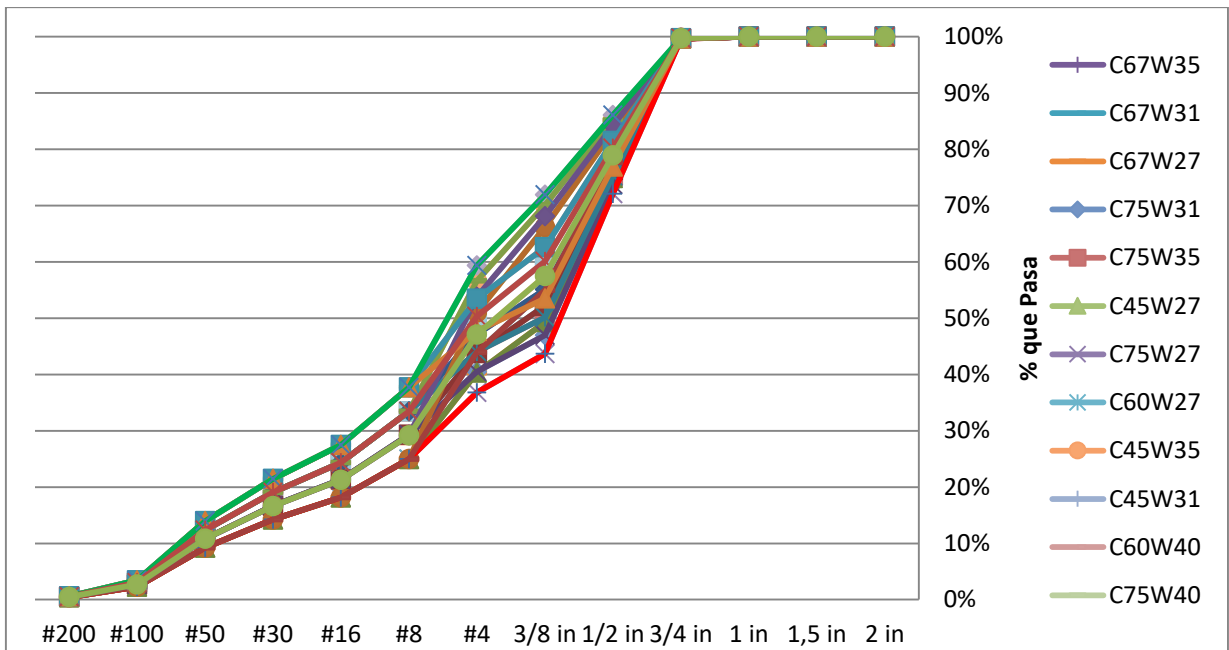


Figura 3.6: Curvas Granulométricas Utilizadas.

3.3. DOSIFICACIONES.

Para evitar que variables externas influyan en el resultado se mantuvieron las siguientes variables constantes.

Tabla 3.7: Parámetros fijos.

Volumen de Pasta V_p	30%
Relación Agua/Cemento a/c	0.45
Tamaño Máximo Nominal	20mm

Para nuestro caso, es conveniente trabajar con el método de densidades y volúmenes para dosificar nuestras mezclas de hormigón, ya que se ejerce un mayor control de los parámetros que se quieren mantener fijos en el análisis.

Conociendo las densidades reales de los componentes de la mezcla de hormigón es posible determinar la cantidad de cada material que se requiere a partir del volumen que ocupará de la mezcla y su densidad.

Primero se fija la relación agua-cemento a/c . Que en este estudio se fijó en 0.45, y el volumen de pasta de todas las mezclas es constante y de 30%.

3.3.1. CONTENIDO DE CEMENTO.

Con los datos anteriores, se determina el contenido de cemento para 1m^3 de mezcla.

El cemento utilizado fue donado por la empresa “Melón” en Santiago. Los sacos de cemento fueron de alta resistencia de densidad real $D_{rc}=2950\text{Kg}/\text{m}^3$.

Considerando la siguiente Ecuación 3.3,

$$m_c = \frac{V_p}{\left(\frac{1}{D_{rc}} + \frac{(a/c)}{D_a}\right)} \quad [\text{EC. 3.3}]$$

Donde,

m_c : Contenido de cemento.

V_p : Volumen de pasta (volumen de cemento + el volumen de agua).

D_{rc} : Densidad Real del Cemento.

D_a : Densidad del agua.

a/c : Relación agua cemento.

Al remplazar los valores definidos previamente,

$$m_c = \frac{0.3}{\left(\frac{1}{2950} + \frac{(0.45)}{1000}\right)}$$

Se obtiene un contenido de cemento

$$m_c = 380,2 \text{ kg}/\text{m}^3$$

3.3.2. CONTENIDO DE AGUA.

Se utilizó agua potable entregada por la red de agua de Esval, que cumple con la norma que regula el agua para amasado NCh 1498.

El contenido de agua para un estado superficialmente seco (SSS) se obtuvo utilizando la Ecuación 3.4

$$m_a = m_c \cdot a/c \quad [\text{EC. 3.4}]$$

Dando un contenido de agua libre $m_a = 171,1 \text{ Kg/m}^3$.

Al momento de realizar las mezclas, el contenido de agua fue corregido por la absorción de los áridos. Esto se debe a que los áridos utilizados están en estado seco, por lo que al momento de su uso absorben el agua de amasado. Entonces, para evitar que el agua absorbida sea la que participa de la reacción química con el cemento, se cuantifica el valor de absorción de los áridos y se agrega al sistema.

3.3.3. CONTENIDO DE ÁRIDOS.

Como se describió al comienzo del capítulo 3, se realizaron los ensayos requeridos para obtener la densidad real y absorción de los áridos gruesos, intermedios y finos. Además, previamente se calculó el porcentaje volumétrico de cada banda granulométrica, con lo que se generó el árido combinado que se utiliza en cada mezcla.

Se consideró un volumen de aire de 1%, en consecuencia se trabajó con un volumen total de árido combinado de 69% constante para todas las mezclas.

Con las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6. se determina el contenido de árido grueso, intermedio y fino.

$$m_{ag} = V_{ag} * D_{ag} \quad [\text{EC. 3.4}]$$

$$m_{ai} = V_{ai} * D_{ai} \quad [\text{EC. 3.5}]$$

$$m_{af} = V_{af} * D_{af} \quad [\text{EC. 3.6}]$$

Donde,

m_{ag} : Contenido de árido grueso.

m_{ai} : Contenido de árido intermedio.

m_{af} : Contenido de árido fino.

V_{ag} : Volumen del árido grueso respecto al total de la mezcla.

V_{ai} : Volumen del árido intermedio respecto al total de la mezcla.

V_{af} : Volumen del árido fino respecto al total de la mezcla.

D_{ag} : Densidad real del árido grueso.

D_{ai} : Densidad real del árido intermedio.

D_{af} : Densidad real del árido fino.

Como se explicó previamente, el contenido de cada componente está en base a un metro cúbico. Entonces, para obtener la masa de cada material que se utilizará para conformar la mezcla, es necesario multiplicar por los 65 litros que se requieren para completar los cuatro cilindros y las cuatro viguetas.

La Tabla 3.8 presenta la dosificación de cada una de las mezclas planificadas y realizadas, mediante el método de proporciones. Esta tabla se presenta en dos secciones, ordenadas según el código de la mezcla.

En la primera sección, se indican los porcentajes volumétricos de cada banda granulométrica para la conformación del árido combinado que se utilizará en la mezcla. Estas proporciones son la base del estudio ya que mediante ellas se lograron las granulometrías que se ajustaron a cada punto de la malla propuesta del gráfico de Shilstone.

La segunda sección presenta el contenido de cada uno de los materiales utilizados en la fabricación del hormigón, además se incorpora el contenido de agua que hay que agregar al sistema por efectos de la corrección por humedad. Posteriormente estos valores son multiplicados por los 65 litros de mezcla y se obtiene la masa requerida de cada componente.

Tabla 3.8: Dosificaciones de mezclas en estado SSS.

N Mezcla	Código	DOSIFICACION DE LAS MEZCLAS ESTADO SSS				Densidad Teórica				
		Árido Grueso (%AT)	Árido Medio (%AT)	Árido Fino (%AT)	Cemento (kg/m3)					
1	C75W27	38,8%	12,9%	17,2%	380,2	171,1	1043,2	341,8	448,5	2385
2	C45W27	23,3%	28,4%	17,2%	380,2	171,1	626,7	751,8	448,5	2378
3	C60W27	31,1%	20,7%	17,2%	380,2	171,1	834,2	547,5	448,5	2382
4	C75W35	34,4%	11,5%	23,1%	380,2	171,1	923,7	304,4	601,3	2381
5	C45W35	20,6%	25,3%	23,1%	380,2	171,1	554,0	668,3	601,3	2375
6	C60W35	27,5%	18,4%	23,1%	380,2	171,1	739,3	485,9	601,3	2378
7	C75W31	36,6%	12,2%	20,2%	380,2	171,1	982,0	322,6	526,7	2383
8	C60W31	29,3%	19,5%	20,2%	380,2	171,1	787,5	516,0	524,9	2380
9	C45W31	22,0%	26,8%	20,2%	380,2	171,1	591,1	709,3	524,9	2377
10	C75W39	32,1%	10,9%	26,0%	380,2	171,1	861,6	288,0	677,6	2379
11	C60W39	25,8%	17,2%	26,0%	380,2	171,1	693,0	454,0	677,6	2376
12	C45W39	19,4%	23,6%	26,0%	380,2	171,1	519,7	624,5	677,6	2373
13	C67W35	31,0%	14,9%	23,1%	380,2	171,1	832,0	394,7	601,3	2379
14	C67W31	33,0%	15,8%	20,2%	380,2	171,1	885,7	417,5	526,7	2381
15	C67W27	35,0%	16,8%	17,2%	380,2	171,1	939,4	443,9	448,5	2383

3.4. ENSAYOS DE LABORATORIO.

El fin de esta memoria, es aportar con resultados experimentales a un mejor entendimiento de la influencia de la granulometría optimizada por el Método de Shilstone, en específico, determinar si existe correlación entre la zona del Gráfico de Shilstone donde se ubica la granulometría de la mezcla y las propiedades mecánicas medidas en el proyecto. Para ello a quince mezclas se les realizó los siguientes ensayos.

Las propiedades a medir en estado endurecido fueron:

- Compresión a 28 días. Según NCh1037 of.2009
- Flexión a 28 días. Según NCh1038 of.2009

Las propiedades que se midieron en estado fresco:

- Cono de Abrams. Según NCh1019 of.2009

Se optó por ensayos tradicionales, normados y que comúnmente se solicitan para un hormigón de pavimentos, de este modo veremos la influencia que tiene la granulometría de la mezcla y su ubicación en el gráfico de Shilstone en el desempeño del pavimento de hormigón.

3.4.1. CONFECCIONAMIENTO DE HORMIGONES.

La preparación de los hormigones se realizó en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, ayudado en todo el proceso de los ensayos por el Laboratorista Don Tomás Pacheco.

Para materializar cada una de las 15 mezclas ya dosificadas previamente, se realizó el siguiente procedimiento:

- Se separó la porción de árido de cada una de las tres bandas granulométricas generadas.
- Para un mejor control de la humedad y la correspondiente corrección de la dosificación por la absorción de los áridos, se secaron los áridos durante 24 horas como se muestra en la Figura 3.8. Para corroborar que estaba en estado seco, la muestra fue pesada en periodos de 1 hora, y cuando la diferencia porcentual entre un registro y el otro era de 0.1%, la muestra era retirada.
- Se esperó a que se enfriaran los áridos y se almacenaron en un lugar cerrado, hasta el momento de la fabricación de las mezclas.
- Al mezclar el árido en estado seco con los otros componentes, el agua que es agregado al sistema, será absorbida por los áridos y no participará del proceso químico del cemento.

Por esta razón se realizó una corrección por humedad para determinar e incorporar el agua faltante.



Figura 3.8: Secado de Áridos.

- Se pesa en balanza la cantidad de material que se requiere para completar los 65 litros de hormigón que se necesitan para llenar las 3 viguetas y los 4 cilindros (Figura 3.9).



Figura 3.9: Materiales Pesados.

- A las probetas de la Figura 3.10 se les coloca el desmoldante SikaForm® Metal 99 para facilitar el desmolde y se mantenga la forma al momento de retirar el molde.



Figura 3.10: Moldes Viguetas y Cilindros.

- El cemento y los áridos se colocaron en la betonera encendida, con capacidad de 120 litros. Posteriormente se agrega de apoco el agua hasta lograr una mezcla homogénea lista para ser utilizada.

El hormigón fresco ya homogenizado está listo para ser utilizado en los distintos ensayos planificados. A continuación se detalla el procedimiento para la realización del Cono de Abrams, y los ensayos a compresión y flexo-tracción a 28 días.

3.4.2. CONO DE ABRAMS.

Se realizó siguiendo las disposiciones de la norma NCh1019 of.2009 El asentamiento del Cono de Abrams permite medir la docilidad del hormigón fresco, por la disminución de su altura al momento de desmoldar.

El ensayo se hace en un molde, que tiene forma de cono, con la parte superior e inferior abiertas y con dos pisaderas en la parte inferior y dos asas en el primer tercio, como se muestra en la Figura 3.11.

La prueba se hace en el suelo una vez que la mezcla este bien homogeneizada cuyo procedimiento es el siguiente:

- Se humedece la base y el molde con agua potable. La base debe ser lisa y libre de vibraciones.
- Uno de los operadores apoya el cono a la base procurando que el cono esté en contacto en su sección más ancha. El operador se posa sobre las pisaderas dejando inmóvil el cono mientras es llenado con la mezcla.
- Al estar el cono firme se comienza el ensayo, llenando tres capas de volumen similar.
- Cada capa debe ser apisonada con 25 golpes de varilla o pisón y distribuirlos en forma homogénea en la sección y con cuidado de no tocar el fondo ni los bordes.
- Finalizada la compactación de la última capa, se enrasa la parte superior con el pisón.
- Afirmar las asas del cono, y levantar el cono evitando golpearlo con la base y en un tiempo de 5 ± 2 s.
- Luego invertir el cono y ponerlo al lado del hormigón moldeado, colocar el pisón sobre el cono y medir la diferencia entre el cono y hormigón (su asentamiento), registrando este valor con una precisión de 0,5 cm como se muestra en la Figura 3.11.



Figura 3.11: Cono de Abrams de C75W40 - 4cm.

3.4.3. CONFECCIÓN Y CURADO DE PROBETAS PARA ENSAYOS A COMPRESIÓN.

La confección y curado de probetas ensayadas a compresión se realiza de acuerdo a la norma NCh1017.Of2009.

En la confección de las probetas de hormigón se utilizaron moldes cilíndricos, con diámetro interior 15 cm y altura 30 cm.

Confección de probetas Cilíndricas

- Los moldes cilíndricos se les colocó una película de desmoldante de aceite mineral, el cual es químicamente inerte al hormigón, evitando su adherencia al momento del desmolde.
- Luego se colocó el hormigón en los moldes, en dos capas de espesores parecidos.
- Para la compactación al ser todos conos inferiores a 12 cm hubo que vibrar la mezcla. La compactación se realizara con vibrador de inmersión y consiste en vibrar en el centro las dos capas de hormigón de los moldes cilíndricos, teniendo la precaución de no tocar el fondo en la primera capa, ni las paredes del molde y en la capa superior penetrar hasta dos centímetros de la capa inferior.
- Se vibra hasta que dejen de salir burbujas y una capa de lechada cubra la superficie de la probeta
- Finalmente se enrasa y alisa el hormigón con un platacho. Una vez listas se le asigna un nombre para identificar a cada molde.

Curado de probetas

Una vez llenados los moldes son llevados a cámara húmeda, para efectuar el proceso de curado, éste se realiza a una temperatura de 22°C y HR > 90 % por 48 horas, como se muestra en el panel de control de la cámara húmeda de la Figura 3.12.



Figura 3.12: Humedad y Temperatura Cámara Húmeda.

Transcurridas 48 horas, son retiradas las probetas de la cámara húmeda para ser desmoldadas. Posterior al desmolde, se almacenan los 26 días restantes en la misma cámara hasta la fecha del ensayo (Figura 3.13).



Figura 3.13: Cámara Húmeda.

3.4.4. CONFECCIÓN Y CURADO DE PROBETAS PARA ENSAYOS A FLEXOTRACCIÓN.

La confección de los moldes prismáticos para ensayos a tracción por flexión se hace de acuerdo a la misma norma que para los ensayos a compresión.

Los moldes prismáticos poseen aristas de 15x15x53 cm

Confección de probetas prismáticas

- Al igual que los moldes cilíndricos, esos deben ser untados con un desmoldante, para prevenir la adherencia de hormigón en las paredes del molde.
- Como el modo de compactación es por vibrado se colocara el hormigón en una capa, poniéndolo cuidadosamente, para evitar la segregación.
- Compactar las probetas y luego enrasar el hormigón superficial con el platacho, con movimientos aserrados, evitando separar el mortero del árido grueso. Por último alisar la superficie con llana. Una vez listas, asignar un nombre a cada probeta.

Curado de probetas prismáticas

El curado de las vigas se hará en cámara húmeda, en donde permanecerán por 48 horas, hasta ser desmoldadas.

Desmolde de probetas

Transcurridas las 48 horas, las probetas serán desmoldadas, ya que las condiciones de resistencia de la vigueta son suficientes para aguantar su propio peso sin agrietarse.

Después de desmoldar las probetas, fueron trasladadas a una piscina de curado (Figura 3.14) con agua saturada en cal a una temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se mantuvieron ahí, hasta ser ensayadas.



Figura 3.14: Piscina de Curado.

3.4.5. REFRENTADO DE PROBETAS CILÍNDRICAS.

El refrentado se efectúa a las probetas destinadas a ensayos de compresión. Esto consiste en corregir los defectos de planeidad y/o paralelismo en las probetas, para que las caras coincidan mejor con las piezas de apoyo y la carga de la prensa al momento de efectuar el ensayo.

Para el refrentado se debe preparar una pasta de azufre que debe ser calentada a una temperatura de $130\text{ a }145\text{ }^{\circ}\text{C}$, se aplica en las probetas y se deja endurecer. La máquina de refrentado utilizada se presenta en la Figura 3.15.

Las capas de refrentado de ambas caras deben ser golpeadas antes de ensayar la probetas, si esta emite un sonido hueco debe ser removida y cambiada antes del ensayo.



Figura 3.15: Máquina de Refrentado.

3.4.6. ENSAYOS A COMPRESIÓN.

Los ensayos a compresión para probetas cilíndrica, se efectúa de acuerdo a la norma NCh1037.Of2009.

El procedimiento es el siguiente:

- Las probetas fueron sacadas de la cámara húmeda y trasladadas a la máquina de ensayo. La máquina utilizada se presenta en la Figura 3.16.
- Se registra la masa de las probetas antes de refrentar.
- Se limpia la superficie de las placas y la cara de ensayo de la probeta, luego se coloca la probeta con una de sus caras refrentadas, en la placa inferior.
- Se ajustan las placas de carga a las superficies refrentadas.
- La carga se aplica en forma continua de 0,18 MPa/s, hasta alcanzar la rotura.
- Se registra la carga máxima y se obtiene la resistencia a compresión, para ello se debe conocer la sección de ensayo que se determina por la siguiente expresión.

$$S = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2 \quad [\text{EC. 3.7}]$$

- Conocida la sección de ensayo se puede calcular la resistencia a la compresión.

$$R = \frac{P}{S} \quad [\text{EC. 3.8}]$$

Donde,

P: Carga máxima aplicada por la máquina de ensayo, en kN

R: Resistencia a la compresión, MPa.

S: Sección de ensayo, en mm².



Figura 3.16: Maquina Ensayo Compresión.

3.4.7. ENSAYOS A TRACCIÓN POR FLEXIÓN.

La norma NCh1038.Of2009 define los procedimientos para efectuar un ensayo de tracción por flexión en vigas.

De acuerdo a las dimensiones, existe dos formas de aplicar la carga, en este caso como la altura de la viga es de 150 mm se usará el siguiente procedimiento, se aplicarán dos cargas P/2 en los límites del tercio central de la luz de ensayo.

Procedimiento

- Las probetas fueron sacadas de la piscina de curado y protegidas con arpilleras húmedas.

- En el ensayo consiste en aplicar una carga de $P/2$ en la luz de carga (L), con $L \geq 3h$, donde h es igual a la altura de la probeta.
- Se trazaron líneas finas sobre las cuatro caras mayores, marcando la sección de apoyo y de carga, sin alterar las características de la probeta.
- Una vez registradas las medidas de las caras de las probetas, se trazan líneas en los tercios de las probetas, con el fin de obtener la medida de tercio central, lugar donde se aplica la carga y los tercios de los extremos, lugar donde se apoya la probeta que determina la luz de ensayo.
- Se limpian la zona de apoyo y de carga, antes de poner la probeta a ensayar.
- Se coloca la probeta en la prensa, haciendo coincidir las líneas de trazado con el elemento de apoyo y de carga, como se muestra en la Figura 3.17.



Figura 3.17: Máquina Ensayadora a Flexotracción.

- Verificando que todo lo anterior este correcto, se procede a ensayar aplicando una carga continua de 0,86 MPa/min a 1,21 MPa/min.
- Registrar la carga máxima, en las unidades que indique la máquina.
- Se obtuvo la resistencia de tracción por flexión de acuerdo a la ubicación de la falla de la probeta.
- Si la falla es en el tercio central de la luz de ensayo como se aprecia en la Figura 3.18, se determina la resistencia a la tracción por flexión, igual que la tensión de rotura, de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$R = \frac{P * L}{B * h^2} \quad [\text{EC. 3.9}]$$

Donde,

P: Carga máxima aplicada, en kN.

R: Tensión de rotura, en MPa.

L: Luz de ensayo de la probeta, en 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.

- Si la falla se da fuera del tercio central de la luz de la probeta, es decir, entre la línea de aplicación de la carga y una distancia de 0,05 L, se determina la resistencia de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$R = \frac{3 * P * a}{b * h^2} \quad [\text{EC. 3.10}]$$

a: Distancia entre la secciones de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo de la línea central de la superficie inferior de la probeta, en mm.

- Por último si la falla se da fuera del tercio central de la luz de ensayo se descartan los resultados de ese ensayo.



Figura 3.18: Viguetas ensayadas a Flexotracción.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados por ensayos:

4.1. CONO DE ABRAMS

La Tabla 4.1 presenta los resultados del ensayo Cono de Abrams de cada una de las quince mezclas en mm. El cono promedio fue de 39 mm con una desviación estándar de 12 mm, lo que muestra la alta variación que existe en los resultados al utilizar el método.

Se aprecia que todos los conos están dentro del rango de 15 a 100 mm que es el que se establece para la confección de pavimentos de hormigón según sea su método constructivo de colocación.

Si acotamos más aún el rango donde se encuentran los resultados, se lograron conos ideales para ser utilizados en la confección de pavimentos de hormigón mediante trenes pavimentadores, ya que para su uso, lo que se necesita son mezclas que al momento de su colocación y vibrado durante el paso del tren, la losa mantenga su forma, sin asentar ni perder el aplomo de las esquinas. Por lo anterior es necesario tener conos bajos entre 15 y 50 mm (ACI325, 2014). La misma norma indica que el sector que se recomienda es el A, ubicado en la esquina inferior izquierda de la zona 2 del gráfico de Shilstone, sin embargo los resultados en términos de trabajabilidad, indican que las mezclas ubicadas en todo el sector 2 del gráfico, e incluso las que están fuera de tal límite funcionan para ser utilizadas por el método constructivo antes mencionado.

Como se aprecia en la Tabla 4.1 Las mezclas ubicadas en los puntos C67.5W27, C60W27, C45W27 y C67.5W31.25 se encuentran fuera de la zona 2 propuesta por Shilstone como la idónea para la confección de hormigones para pavimentos de hormigón, sin embargo se obtienen conos de 50, 30, 45 y 40 mm respectivamente lo que nos indica que hay que realizar un mayor estudio a los límites de la zona propuesta por James Shilstone.

Tabla 4.1: Resultados Cono de Abrams

		Cono de Abrams (mm)			
		FG			
f		75,0	67,5	60,0	45,0
	39,75	40,0		45,0	30,0
	35,50	30,0	30,0	25,0	40,0
	31,25	45,0	40,0	20,0	40,0
	27,00	70,0	50,0	30,0	45,0

La Figura 4.1 muestra un gráfico en tres dimensiones, donde la base es la vista en planta del Gráfico de Shilstone y la altura de las barras indica la magnitud del Cono de Abrams para cada mezcla.

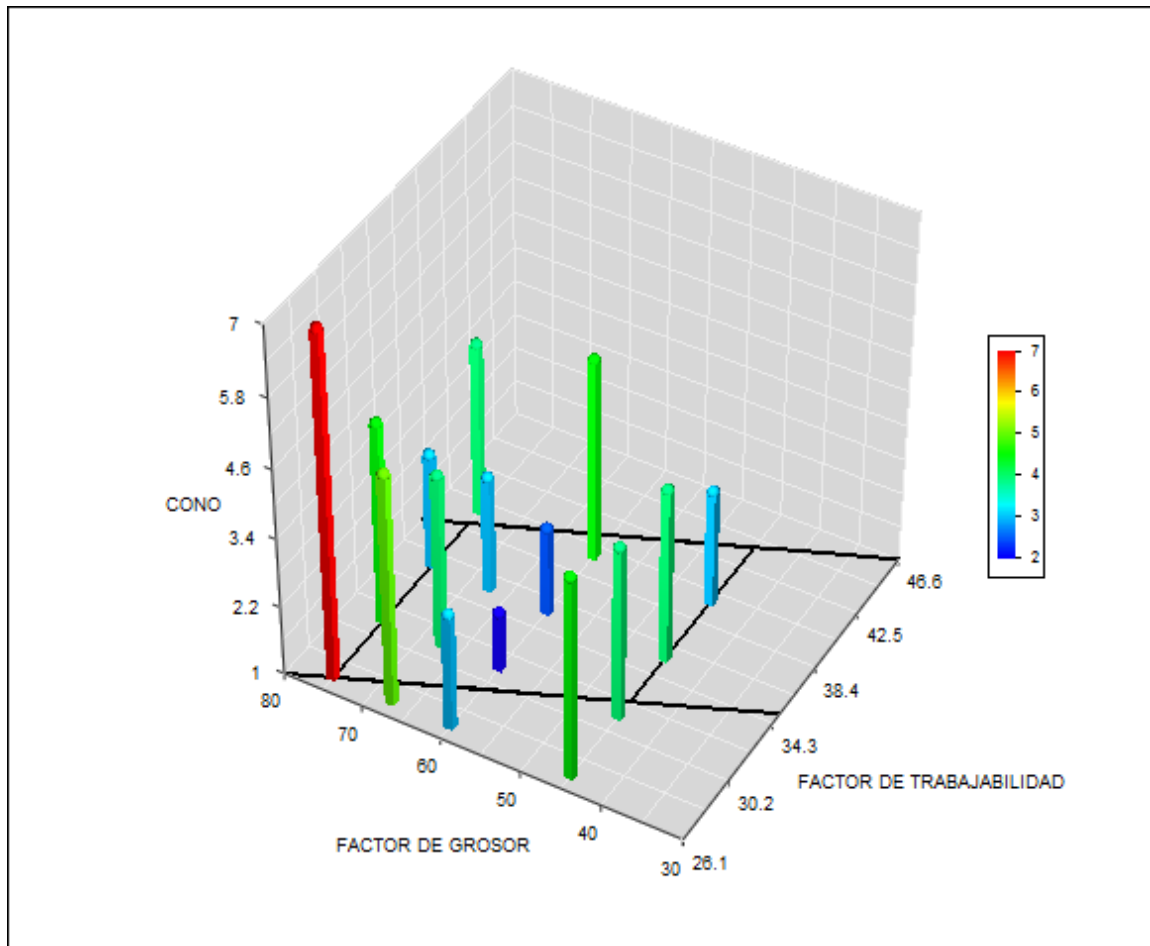


Figura 4.1: Gráfico Cono de Abrams.

Con el fin de evaluar si los valores del cono de abrams dependen de los distintos niveles de los factores (grosor y de trabajabilidad) o de la interacción de ambas, se realizará un análisis ANOVA bivariada.

Existe interacción ente ambos factores cuando el efecto de un factor sobre la variable dependiente depende de cuál es la variación del otro factor.

Sea la variable dependiente, la propiedad de docilidad medida por el cono de Abrams.

B_j : Factor Grosor nivel j , con $j = [1, 2, 3, 4]$

A_i : Factor de Trabajabilidad nivel i , con $i = [1, 2, 3, 4]$

k_{ij} : Número de observaciones en nivel $ij \rightarrow 1$

Se generan las siguientes hipótesis:

$$H_{0(A)}: \mu_{1\bullet} = \dots = \mu_{i\bullet}$$

Las 4 medias poblacionales correspondiente a los 4 niveles del Factor de Trabajabilidad.

$$H_{0(B)}: \mu_{\bullet 1} = \dots = \mu_{\bullet j}$$

Las 4 medias poblacionales correspondiente a los 4 niveles del Factor Grueso.

$$H_{0(AB)}: \mu_{ij} - \mu_{i'j} = \mu_{i\bullet} - \mu_{i'\bullet}$$

No hay efecto de interacción.

$$H_{0(A)}: \mu_{i\bullet} \neq \mu_{i'\bullet}$$

El Factor de Trabajabilidad influye o afecta a la variable dependiente.

$$H_{0(B)}: \mu_{\bullet j} \neq \mu_{\bullet j'}$$

Las 4 medias poblacionales correspondiente a los 4 niveles del Factor Grueso.

$$H_{0(AB)}: \mu_{ij} - \mu_{i'j} \neq \mu_{i\bullet} - \mu_{i'\bullet}$$

Hay efecto de interacción.

La Tabla 4.2 entrega los resultados de las medias poblacionales por nivel para el Factor Grueso ($\mu_{j\bullet}$) y para el Factor de Trabajabilidad ($\mu_{\bullet j}$).

Donde $B_1 = 75,0$; $B_2 = 67,5$; $B_3 = 60,0$; $B_4 = 45,0$; $A_1 = 27,00$; $A_2 = 31,25$; $A_3 = 35,50$; $A_4 = 39,75$;

Tabla 4.2: Medias Poblacionales por Niveles para Cono de Abrams.

Cono de Abrams (mm)/ANOVA						
Factor Grueso: B_j						
		75,0	67,5	60,0	45,0	$\mu_{\bullet j}$
Factor de Trabajabilidad: A_i	39,75	40,0		45,0	30,0	38,3
	35,50	30,0	30,0	25,0	40,0	31,3
	31,25	45,0	40,0	20,0	40,0	36,3
	27,00	70,0	50,0	30,0	45,0	48,8
	$\mu_{i\bullet}$	46,3	40,0	30,0	38,8	38,7

La Tabla 4.3 muestra los parámetros que se miden en un análisis ANOVA, para determinar la región de rechazo de la hipótesis, y de esa forma determinar la interacción que existe entre el Factor Grueso y el Factor de Trabajabilidad respecto al Cono de Abrams de la mezcla.

Tabla 4.3: Parámetros de ANOVA para Determinar Región de Rechazo de la Hipótesis.

FV	SC	G.L.	MC	F
Factor A	SCA	I-1	SCA/(I-1)	FA=MCA/MCE
Factor B	SCB	J-1	SCB/(J-1)	FB=MCB/MCE
Interacción	SCAB	(I-1)(J-1)	SCAB/(I-1)(J-1)	FBA=MCAB/MCE
Error	SCE	N-IJ	SCE/N-IJ	
Total	SCT	N-1		

Donde,

FV: Es el origen de la variación.

SC: Es la suma de cuadrados.

GL: Grados de libertad.

MC: Cuadrado de la media.

F: Valor del Estadístico de Prueba.

FA se distribuye según $F_{\alpha, I-1, (I-1)(J-1)}$ donde la región de rechazo para la hipótesis es $f \geq F_{\alpha, I-1, (I-1)(J-1)}$. De forma análoga se determina la región de rechazo para el resto de las hipótesis.

La **Tabla 4.4** arroja los resultados de los parámetros del análisis.

Tabla 4.4: Tabla Resultados Parámetros del Análisis de Varianza.

FV	SC	G.L.	MC	F
Factor A	1.19	1	1.19	0.3795
Factor B	2.77	1	2.77	0.1899
Interacción	1.15	1	1.15	0.3878
Error	15.62	11	1.42	
Total	SCT	N-1		

Para ello se utilizó el programa R:

Donde se generó el siguiente código:

```
#Cargar data
data_cono<-read.csv("Cono.csv")
#anova
fit_3_1 <- aov(PROMEDIO ~ WF, data=data_cono)
fit_3_2 <- aov(PROMEDIO ~ CF, data=data_cono)
fit_3_3 <- aov(PROMEDIO ~ CF+WF, data=data_cono)
fit_3_4 <- aov(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF, data=data_cono)
#summary
summary(fit_3_1)
summary(fit_3_2)
summary(fit_3_3)
summary(fit_3_4)
#Graficos
(datos.aov=aov(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF, data=data_cono))
plot(datos.aov)
#Resumen
summary(datos.aov)
anova(lm(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF, data=data_cono))
```

Las reglas de decisión son:

Rechazar $H_0(A)$ si el estadístico F_A caen en la zona crítica. Se mantiene hipótesis en caso contrario.

Rechazar $H_0(B)$ si el estadístico F_B caen en la zona crítica. Se mantiene hipótesis en caso contrario.

Rechazar $H_0(AB)$ si el estadístico F_{AB} caen en la zona crítica. Se mantiene hipótesis en caso contrario.

Del análisis estadístico, se desprende que no existe relación entre FG y FT con el cono de Abrams que presenta la mezcla, ni tampoco existe interacción entre ambos factores. Ya que el estadístico de prueba de cada hipótesis nula está dentro de la zona crítica. Además a los resultados se les realizó una regresión lineal y polinómica. El objetivo de una regresión bivariada es construir un modelo probabilístico que relacione la variable independiente. En nuestro caso el cono de Abrams, con las variables independientes; Factor grueso y Factor de trabajabilidad del Gráfico de Shilstone.

El modelo que recoge todas las variables es el de segundo orden completo, contemplando en el análisis la interacción entre ambas variables.

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_1^2 + \beta_4x_2^2 + \beta_5x_1x_2 + \varepsilon$$

Donde,

Y: Cono de Abrams

x_1 : Factor de Trabajabilidad

x_2 : Factor Grueso

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 : Parámetros del Modelo

Para estimar los parámetros, se calculan mediante la suma de desviaciones al cuadrado, en donde los valores encontrados reducen la distancia entre los datos observados y la recta.

Para esto se utilizó el programa R, donde se generó el siguiente código:

```
#Regresion linal  
#Grafico de las variables  
pairs(data_cono)  
#correlacion entre variables  
cor(data_cono, use = "everything", method = "pearson")  
#regresion lineal  
regresion_3 <- lm(PROMEDIO ~ CF+WF+CF*WF+I(CF^2) + I(WF^2), data = data_cono)  
summary(regresion_3)  
#estudio seleccion de vairables  
step(regresion_3, direction = "forward")  
#Mejor Modelo  
regresion_3_2 <- lm(PROMEDIO ~ CF+WF+I(CF^2) + I(WF^2), data = data_cono)  
summary(regresion_3_2)
```

De las múltiples regresiones que se realizaron, la mejor es aquella que considera las variables CF, WF, CF² y WF², a pesar de esto, la mejor regresión presenta un R² (0.367) muy bajo lo que indica que el modelo no es adecuado, por lo que se concluye que no hay relación lineal entre las variables CF, WF y la respuesta. Esto no implica que no haya relación entre las variables y la respuesta, solo nos dice que la relación no es lineal.

4.2. COMPRESIÓN A 28 DÍAS.

En el Anexo A se presentan los resultados de compresión obtenidos de los cuatro ensayos por mezcla que se realizaron. La Tabla A.1 pone los resultados de cada uno de los cuatro ensayos realizados a compresión de cada punto de la malla, con sus respectivos promedios y desviaciones estándar.

Mediante el criterio de Chauvenet's (Taylor, 1997), se desecharon los resultados extremos que alteraban los promedios, y pudieron deberse por una equivocación experimental.

El criterio consiste en $\frac{\bar{x}-x_i}{\sigma} > 1.54$, donde, si la razón entre la diferencia entre el dato y la media, dividida en la desviación estándar de la muestra es mayor a 1.54, el dato es considerado outlier y es sacado del registro y se re estructuran los resultados. La Tabla 4.5 arroja los resultados sin los datos atípicos.

Tabla 4.5: Resultados de Compresión corregidos por criterio Chauvenet.

Compresión 28 días					
N°	Código	Kgf	Mpa	Promedio	SD
1	C60W31	816,6	45,72	46,92	1,09
		843,3	47,18		
		855,8	47,85		
2	C60W35	855,4	48,39	48,44	0,28
		862,5	48,75		
		861,8	48,19		
3	C45W40	1015,7	56,85	56,75	0,12
		1011,6	56,62		
		1014,6	56,79		
4	C75W40	950,3	53,19	52,72	0,51
		932,1	52,17		
		943,2	52,79		
5	C60W40	781,8	43,75	42,52	1,91
		777,3	43,50		
		720,5	40,32		
6	C45W31	922,4	51,63	51,50	0,93
		935,3	52,35		

Compresión 28 días					
N°	Código	Kgf	Mpa	Promedio	SD
		902,4	50,51		
7	C45W35	938,2	52,51	53,07	0,90
		966,7	54,11		
		939,5	52,58		
8	C60W27	703,2	39,35	40,03	0,95
		727,3	40,70		
9	C75W27	667,4	37,35	38,11	1,07
		672,6	37,64		
		702,8	39,33		
10	C45W27	998,9	55,91	55,57	2,10
		1026,9	57,48		
		952,8	53,33		
11	C75W35	935,5	52,35	49,93	2,14
		877,6	49,12		
		863,2	48,31		
12	C75W31	1098,3	61,48	62,00	0,74
		1116,9	62,52		
13	C67W27	680,6	38,09	38,98	0,82
		714,9	39,72		
		687,6	38,48		
		726,7	39,62		
14	C67W31	640,9	35,48	36,31	1,06
		653,5	35,95		
		667,9	37,51		
15	C67W35	789,6	43,58	42,95	1,33
		797,5	44,50		
		763,7	42,11		
		748,7	41,60		

Con los resultados anteriores se confeccionaron dos gráficos, la Figura 4.2 contiene los resultados a compresión manteniendo el Factor de Trabajabilidad constante y la Figura 4.3, presenta los resultados a compresión pero dejando el Factor Grueso contante.

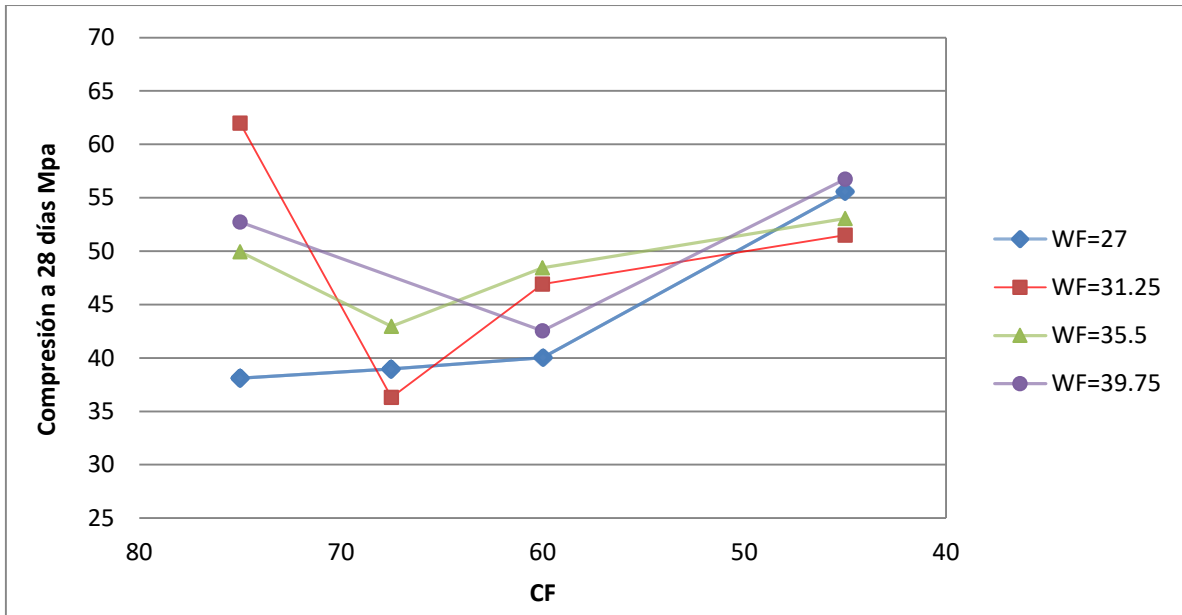


Figura 4.2: Gráfico resultados compresión a 28 con FT constante.

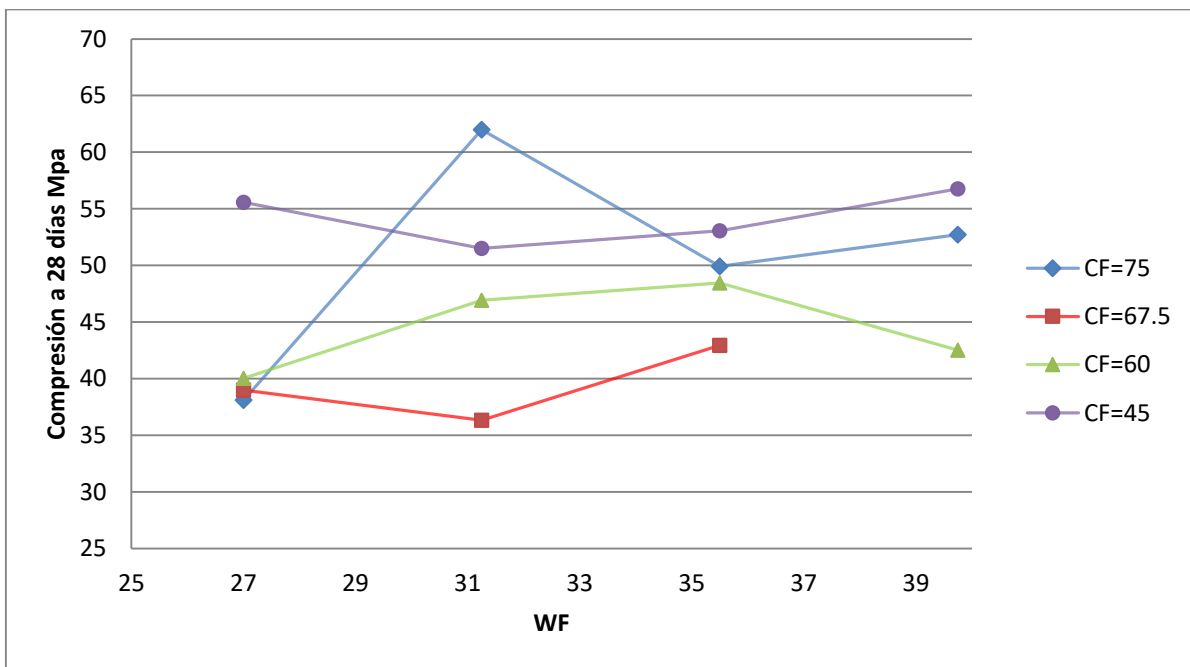


Figura 4.3: Gráfico resultados compresión a 28 con FG constante.

La Figura 4.4 muestra un gráfico en tres dimensiones, donde la base es la vista en planta del Gráfico de Shilstone y la altura de las barras indica la resistencia a compresión medida a los 28 días.

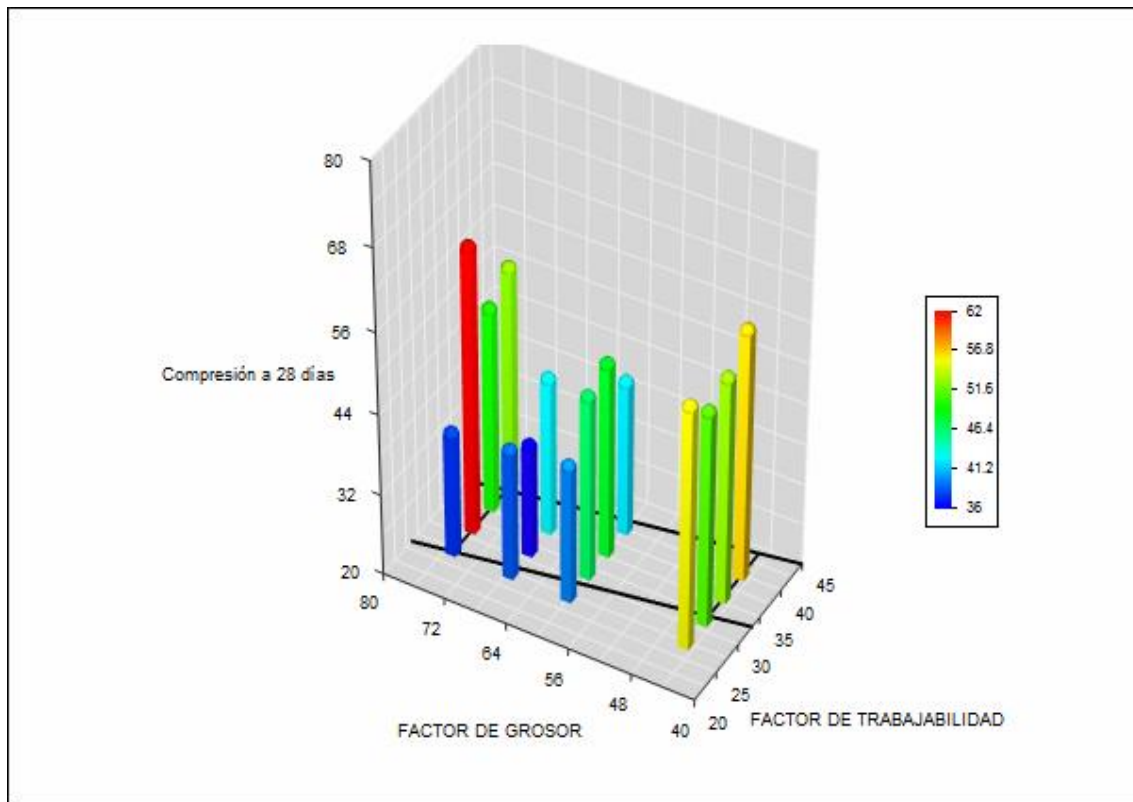


Figura 4.4: Gráfico resultados a compresión 28 días.

Teniendo presente que el Gráfico de Shilstone es un método de optimización granulométrica principalmente enfocada en lograr un correcto desempeño en la trabajabilidad de la mezcla, de igual forma es interesante estudiar el efecto en otras propiedades. A partir de los resultados se ha desarrollado el siguiente análisis respecto al ensayo a compresión.

- La resistencia promedio para todas las granulometrías analizadas en este estudio, es de 47.72 Mpa, con una desviación estándar de 7.69 Mpa, lo que muestra la alta variación que existe en los resultados al utilizar el método, y la dispersión de resultados que se genera variando la distribución granulométrica del árido combinado en la mezcla. A pesar de lo anterior, cuando se analiza la variabilidad de las resistencias obtenidas para cada mezcla, ésta disminuye a 1.06 Mpa promedio, lo que podría indicar que para un volumen fijo de pasta y una a/c fija, la granulometría tiene un efecto en el valor de resistencia a compresión a 28 días.

- Se aprecia en el gráfico, que los valores más bajos de resistencia se encuentran en el centro de la zona 2 del Gráfico de Shilstone, lo cual nos indica que al menos en términos de resistencia, el lugar que propone Shilstone para diseñar las mezclas de pavimentos con trabajabilidad requerida, no se replica en que serán las compresiones más altas que tendrá la mezcla.
- Sorprenden los puntos fuera de la zona 2, C45W27, C45W31, C60W27 y C75W40 ya que como se aprecia en la Tabla 4.6, se obtienen valores superiores a 37,5 Mpa en compresión, valor que tomaremos de referencia, ya que es la resistencia que alcanza una mezcla utilizando el método de la ACI 211 para dosificar hormigones, considerando la misma relación agua/cemento que las mezclas realizadas en el laboratorio. Es decir al utilizar la Tabla 4.7 si interpolamos los datos, obtenemos el valor para una relación a/c de 0,45. Entonces, a pesar que sean puntos fuera del límite óptimo propuesto por Shilstone, estos puntos presentan alta resistencia, esto se explica porque el origen del gráfico es generar mezclas bien graduadas de trabajabilidad adecuada, no altas resistencias. De todos modos, estos resultados nos indica que debe haber un estudio más profundo fuera de los límites, ya que en la región estudiada no se aprecian valores óptimos de resistencia para la combinación de los parámetros que lo confeccionan.

Tabla 4.6: Resultados a Compresión

Compresión a 28 días (Mpa)					
FG					
f	53,31		42,52	56,75	39,75
	51,09	42,95	48,44	53,07	35,50
	59,71	35,95	45,65	50,51	31,25
	38,68	38,98	40,05	54,4	27,00
	75,0	67,5	60,0	45,0	

Tabla 4.7: Relación entre la resistencia a compresión a los 28 días y la relación agua-cemento según el Método para dosificar hormigones del código ACI 211 of 91.

Resistencia a la compresión a los 28 días, N/mm ²	Relación agua-cemento, por peso	
	Hormigón sin aire incorporado	Hormigón con aire incorporado
50	0,33	-
45	0,38	-
40	0,43	0,34
35	0,48	0,40
30	0,55	0,46
25	0,62	0,53
20	0,70	0,61
15	0,80	0,71

- Los resultados más altos se ubican en el límite con la zona 3, esto tiene correlación con lo que indica Shilstone, puesto que es en el sector 3, donde se espera un buen comportamiento para mezclas con partículas con tamaño máximo menor a 20 mm, a diferencia de la zona 2 que se espera un buen desempeño en relación a la trabajabilidad de la mezcla para Da mayor a 20 mm.

Se explica porque el tamaño máximo nominal de nuestros agregados está en el límite mínimo para ubicarse en la zona 2 y en el límite máximo para ubicarse en la zona 3. Como se aprecia, si bien el gráfico aplica para la trabajabilidad de la mezcla, se recomienda extender el análisis a la zona 3 para corroborar si existe aumento en la resistencia a compresión manteniendo la trabajabilidad requerida al momento de colocar un pavimento de hormigón.

- Por la nula correlación de los resultados, no se puede precisar una zona donde exista un óptimo en el comportamiento a compresión de las distintas zonas dentro del gráfico ni justificar el buen comportamiento de los puntos fuera del trapecio propuesto por Shilstone. Para corroborar lo antes dicho se realizaron distintos análisis estadísticos. El primero fue un análisis de varianza ANOVA, y posteriormente se buscó una regresión a los parámetros en estudio.

Con el fin de evaluar si los valores de compresión a los 28 días dependen de los niveles de los factores (grueso y de trabajabilidad) o de la interacción de ambas, se realizará un análisis ANOVA bivariada. Existe interacción ente ambos factores cuando el efecto de un factor sobre la variable dependiente depende de cuál es la variación del otro factor.

Sea la variable dependiente, la propiedad de resistencia a compresión medida por el ensayo a compresión a 28 días de maduras.

B_j : Factor Grueso nivel j, con $j = [1, 2, 3, 4]$

A_i : Factor de Trabajabilidad nivel i, con $i = [1, 2, 3, 4]$

k_{ij} : Número de observaciones en nivel $ij \rightarrow 4$

La Tabla 4.8 entrega los resultados de las medias poblacionales por nivel para el Factor Grueso ($\mu_{j.}$) y para el Factor de Trabajabilidad ($\mu_{.j}$).

Donde $B_1 = 75,0$; $B_2 = 67,5$; $B_3 = 60,0$; $B_4 = 45,0$; $A_1 = 27,00$; $A_2 = 31,25$; $A_3 = 35,50$; $A_4 = 39,75$;

Tabla 4.8: Medias Poblacionales por Niveles para Compresión a 28 Días.

Compresión a 28 días (Mpa)/ ANOVA						
Factor Grueso B_j						
Factor de Trabajabilidad A_i		75,0	67,5	60,0	45,0	$\mu_{.j}$
	39,75	52,72		42,52	56,75	50,66
	35,50	49,93	42,95	48,44	53,07	48,60
	31,25	62,00	36,31	46,92	51,50	49,18
	27,00	38,11	38,98	40,03	55,57	43,17
$\mu_{j.}$	50,69	39,41	44,48	54,22	47,72	

Se generan las mismas hipótesis que en el caso anterior, la diferencia es el número de observaciones por mezclas que se utilizaron, Para el caso de Resistencia a Compresión a 28 Días se usaron 4 observaciones.

La Tabla 4.9 arroja los resultados de los parámetros del análisis.

Tabla 4.9: Tabla Resultados Parámetros del Análisis de Varianza del Ensayo a Compresión.

FV	SC	G.L.	MC	F
Factor A	82.21	1	82.21	1.42
Factor B	80.12	1	80.12	1.38
Interacción	30.31	1	30.31	0.52
Error	636.26	11	57.84	
Total	SCT	N-1		

Para ello se utilizó el programa R, donde se generó el siguiente código:

```
#Cargar data
data_comp<-read.csv("Compresión.csv",header=TRUE)
#anova
fit_1_1 <- aov(PROMEDIO ~ WF, data=data_comp)
fit_1_2 <- aov(PROMEDIO ~ CF, data=data_comp)
fit_1_3 <- aov(PROMEDIO ~ CF+WF, data=data_comp)
fit_1_4 <- aov(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF, data=data_comp)
#summary
summary(fit_1_1)
summary(fit_1_2)
summary(fit_1_3)
summary(fit_1_4)
#Graficos
(datos.aov=aov(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF, data=data_comp))
plot(datos.aov)
#Resumen
summary(datos.aov)
```

Del análisis estadístico, se desprende que no existe relación entre FG y FT con la compresión que se obtiene en la mezcla, ni tampoco existe interacción entre ambos factores. Ya que el estadístico de prueba de cada hipótesis nula está dentro de la zona crítica.

Además a los resultados se les realizó una regresión lineal y polinómica. El objetivo de una regresión bivariada es construir un modelo probabilístico que relacione la variable independiente; En nuestro caso compresión a 28 días, con las variables independientes; Factor grueso y Factor de trabajabilidad del Gráfico de Shilstone.

El modelo que recoge todas las variables es el de segundo orden completo, contemplando en el análisis la interacción entre ambas variables.

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_1^2 + \beta_4x_2^2 + \beta_5x_1x_2 + \varepsilon$$

Donde

Y: Compresión a 28 días

x₁: Factor de Trabajabilidad

x₂: Factor Grueso

β₀, β₁, β₂, β₃, β₄ y β₅: Parámetros del Modelo

Para estimar los parámetros, se calculan mediante la suma de desviaciones al cuadrado, en donde los valores encontrados reducen la distancia entre los datos observados y la recta.

Para esto se utilizó el programa R, donde se generó el siguiente código:

```

#Grafico de las variables
pairs(data_comp)
#correlacion entre variables
cor(data_comp, use = "everything", method = "pearson")
#regresion lineal
regresion_2 <- lm(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF+I(CF^2) + I(WF^2), data = data_comp)
summary(regresion_2)
#estudio seleccion de variables
step(regresion_1, direction = "both")
#Mejor regresion
regresion_1_2 <- lm(PROMEDIO ~ CF+WF+ I(CF^2), data = data_comp)
summary(regresion_1_2)

```

De las múltiples regresiones que se realizaron, la mejor es aquella que considera las variables CF, WF y CF², a pesar de esto, la mejor regresión presenta un R² muy bajo (0.40) lo que indica que el modelo no es adecuado, por lo que se concluye que no hay relación lineal entre las variables CF, WF y la respuesta. Esto no implica que no haya relación entre las variables y la respuesta a compresión de las mezclas, solo nos dice que la relación no es lineal.

4.3. FLEXOTRACCIÓN A 28 DÍAS.

En el Anexo A se presentan los resultados de Flexión obtenidos de los tres ensayos por mezcla que se realizaron. La Tabla A.2 pone los resultados de cada uno de los tres ensayos realizados a flexión de cada punto de la malla, con sus respectivos promedios y desviaciones estándar.

Mediante el criterio de Chauvenet's se desecharon los resultados extremos que alteraban los promedios, y pudieron deberse por una equivocación experimental.

El criterio consiste en $\frac{\bar{x}-x_i}{\sigma} > 1.38$, donde la razón entre la diferencia con la media, dividida en la desviación estándar de la muestra si es mayor a 1.38. Si excede el valor, el dato es considerado outlier y es sacado de la medida y se re estructuran los resultados. La Tabla 4.10 arroja los resultados sin los datos atípicos.

Tabla 4.10: Resultados a Flexión corregidos por su desviación estándar.

Flexo-Tracción 28 días					
N°		kgf	Mpa	Promedio	SD
1	C60W31	3125	4,09	4,14	0,07
		3200	4,18		
2	C60W35	3250	4,25	4,30	0,07
		3325	4,35		
3	C45W40	3700	4,84	4,95	0,16
		3875	5,07		
4	C75W40	4000	5,23	5,20	0,05
		3950	5,16		
5	C60W40	3800	4,97	4,87	0,14
		3650	4,77		
6	C45W31	3975	5,20	5,21	0,02
		4000	5,23		
7	C45W35	3800	4,97	4,94	0,05
		3750	4,90		
8	C60W27	3300	4,31	4,36	0,07
		3375	4,41		

Flexo-Tracción 28 días					
N°		kgf	Mpa	Promedio	SD
9	C75W27	3600	4,71	4,45	0,26
		3200	4,18		
		3400	4,45		
10	C45W27	4050	5,30	5,34	0,07
		4125	5,39		
11	C75W35	3700	4,84	4,89	0,07
		3775	4,94		
12	C75W31	4400	5,75	5,69	0,09
		4300	5,62		
13	C67W27	3300	4,31	4,33	0,02
		3325	4,35		
14	C67W31	3900	5,10	4,81	0,42
		3450	4,51		
15	C67W35	3750	4,90	4,81	0,14
		3600	4,71		

Con los resultados anteriores se confeccionaron dos gráficos, la Figura 4.5 contiene los resultados a compresión manteniendo el Factor de Trabajabilidad constante y la Figura 4.6, presenta los resultados a compresión pero dejan el Factor Grueso contante.

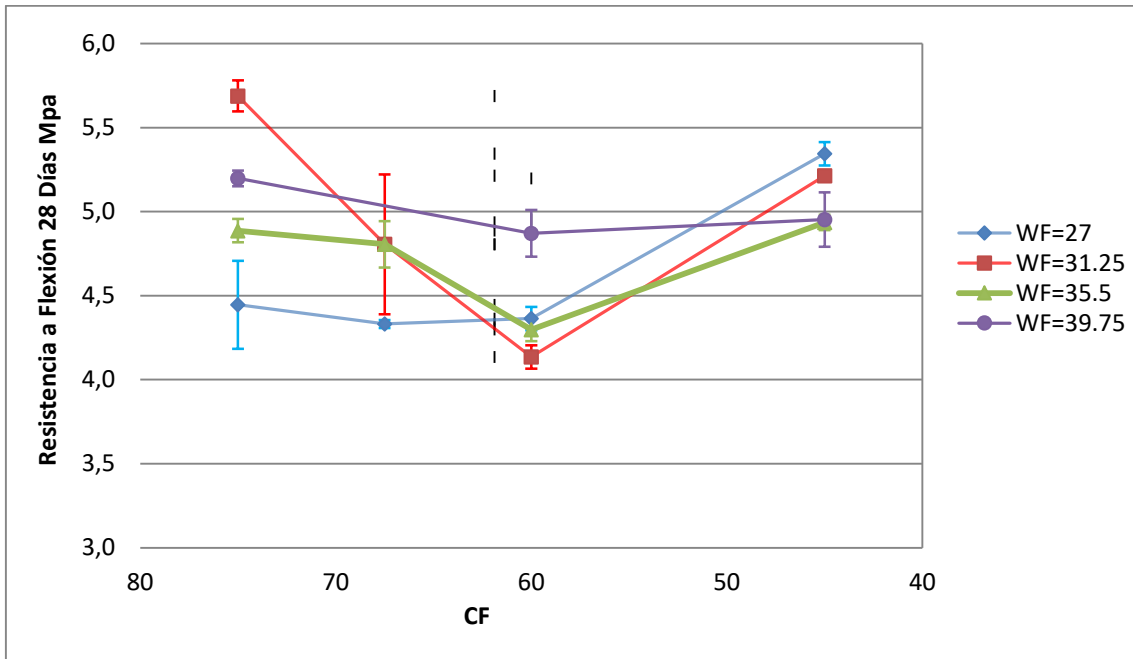


Figura 4.5: Gráfico resultados flexión a 28 con FT constante.

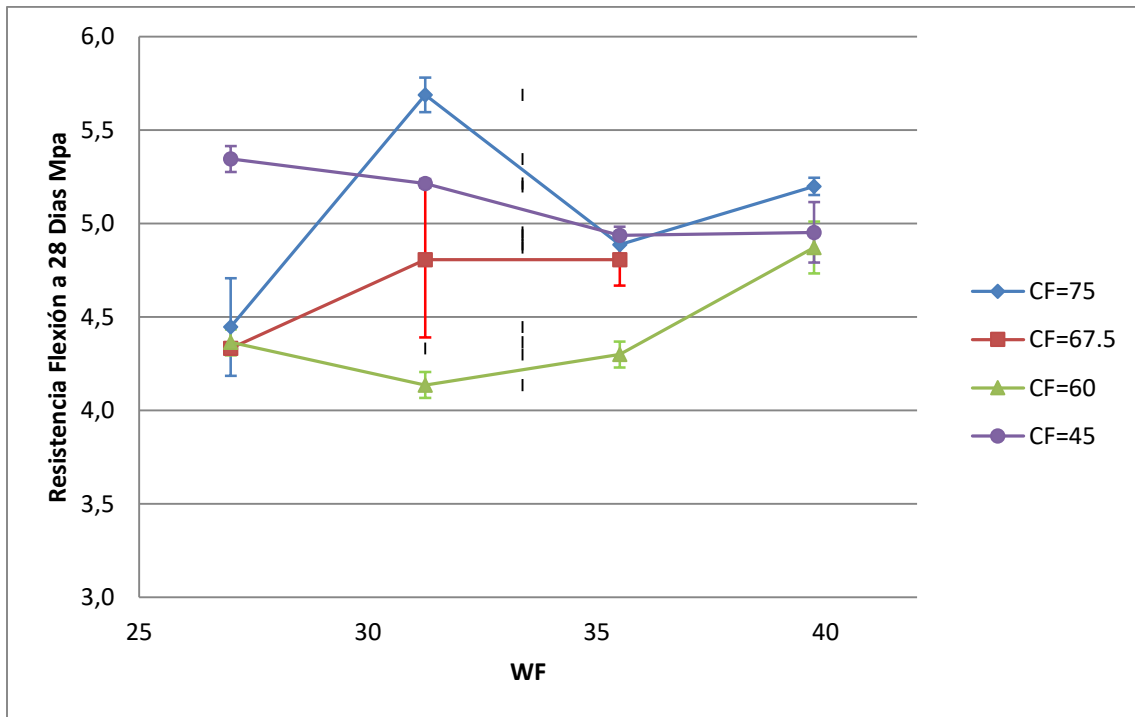


Figura 4.6: Gráfico resultados compresión a 28 con FG constante.

La Figura 4.7 muestra un gráfico en tres dimensiones, donde la base es la vista en planta del Gráfico de Shilstone y la altura de las barras indica la resistencia a flexo-tracción medida a los 28 días.

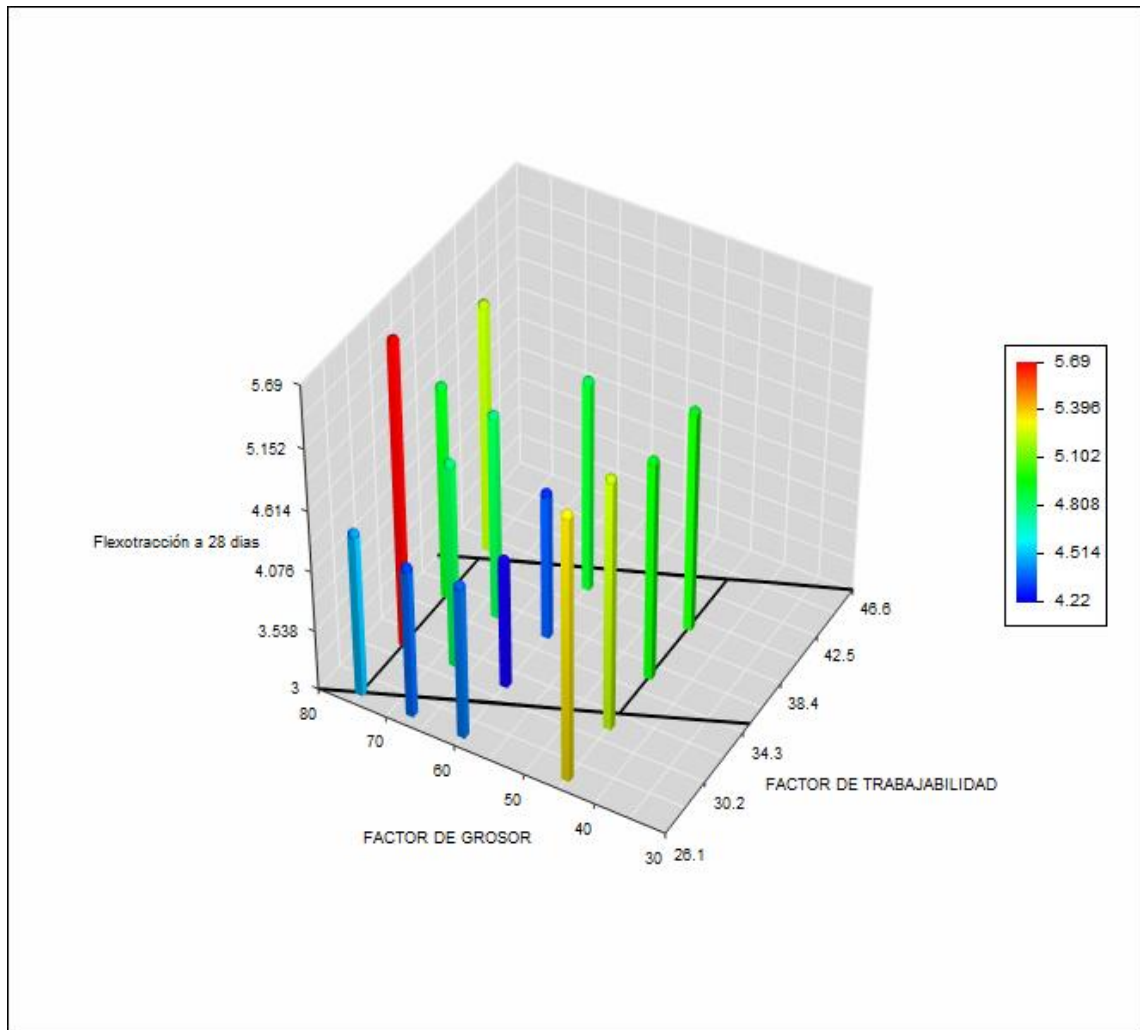


Figura 4.7: Gráfico flexotracción 28 días.

La Figura 4.7 muestra más claro como los valores mínimos de resistencia se encuentran en el centro de la zona dos y los mayores se encuentran en sus límites y fuera de ellos.

Al igual que los ensayos anteriores, se ha desarrollado el siguiente análisis respecto al ensayo a Flexo-Tracción a 28 días.

- De acuerdo a las Figuras 4.5 y 4.6, se aprecia que el rango donde se encuentran las resistencias a Flexo-Tracción es de 4.14 a 5.69 Mpa, cuyo promedio en flexo-tracción es de 4.82 Mpa con una desviación estándar de 0,44 Mpa. Análogamente a los ensayos de compresión, se aprecia una gran dispersión en los datos y demuestra lo influyente que es

en los resultados la distribución granulométrica de los áridos. Del mismo modo al analizar la variabilidad de los resultados para una misma mezcla, esto disminuye considerablemente, demostrando la influencia de la graduación granulométrica en el comportamiento a flexión de la mezcla.

- De acuerdo a la Tabla 4.11, sorprenden los puntos con un C45W27, C45W31, C67W27 y C75W40 se obtienen valores superiores a 5 Mpa en flexotracción, valores interesante en términos del módulo de rotura de un pavimento, sin embargo son puntos que se encuentra fuera del trapecio originalmente propuesto por Shilstone.

Tabla 4.11: Resultados a flexión.

		Flexión a 28 días (Mpa)				
		FG				
F	5,20		4,87	4,95	39,75	
	4,89	4,81	4,30	4,94	35,50	
	5,69	4,81	4,14	5,21	31,25	
	4,45	5,34	4,36	5,3	27,00	
	75,0	67,5	60,0	45,0		

- Al igual que en compresión, los resultados más altos se ubican en el límite con la zona 3, esto tiene correlación con lo que indica Shilstone, puesto que es en el sector 3, donde se espera un buen comportamiento para mezclas con partículas con tamaño máximo menor a 20 mm, a diferencia de la zona 2 que se espera un buen desempeño en relación a la trabajabilidad de la mezcla para tamaño máximo entre 20 y 50 mm.

El tamaño máximo nominal de nuestros agregados está en el límite mínimo para ubicarse en la zona 2 y en el límite máximo para ubicarse en la zona 3. Como se aprecia, si bien el gráfico aplica para la trabajabilidad de la mezcla, se recomienda extender el análisis a la zona 3 para corroborar si existe aumento en la resistencia a flexo-tracción manteniendo la trabajabilidad requerida al momento de colocar un pavimento de hormigón.

- Lo puntos que se encuentran fuera de la zona 2, tales como C75W40, C67W27, C45W27 y C45W31 alcanzaron flexo-tracciones mayores a 5 Mpa, esto se explica porque el gráfico no posee correlación entre FG y FT que garanticen altas resistencias es más bien un indicador de trabajabilidad. Se requiere profundizar el estudio fuera de los límites propuestos por que hay indicios de que fuera de la zona dos se alcanzan mayores resistencias. A partir de los resultados no se puede precisar una zona donde exista un óptimo en el comportamiento a flexión de las distintas zonas dentro del gráfico.

- Para corroborar lo antes dicho se realizaron distintos análisis estadísticos. El primero fue un análisis de varianza ANOVA, y posteriormente se buscó una regresión a los parámetros en estudio.

Con el fin de evaluar si los valores de flexión a los 28 días dependen de los niveles de los factores (grosso y de trabajabilidad) o de la interacción de ambas, se realizará un análisis ANOVA bivariada. Existe interacción ente ambos factores cuando el efecto de un factor sobre la variable dependiente depende de cuál es la variación del otro factor.

Sea la variable dependiente, la propiedad de resistencia a flexión medida por el ensayo a compresión a 28 días de maduras.

B_j : Factor Grosso nivel j , con $j = [1, 2, 3, 4]$

A_i : Factor de Trabajabilidad nivel i , con $i = [1, 2, 3, 4]$

k_{ij} : Número de observaciones en nivel $ij \rightarrow 3$

La Tabla 4.12 entrega los resultados de las medias poblacionales por nivel para el Factor Grosso ($\mu_{.j}$) y para el Factor de Trabajabilidad ($\mu_{i.}$).

Donde $B_1 = 75,0$; $B_2 = 67,5$; $B_3 = 60,0$; $B_4 = 45,0$; $A_1 = 27,00$; $A_2 = 31,25$; $A_3 = 35,50$; $A_4 = 39,75$;

Tabla 4.12: Medias Poblacionales por Niveles para Flexión a 28 días.

Flexión a 28 días (Mpa)/ANOVA						
Factor Grosso B_j						
Factor de Trabajabilidad A_i		75,0	67,5	60,0	45,0	$\mu_{.j}$
	39,75	5,20	-	4,87	4,95	5,01
	35,50	4,89	4,81	4,30	4,94	4,73
	31,25	5,69	4,81	4,14	5,21	4,96
	27,00	4,45	5,34	4,36	5,34	4,87
$\mu_{i.}$	5,05	4,99	4,42	5,11	4,89	

Se generaron las mismas hipótesis que en el caso anterior, la diferencia es el número de observaciones por mezclas que se obtuvo del ensayo. Para el Cono de Abrams se necesitó una, en cambio en el ensayo a Flexo-Tracción se utilizaron tres probetas.

La siguiente Tabla 4.13 muestra los resultados de los parámetros del ANOVA para la resistencia a flexión a 28 días.

Tabla 4.13: Tabla Resumen de Resultados Parámetros de ANOVA para Ensayo a Flexión.

FV	SC	G.L.	MC	F
Factor A	0.027	1	0.027	0.1334
Factor B	0.135	1	0.135	0.6564
Interacción	0.271	1	0.271	1.3202
Error	2.259	11	2.259	
Total	SCT	N-1		

Para ello se utilizó el programa R, donde se generó el siguiente código:

```
#Cargar data
data_Flexo<-read.csv("Flexo.csv")
#Análisis Compresion
#anova
fit_2_1 <- aov(PROMEDIO ~ WF, data=data_Flexo)
fit_2_2 <- aov(PROMEDIO ~ CF, data=data_Flexo)
fit_2_3 <- aov(PROMEDIO ~ CF+WF, data=data_Flexo)
fit_2_4 <- aov(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF, data=data_Flexo)
#summary
summary(fit_2_1)
summary(fit_2_2)
summary(fit_2_3)
summary(fit_2_4)
#Graficos
(datos.aov=aov(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF, data=data_Flexo))
plot(datos.aov)
#Resumen
summary(datos.aov)
anova(lm(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF, data=data_Flexo))
```

Del análisis estadístico, se desprende que no existe relación entre FG y FT con la flexión que se obtiene en la mezcla, ni tampoco existe interacción entre ambos factores. Ya que el estadístico de prueba de cada hipótesis nula está dentro de la zona crítica.

Además, a los resultados se les realizó una regresión lineal y polinómica. El objetivo de una regresión bivariada es construir un modelo probabilístico que relacione la variable independiente; En nuestro caso flexión a 28 días, con las variables independientes; Factor grueso y Factor de trabajabilidad del Gráfico de Shilstone.

El modelo que recoge todas las variables es el de segundo orden completo, contemplando en el análisis la interacción entre ambas variables.

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_1^2 + \beta_4x_2^2 + \beta_5x_1x_2 + \varepsilon$$

Donde

Y: Flexión a 28 días

x_1 : Factor de Trabajabilidad

x_2 : Factor Grueso

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 : Parámetros del Modelo

Para estimar los parámetros, se calculan mediante la suma de desviaciones al cuadrado, en donde los valores encontrados reducen la distancia entre los datos observados y la recta.

Para esto se utilizó el programa R, donde se generó el siguiente código:

```
pairs(data_Flexo)
#correlacion entre variables
cor(data_Flexo, use = "everything", method = "pearson")
#regresion lineal
regresion_2 <- lm(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF+I(CF^2) + I(WF^2), data = data_Flexo)
summary(regresion_2)
#estudio seleccion de vairables
step(regresion_1, direction ="both")
#Mejor Regresion
regresion_2_2 <- lm(PROMEDIO ~ CF+WF+CF:WF+I(CF^2), data = data_Flexo)
```

De las múltiples regresiones que se realizaron, la mejor es aquella que considera las variables CF, WF, CF² y la interacción entre CF y WF, a pesar de esto, la mejor regresión presenta un R² muy bajo (0.43) lo que indica que el modelo no es adecuado, por lo que se concluye que no hay correlación entre las variables CF, WF y la respuesta a flexión de los ensayos. Esto no implica que no haya relación entre las variables y la respuesta, solo nos dice que la relación no es lineal.

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES

En conclusión, pese a que el Método de Shilstone se enfoca en la importancia que existe en la distribución granulométrica de los agregados en el comportamiento que tendrá la mezcla, estableciendo así la zona dos como la óptima para alcanzar una trabajabilidad adecuada de acuerdo al método, no se pudo establecer una correlación entre los parámetros del Gráfico de Shilstone (FT y FG) y las propiedades mecánicas medidas en esta memoria. En específico, mediante análisis estadístico, se constató que no existe relación entre FG y FT y el Cono de Abrams, la Resistencia a Compresión a 28 días ni la Resistencia a Flexo-Tracción a 28 días.

A partir de los resultados, no se logró encontrar una zona óptima dentro del Gráfico de Shilstone para el comportamiento a compresión y flexo-tracción a 28 días de la mezcla. Respecto al ensayo a compresión existe una alta variación en los resultados al utilizar el método, obteniendo resistencia promedio de 47.72 MPa, con una desviación estándar de 7.69 MPa, y rango de 25.69 MPa, esto demuestra la incidencia de la granulometría del árido combinado en la dispersión de los resultados. A pesar de lo anterior, cuando se analiza la variabilidad de las resistencias obtenidas para cada mezcla, ésta disminuye a 1.06 MPa promedio, lo que podría indicar que para un volumen fijo de pasta y una a/c fija, la granulometría tiene un efecto en el valor de resistencia a compresión a 28 días. Además, se aprecia que los valores más bajos de resistencia se encuentran en el centro de la zona 2 del Gráfico de Shilstone, lo cual intuitivamente puede ser contrario a lo que se propone en dicha zona, que según Shilstone corresponde a la zona donde se generan mezclas con una granulometría continua con buena trabajabilidad, la que se esperaba estuviese correlacionada con un buen comportamiento a compresión. Al igual que los resultados a compresión, los resultados a flexo-tracción se desprenden las mismas conclusiones, obteniendo resistencia promedio de 4.82 MPa, con una desviación estándar de 0.44 MPa, rango de 1.55 MPa y las menores resistencia en el centro de la zona 2.

A partir del análisis ANOVA se concluye que no existe dependencia entre las propiedades medidas y los parámetros con los cuales se confecciona el Gráfico de Shilstone, ya que el estadístico de prueba de todas las hipótesis formuladas para cada ensayo cayeron fuera de la zona crítica respectiva.

Se logró corroborar que los conos logrados en el sector A de la zona 2 del Gráfico de Shilstone graficado en Figura 2.7 posee valores entre 15 y 50 mm, confirmando los límites establecidos por la norma ACI 325 para los resultados de Cono de Abrams en la confección de pavimentos de hormigón

mediante trenes pavimentadores. No obstante, la sección propuesta por la ACI, se puede extender para el resto del gráfico estudiado en esta memoria, ya que mantiene el mismo rango de Conos de Abrams el resto de las mezclas.

Se corrobora en este proyecto la influencia que tienen la distribución granulométrica de los áridos ya que existe gran variación y dispersión en los resultados de una mezcla a otra, pese a que lo único que se varió fue la granulometría de la mezcla. Por lo que se concluye que la granulometría tiene gran incidencia en el comportamiento global que tendrá la mezcla. También existe baja variabilidad en los resultados dentro de cada mezcla para una razón agua cemento fija y un volumen de pasta fija. Lo anterior ratificando la importancia de incluir especificaciones particulares para diseñar mezclas de hormigón.

5.2. RECOMENDACIONES

Los resultados de la investigación no permite establecer una relación entre factor de trabajabilidad y factor grueso con el asentamiento, resistencia a compresión y resistencia a flexo-tracción. De todas formas se recomienda toda la zona 2 del Gráfico de Shilstone para obtener mezclas con conos de abrams de 20 a 50 mm, valores requeridos para construir pavimentos mediante trenes pavimentadores, ampliando lo estipulado por la ACI 325 de acuerdo al método constructivo. No obstante, la ubicación de la mezcla en el Gráfico de Shilstone no garantiza un correcto desempeño a compresión o Flexo-Tracción por lo que no se recomienda su uso como medida de desempeño en relación a la resistencia que alcanzará el concreto.

De todas formas, dada la alta desviación estándar de cada mezcla, se propone aumentar el número de probetas por ensayo para obtener una representación más fidedigna del comportamiento que tendrá el concreto en el punto escogido del Gráfico de Shilstone.

Se propone ampliar el análisis de los resultados a la zona 3 del Gráfico de shilstone, ya que se observa que existe un incremento en la resistencia hacia ese sector y se registraron las mayores resistencias.

Para ver la influencia del método en la durabilidad de la mezcla, se propone realizar ensayos que midan el efecto que tiene la granulometría de los áridos en la permeabilidad del concreto.

Por otro lado, serviría revisar que sucede con la madurez de la mezcla con el Método de Shilstone. Pudiendo encontrar zona donde se logre desmoldar a edad temprana, importante para poner en servicio los pavimentos de hormigón tempranamente.

6.-BIBLIOGRAFÍA.

American Concrete Institute – ACI211of91 - Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cmt & Other Cementitious Material.

American Concrete Institute – ACI 325.9R-15 - Guide for Construction of Concrete Pavements.

Bickley, J. (2014). Design for durability: The key to improving concrete sustainability. *Construction and Building Materials*.

Bío-Bío, C. (19 de 07 de 2015). Obtenido de <https://www.plataformaarquitectura.cl/catalog/cl/products/1048/guia-como-especificar-un-hormigon-cementos-bio-bio>

Cánovas, F. (2007). *HORMIGON*.

Chamberlin, W. (1995). Performance - related specifications for highway construction and rehabilitation. *Transportation Research Board*.

Chan, J. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 39-46.

Delatte, N. J. (2014). *Concrete Pavement Design, Construction and Performance*. New York: Taylor & Francis Group.

Girardo, O. (2004). *Diseño de Mezclas de Hormigón, Métodos Empíricos y Analíticos*. Universidad Nacional de Colombia.

Falker, E. (2009). Performance Related Specifications for Concrete Pavement.

FICEM. (2013). *Informe Estadístico*.

Ley, T. (2018). Toward Performance Specifications for Concrete: Linking Resistivity, RCPT and Diffusion Predictions Using the Formation Factor for Use in Specifications. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, 57-65.

Melón. (25 de noviembre de 2011). www.melon.cl. Recuperado el 06 de abril de 2015, de Cementos el Melón: <http://www.melon.cl/documents/10157/cbd12ff9-66b8-45f4-9b7f-97e842a86c99>

NCh163.Of2013 – Áridos para morteros y hormigones – Requisitos Generales.

NCh164.Of2009 – Áridos para morteros y hormigones – Extracción y preparación de muestra.

NCh165.Of2009 – Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría.

NCh170.Of2016 – Hormigón – Requisitos generales.

NCh171.Of2008 – Hormigón – Extracción de muestras de hormigón fresco.

NCh1116.Of2008 – Áridos para mortero y hormigones – Determinación de la densidad aparente.

NCh1117.Of2010 – Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.

NCh1239.Of2009 – Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad real y neta, y la absorción de agua de las arenas.

NCh1326.Of2012 – Áridos para morteros y hormigones – Determinación de huecos.

NCh1019.Of2009 – Construcción – Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento de cono de Abrams.

NCh1017.Of2009 – Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos a compresión y tracción.

NCh1018.Of2009 – Hormigón – Preparación de mezclas de prueba en laboratorio.

NCh1037.Of2009 – Hormigón – Ensayo de compresión en probetas cúbicas y cilíndricas.

NCh1038.Of2009 – Hormigón – Ensayo de tracción por compresión.

NCh1564.Of2009 – Hormigón – Determinación de la densidad aparente del hormigón fresco.

Obla, K. (2003). Performance Related Specifications for Concrete Pavement. *ACI Material Journal*.

Olek, A. R. (2012). Optimiztion of Mixture Porportions for Concrete Pavements - Influence of Supplementary Cementitious Materials, Pate Content and Aggregate Gradation. *Joint Transportation Research Program*, 1-64.

P2P Committee . (2004). The P2P Initiative. *National Ready Mixed Concrete Association*, 1-6.

SESIÓN Comisión Pavimentos de Hormigón (58ª, Ago. 2015, Santiago, Chile). Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. 2015.

SESIÓN Comisión Pavimentos de Hormigón (69ª, Dic. 2016, Santiago, Chile). Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. 2016.

Shilstone Sr, J., & Shilstone Jr, J. (2002). Performace - Based Concrete Mixtures and Specifications for Today. *Concrete International*, 80-83.

Taylor P, P. (2012). Concrete Pavement Mixture Design and Analysis (MDA). *National Concrete Pavement Technology Center*, 1-86.

Taylor, P. (2006). Integrated materials and construction practices for concrete pavement: A state-of-the-practice manual.

The Shilstone Family. (2011). <http://www.shilstone.com>. Obtenido de <http://www.shilstone.com/aboutjim.htm>

ANEXO A

(Resultados con datos OUTLIERS)

A continuación se presentan todos los resultados obtenidos por cada uno de los ensayos, antes de aplicar el Criterio Chauvenet's para la eliminación de los datos atípicos obtenidos de los ensayos.

- Compresión a 28 días.

Tabla A.1: Resultados a Compresión con Outliers.

Compresión 28 días					
N°	Código	Kgf	Mpa	Promedio	SD
1	C60W31	816,6	45,72	45,65	2,68
		843,3	47,18		
		746,9	41,85		
		855,8	47,85		
2	C60W35	855,4	48,39	49,25	1,63
		862,5	48,75		
		861,8	48,19		
		935,3	51,68		
3	C45W40	917,3	51,34	55,40	2,71
		1015,7	56,85		
		1011,6	56,62		
		1014,6	56,79		
4	C75W40	984,1	55,08	53,31	1,25
		950,3	53,19		
		932,1	52,17		
		943,2	52,79		
5	C60W40	622,8	34,85	40,61	4,14
		781,8	43,75		
		777,3	43,50		
		720,5	40,32		
6	C45W31	922,4	51,63	50,51	2,11
		935,3	52,35		
		849,6	47,55		
		902,4	50,51		
7	C45W35	938,2	52,51	49,35	7,47
		966,7	54,11		
		682,6	38,20		
		939,5	52,58		
8	C60W27	682,6	38,20	40,05	1,63
		703,2	39,35		

Compresión 28 días					
N°	Código	Kgf	Mpa	Promedio	SD
		749,6	41,95		
		727,3	40,70		
9	C75W27	667,4	37,35	38,68	1,45
		672,6	37,64		
		702,8	39,33		
		722,1	40,41		
10	C45W27	998,9	55,91	54,42	2,88
		1026,9	57,48		
		910,3	50,95		
		952,8	53,33		
11	C75W35	974,2	54,57	51,09	2,90
		935,5	52,35		
		877,6	49,12		
		863,2	48,31		
12	C75W31	1216,9	68,12	61,81	5,33
		984,8	55,12		
		1098,3	61,48		
		1116,9	62,52		
13	C67W27	680,6	38,09	38,98	0,82
		714,9	39,72		
		687,6	38,48		
		726,7	39,62		
14	C67W31	640,9	35,48	35,95	1,13
		653,5	35,95		
		632,2	34,85		
		667,9	37,51		
15	C67W35	789,6	43,58	42,95	1,33
		797,5	44,50		
		763,7	42,11		
		748,7	41,60		

- Flexotracción a 28 días

Tabla A.2: Resultados a Flexión con Outliers.

Flexo-Tracción 28 días					
N°		kgf	Mpa	Promedio	SD
1	C60W31	3350	4,38	4,22	0,15
		3125	4,09		
		3200	4,18		
2	C60W35	3250	4,25	4,43	0,24
		3600	4,71		
		3325	4,35		
3	C45W40	3700	4,84	5,20	0,44
		4350	5,69		
		3875	5,07		
4	C75W40	3700	4,84	5,08	0,21
		4000	5,23		
		3950	5,16		
5	C60W40	3800	4,97	4,66	0,37
		3250	4,25		
		3650	4,77		
6	C45W31	4250	5,56	5,33	0,20
		3975	5,20		
		4000	5,23		
7	C45W35	3900	5,10	4,99	0,10
		3800	4,97		
		3750	4,90		
8	C60W27	3300	4,31	4,43	0,13
		3500	4,58		
		3375	4,41		
9	C75W27	3600	4,71	4,45	0,26
		3200	4,18		
		3400	4,45		
10	C45W27	3900	5,10	5,26	0,15
		4050	5,30		
		4125	5,39		
11	C75W35	4100	5,36	5,04	0,28
		3700	4,84		
		3775	4,94		
12	C75W31	4400	5,75	5,54	0,27
		4300	5,62		
		4000	5,23		

Flexo-Tracción 28 días					
N°		kgf	Mpa	Promedio	SD
13	C67W27	3550	4,64	4,43	0,18
		3300	4,31		
		3325	4,35		
14	C67W31	3900	5,10	4,53	0,56
		3050	3,99		
		3450	4,51		
15	C67W35	3750	4,90	4,71	0,20
		3450	4,51		
		3600	4,71		

ANEXO B

(Resultados análisis estadístico)

RESUMEN ANOVA COMPRESION

Response: PROMEDIO

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
CF	1	82.21	82.211	1.4213	0.2583
WF	1	80.12	80.118	1.3851	0.2641
CF:WF	1	30.31	30.313	0.5241	0.4842
Residuals	11	636.26	57.841		

RESUMEN ANOVA FLEXO

Response: PROMEDIO

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
CF	1	0.02740	0.02740	0.1334	0.7218
WF	1	0.13480	0.13480	0.6564	0.4350
CF:WF	1	0.27111	0.27111	1.3202	0.2749
Residuals	11	2.25901	0.20536		

RESUMEN ANOVA CONO

Response: PROMEDIO

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
CF	1	1.1907	1.1907	0.8384	0.3795
WF	1	2.7722	2.7722	1.9520	0.1899
CF:WF	1	1.1484	1.1484	0.8086	0.3878
Residuals	11	15.6220	1.4202		

REGRESIONES LINEALES:

COMPRESION:

Call:

```
lm(formula = PROMEDIO ~ CF + WF + I(CF^2), data = data_comp)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-8.7998	-2.2563	-0.7448	2.0712	13.2077

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	190.57443	54.27854	3.511	0.00487 **
CF	-5.26620	1.80783	-2.913	0.01411 *
WF	0.44294	0.33407	1.326	0.02117 *
I(CF^2)	0.04255	0.01513	2.812	0.01690 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.937 on 11 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5322, Adjusted R-squared: 0.4046

F-statistic: 4.171 on 3 and 11 DF, p-value: 0.03357

CONO:

Call:

```
lm(formula = PROMEDIO ~ CF + WF + I(CF^2) + I(WF^2), data = data_cono)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1.21727	-0.67666	0.00079	0.52622	1.43139

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	50.732256	17.047033	2.976	0.0139 *
CF	-0.562171	0.295172	-1.905	0.0860 .
WF	-1.836565	0.928113	-1.979	0.0760 .
I(CF^2)	0.004925	0.002470	1.994	0.0741 .
I(WF^2)	0.026164	0.013966	1.873	0.0905 .

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.9679 on 10 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.5482, Adjusted R-squared: 0.3674
F-statistic: 3.033 on 4 and 10 DF, p-value: 0.07046

FLEXIÓN:

Call:

```
lm(formula = PROMEDIO ~ CF + WF + CF:WF + I(CF^2), data = data_Flexo)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.32196	-0.19936	-0.01806	0.11354	0.71126

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	18.6569822	4.3465221	4.292	0.00158 **
CF	-0.4101504	0.1117818	-3.669	0.00432 **
WF	-0.1256844	0.0989437	-1.270	0.23275
I(CF^2)	0.0027635	0.0008397	3.291	0.00813 **
CF:WF	0.0023313	0.0015916	1.465	0.04370 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3293 on 10 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.5972, Adjusted R-squared: 0.4361
F-statistic: 3.707 on 4 and 10 DF, p-value: 0.04225