



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE CONSTRUCCION CIVIL

EFFECTO DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS

POR:

JOHAN LUIS SANTA CRUZ PAREDES

Tesis presentada a la Escuela de Construcción Civil de la Pontificia
Universidad Católica de Chile, para optar el título de Magíster en
Construcción

Profesor Guía:

D.Sc. Carlos Rodolfo Marín Uribe

Mayo, 2021

Santiago de Chile, Chile

©2021, Johan Luis Santa Cruz Paredes



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

EFFECTO DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS

JOHAN LUIS SANTA CRUZ PAREDES

Tesis presentada a la Escuela de Construcción Civil de la Pontificia
Universidad Católica de Chile, para optar el título de Magíster en
Construcción

- Leonardo G. Meza Marín
- Andrés Solas Aguirrebeitía
- Mauricio Pradena

Para completa las exigencias del grado de Magister en Construcción, Santiago
de Chile, Mayo 2021

A mi familia, mi madre
Genoveva Paredes Guevara, mi Padre Juan Santa Cruz
Vallejos y mi hermano Jean Santa Cruz Paredes, por
su apoyo y aliento.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se desarrolló para analizar y comparar las propiedades mecánicas de hormigones para pavimentos confeccionados con granulometrías optimizadas por el método Shilstone y una granulometría no optimizada. El financiamiento de esta investigación se hizo posible con recursos propios y apoyo del profesor guía.

Deseo agradecer en forma especial a mi profesor guía D.Sc Carlos Rodolfo Marín Uribe, quien con su valiosa colaboración, tiempo y apoyo me motivo en el desarrollo de esta investigación.

Quiero agradecer al laboratorio de DECON, en particular a Sergio Valenzuela G. por su valioso tiempo y apoyo logístico, en el desarrollo de la investigación.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia que juntos somos un equipo fuerte que afrontamos cualquier adversidad, gracias a su apoyo y alientos.

RESUMEN

En este trabajo se realizó la caracterización mecánica en el laboratorio de mezclas de hormigón fabricadas con dos distintos tipos de granulometría, una optimizada aplicando el método Shilstone y otra no optimizada. Se estudió el efecto de estas granulometrías sobre las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión por tracción de los hormigones. Los resultados obtenidos muestran que las resistencias a la compresión, flexión por tracción de viga y flexión por tracción de viga semicircular a los 28 días para las mezclas con granulometría optimizada son un 10,9%, 3,4% y 6,5% mayores respectivamente, comparados con los valores medidos para las mezclas con la granulometría no optimizada. Esto indica que es recomendable aplicar el método Shiltone para optimizar la granulometría para fabricar mezclas de hormigón con aplicaciones en pavimentos, localizándola en la zona 2.2 del gráfico “Factor de Rugosidad vs Factor de Trabajabilidad”. También se obtuvieron ecuaciones de correlación del tipo logarítmico entre la resistencia a la compresión y las resistencias a la flexión de viga y la resistencia a la flexión de viga semicircular. Estas ecuaciones permiten estimar las resistencias a la flexión por tracción del hormigón para pavimentos a partir de la resistencia a la compresión y viceversa, lo que permitirá realizar el control y aseguramiento de la calidad del hormigón mediante distintas alternativas.

ABSTRACT

In this work, the mechanical characterization of concrete mixtures manufactured with two different types of granulometry was carried out in the laboratory, one optimized by applying the Shilstone method and the other not optimized. The effect of these granulometries on the mechanical properties of compressive strength and tensile flexural strength of the concrete was studied. The results obtained show that the compressive strengths, beam tensile bending and semicircular beam tensile bending at 28 days for the mixtures with optimized granulometry are 10.9%, 3.4% and 6.5% higher, respectively, compared with the measured values for the mixtures with the non-optimized granulometry. This indicates that it is advisable to apply the Shilstone method to optimize the granulometry to manufacture concrete mixtures with applications in pavements, locating it in zone 2.2 of the graph "Roughness Factor vs Workability Factor". Logarithmic correlation equations were also obtained between the compressive strength and the beam flexural strengths and the semicircular beam flexural strength. These equations make it possible to estimate the tensile flexural strengths of concrete for pavements from the compressive strength and vice versa, which will allow for the control and assurance of concrete quality through different alternatives.

INDICE GENERAL

CAPITULO 1: GENERALIDADES	5
1.1. INTRODUCCIÓN	5
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	6
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.2. METODOLOGÍA	7
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	8
2.1. IMPORTANCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO	8
2.2. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE GRANULOMETRÍAS	10
2.2.1. MÉTODO DE FULLER	10
2.2.2. MÉTODO BOLOMEY	11
2.2.3. MÉTODO FAURY	12
2.2.4. MÉTODO DEL AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI)	13
2.2.5. MÉTODO SHILSTONE	14
2.3. GRANULOMETRÍAS RECOMENDADAS POR EL MOP CHILE 2018	15
2.4. MÉTODO SHILSTONE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE GRANULOMETRÍAS	16
2.4.1. CONSIDERACIONES Y RESTRICCIONES DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN SHILSTONE	18
2.4.1.1. GRÁFICO ARAÑA O CURVA TARÁNTULA	19
2.4.1.2. GRÁFICO “FACTOR DE RUGOSIDAD VS FACTOR DE TRABAJABILIDAD”	21
2.4.1.2.1. FACTOR DE RUGOSIDAD (FR)	23
2.4.1.2.2. FACTOR DE TRABAJABILIDAD (FT)	24
2.4.1.3. GRÁFICO DE POTENCIA 0.45	24
2.4.2. CASOS REALES DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SHILSTONE	25
2.4.2.1. CASO REAL DE SHILSTONE, FACTOR DE RUGOSIDAD VS FACTOR DE TRABAJABILIDAD	26
CAPITULO 3: MATERIALES Y MÉTODO EXPERIMENTAL	27
3.1. DEFINICIÓN DE LA RESISTENCIA ESPECIFICADA	27
3.2. ELECCIÓN DE LAS GRANULOMETRÍAS DE PRUEBA	27
3.3. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	29
3.3.1. CEMENTO	29
3.3.2. AGREGADOS	29
3.3.3. AGUA	30
3.4. DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE PRUEBAS Y CONFECCIÓN DE ESPÉCIMENES	30
3.4.1. DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE PRUEBA	30
3.4.2. CONFECCIÓN DE LAS PROBETAS	31
3.5. ENSAYOS AL HORMIGÓN FRESCO Y ENDURECIDO	32
3.5.1. HORMIGÓN FRESCO	32
3.5.2. HORMIGÓN ENDURECIDO	33
3.6. MATRIZ EXPERIMENTAL	34
CAPITULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
4.1. METODOLOGÍA SHILSTONE PARA LAS GRANULOMETRÍAS DE PRUEBA	35
4.4.1. OBTENCIÓN DE LAS GRANULOMETRÍAS COMBINADAS DE ENSAYO	35
4.4.2. CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINURA DE LAS GRANULOMETRÍAS DE ENSAYO	37
4.4.3. APLICACIÓN Y EXPLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SHILSTONE Y GRÁFICOS	37
4.2. ENSAYOS AL HORMIGÓN FRESCO	41
4.2.1. ENSAYO DE DOCILIDAD MEDIANTE EL CONO DE ABRAMS	41
4.3. ENSAYOS AL HORMIGÓN ENDURECIDO	42
4.3.1. ENSAYO A COMPRESIÓN CILÍNDRICA	42
4.3.2. ENSAYO A FLEXIÓN POR TRACCIÓN DE VIGA	43
4.3.3. ENSAYO A FLEXIÓN POR TRACCIÓN DE VIGA SEMI-CIRCULAR (SCB)	45
4.4. RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN ENDURECIDO	46
4.4.1. RELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN CILÍNDRICA Y FLEXO-TRACCIÓN EN VIGAS	46

4.4.2.	RELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN CILÍNDRICA Y TRACCIÓN EN ESPECÍMENES SEMI-CIRCULARES (SCB)	50
4.4.3.	RELACIÓN ENTRE FLEXO-TRACCIÓN EN VIGAS Y FLEXO-TRACCIÓN EN ESPECÍMENES SEMI-CIRCULARES (SCB)	53
CAPITULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y CONSIDERACIONES		58
5.1.	CONCLUSIONES:	58
5.2.	RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS:	60
BIBLIOGRAFIA		62
ANEXOS		65
ANEXO 1: ELECCION DE LA GRANULOMETRIA		65
ANEXO 2: PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		68
ANEXO 3 : DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN POR EL MÉTODO DE LA ACI		75
ANEXO 4 : RESULTADO DE MAGNITUDES DE RESISTENCIAS		79
D.1.	RESULTADOS COMPRESION DE PROBETAS CILINDRICAS DE HORMIGONES	79
D.2.	RESULTADOS FLEXO- TRACCIÓN POR VIGA DE HORMIGONES	80
D.3.	RESULTADOS TRACCIÓN POR ENSAYO SCB DE HORMIGONES	81

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: VALORES DE “A”	12
TABLA 2.2: TIPOS GRANULOMÉTRICOS DE AGREGADO FINO PARA HORMIGÓN (MANUAL CARRETERA DE CHILE V8, 2018).....	15
TABLA 2.3: TIPOS GRANULOMÉTRICOS DE AGREGADO GRUESO PARA HORMIGÓN (MANUAL CARRETERA DE CHILE V8, 2018)	16
TABLA 2.4: FRACCIONES VOLUMÉTRICAS (SHILSTONE, 1987).....	16
TABLA 2.5: B/BO (SHILSTONE, 1987).....	17
TABLA 2.6. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS GRÁFICO “FACTOR DE RUGOSIDAD VS FACTOR DE TRABAJABILIDAD”	21
TABLA 3.1: GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO.....	28
TABLA 3.2: TIPOS GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDO FINO PARA HORMIGÓN	28
TABLA 3.3: PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS FINOS.....	29
TABLA 3.4: PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS GRUESOS	29
TABLA 3.5: PROPORCIÓN DE LOS MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES (KG/M3)	30
TABLA 3.6: MATRIZ EXPERIMENTAL.....	34
TABLA 4.1: PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO, FACTOR DE RUGOSIDAD	38
TABLA 4.2 : CALCULO DE FACTOR DE RUGOSIDAD	38
TABLA 4.3: CÁLCULO DEL FACTOR DE TRABAJABILIDAD PARA LAS GRANULOMETRÍAS DE ESTUDIO	39
TABLA 4.4 : RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CILÍNDRICA	42
TABLA 4.5: RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y ERROR ESTÁNDAR	44
TABLA 4.6: RESISTENCIA A TRACCIÓN SCB, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y ERROR ESTÁNDAR	45
TABLA 4.7: ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN CILÍNDRICA Y FLEXO -TRACCIÓN, G1 Y G2	47
TABLA 4.8: ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN CILÍNDRICA Y FLEXO -TRACCIÓN G1 Y G2, POR COCIENTE	48
TABLA 4.9: CORRELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN CILÍNDRICA Y FLEXO -TRACCIÓN G1 Y G2, VALORES ESTIMADOS Y % DE ERROR.....	49
TABLA 4.10: ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN CILÍNDRICA Y FLEXO -TRACCIÓN, G1 Y G2	51
TABLA 4.11: ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN CILÍNDRICA Y TRACCIÓN (SCB) G1 Y G2, POR COCIENTE	52
TABLA 4.12: CORRELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN CILÍNDRICA Y TRACCIÓN (SCB) G1 Y G2, VALORES ESTIMADOS Y % DE ERROR	52
TABLA 4.13: ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN CILÍNDRICA Y FLEXO -TRACCIÓN, G1 Y G2	54
TABLA 4.14: ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE FLEXO-TRACCIÓN POR VIGA Y TRACCIÓN (SCB) G1 Y G2, POR COCIENTE	56
TABLA 4.15: CORRELACIÓN ENTRE FLEXO-TRACCIÓN POR VIGA Y TRACCIÓN (SCB) G1 Y G2, VALORES ESTIMADOS Y % DE ERROR.....	55
TABLA A.1: GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO MUY GRUESO.....	65
TABLA A.2: GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO MEDIA GRUESA	65
TABLA A.3: GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO.....	66
TABLA A.4: GRANULOMETRÍA COMBINADA G1	66
TABLA A.5: GRANULOMETRÍA COMBINADA G2	67
TABLA B.1: GRANULOMETRÍA COMBINADA MODULO DE FINEZA G1 Y G2	71
TABLA C.1: FACTOR DE SEGURIDAD ASTM-C33.....	75
TABLA C.2: VOLIMEN DE AGUA POR M ³	75
TABLA C.3: RELACIÓN AGUA/CEMENTO POR RESISTENCIA	76
TABLA D.1: RESULTADOS DE LAS RESISTENCIAS A LA COMPRESION POR PROBETAS CILÍNDRICAS	79
TABLA D.2: RESULTADOS DE LAS RESISTENCIAS A LA FLEXO-TRACCIÓN POR VIGA	80
TABLA D.3: RESULTADOS DE LAS RESISTENCIAS A LA TRACCIÓN POR ENSAYO SCB.....	81

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: ESQUEMA METODOLÓGICO	7
FIGURA 2.1: GRANULOMETRÍA CONTINUA (FUENTE: EHE 08).....	9
FIGURA 2.2: GRANULOMETRÍA DISCONTINUA (FUENTE: EHE 08)	9
FIGURA 2.3: GRANULOMETRÍA UNIMODULAR (FUENTE: EHE 08).....	9
FIGURA 2.4: CURVA IDEAL FULLER (AGUSTIN, 2012).....	11
FIGURA 2.5: PORCENTAJE VOLUMEN VS PORCENTAJE HUMEDAD (LAFREZ, 2001)	17
FIGURA 2.6: GRAFICO ARAÑA. (SHILSTONE, 1990).....	19
FIGURA 2.7: GRÁFICO “FACTOR DE RUGOSIDAD VS FACTOR DE TRABAJABILIDAD”	21
FIGURA 2.8: ÁREAS Y ZONAS DEL GRÁFICO “FACTOR DE RUGOSIDAD VS FACTOR DE TRABAJABILIDAD”	22
FIGURA 2.9: ZONAS RECOMENDADAS PARA MÉTODOS CONSTRUCTIVOS (ACI 325, 2014).....	23
FIGURA 2.10: FACTOR 0.45 (SHILSTONE Y SHILSTONE JR, 2002).....	25
FIGURA 3.1: SEPARACIÓN POR TAMAÑO DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS SOTO J. (2019).	30
FIGURA 3.2: PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS	31
FIGURA 3.3: PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS	32
FIGURA 3.4: ENSAYOS AL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	33
FIGURA 4.1: LOCALIZACIÓN DE LAS GRANULOMETRÍAS DE ESTUDIO G1 Y G2	36
FIGURA 4.2: GRANULOMETRÍAS DE ESTUDIO.....	36
A. CURVA GRANULOMÉTRICA B. GRÁFICO ARAÑA.....	36
FIGURA 4.3: FACTOR RUGOSIDAD Y FACTOR TRABAJABILIDAD PARA LAS GRANULOMETRÍAS DE ESTUDIO.....	40
FIGURA 4.4: GRAFICO EXPONENTE 0.45	41
FIGURA 4.5: ENSAYOS DOCILIDAD, CONO DE ABRAMS	42
FIGURA 4.6: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	43
FIGURA 4.7: LÍNEA DE TENDENCIA LOGARÍTMICA Y VALOR R ² . G1 Y G2	44
FIGURA 4.8: RESISTENCIA A LA FLEXIÓN SCB.....	45
FIGURA 4.9: LÍNEA DE TENDENCIA Y ECUACIÓN DE CORRELACIÓN ENTRE MAGNITUDES. G1 Y G2.....	47
FIGURA 4.10: LÍNEA DE TENDENCIA Y ECUACIÓN DE CORRELACIÓN ENTRE COMPRESIÓN Y TRACCIÓN SCB. G1 Y G2	50
FIGURA 4.11: LÍNEA DE TENDENCIA Y ECUACIÓN DE CORRELACIÓN ENTRE FLEXO-TRACCIÓN Y TRACCIÓN SCB. G1 Y G2.....	54

CAPITULO 1: GENERALIDADES

1.1.Introducción

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo tanto para obras de edificación como de infraestructura. Uno de los aspectos más importantes para garantizar su buen desempeño es el empleo de una granulometría adecuada y optimizada según el uso que se le quiera dar. Las gradaciones optimizadas de los agregados combinados se utilizan debido a los múltiples beneficios que le entrega al hormigón tales como: retracción reducida y una mejora en la contractibilidad, trabajabilidad, cohesión y economía (Shilstone y Shilstone Jr, 2002). Estos beneficios se producen debido a la mayor densificación del arreglo de los agregados, generando un incremento o maximización del volumen de los agregados y una disminución de la pasta del hormigón (cemento más agua más aire) (Ley, 2018). Como resultado se obtiene una trabajabilidad, terminación y bombeabilidad mejorada del hormigón y una menor segregación de los agregados cuando se compara con una gradación no optimizada (Cramer, Hall, & Parry, 1995).

El problema de especificar hormigones con los métodos prescriptivos, es que su preparación se centra en que los componentes sean de alta calidad, o se agrega una mayor cantidad de uno de ellos para modificar alguna propiedad del hormigón, ya sea su trabajabilidad, rugosidad, resistencia o durabilidad. Aunque estos criterios son adecuados en múltiples ocasiones, en otras ocasiones resultan mezclas incompatibles y/o sobredimensionadas, perjudicando los costos del proyecto y potencialmente reduciendo la durabilidad y la vida útil de la estructura (Olek & Taylor P, 2012).

Existen algunos métodos para optimizar la gradación de los agregados para la fabricación de mezclas de hormigón dentro de los que se destacan: la máxima densidad del agregado (curva de Fuller and Thompson), el módulo de finura (MF), la superficie específica de los agregados y el método de Shilstone (Abdulkareem, 2012). Uno de los más utilizados es el método tradicional que emplea el módulo de finura. No obstante, este método no entrega un indicador claro del efecto de la gradación de los agregados sobre la trabajabilidad y resistencia de la mezcla pudiéndose encontrar que diferentes gradaciones pueden tener el mismo módulo de finura. Shilstone reconoció esto y en sus trabajos menciona que una granulometría optimizada puede mejorar la durabilidad, la resistencia y la resistencia a la abrasión y erosión del concreto (Taylor P, 2012). Shilstone indicó además que, un hormigón

fabricado con granulometría optimizada ayudaría al control de la trabajabilidad, bombeabilidad y respuesta a la vibración del concreto. Esto se lograría cambiando la proporción de los agregados en vez de cambiar el contenido de agua en la mezcla (Abdulkareem, 2012, & Shilstone J. , 1990).

El propósito principal de este trabajo es verificar si una mezcla de hormigón fabricada con una granulometría optimizada por el método Shilstone entrega mejores resultados de desempeño en términos de su resistencia a la compresión y su resistencia a la flexión, comparada con una mezcla fabricada con una granulometría no optimizada por este método pero que estuviera constituida por los mismos materiales, dejando como única variable del estudio la distribución de los tamaños de los agregados. Para lograr lo anterior, se propuso un estudio experimental de laboratorio para caracterizar mezclas de hormigón fabricadas con los dos tipos de granulometría (optimizada y no optimizada), midiendo su resistencia a la compresión en cilindros y a la flexión utilizando dos geometrías de probetas; vigas y semicírculos.

Este trabajo tiene como limitaciones la cantidad de granulometrías de estudio (dos) y el número de especímenes de ensayo en el laboratorio, debido principalmente al tiempo acotado de la investigación. También se limita a materiales de la Región Metropolitana (Santiago de Chile).

Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Caracterizar en laboratorio las propiedades mecánicas de hormigones para pavimentos, confeccionados con granulometrías optimizada y no optimizada.

1.1.2. Objetivos específicos

- Estimar mediante ensayos en laboratorio la resistencia a la compresión, flexo-tracción y tracción de hormigones con distintas granulometrías.
- Estudiar las relaciones de las magnitudes de los valores de las resistencias a la compresión, flexo-tracción y tracción obtenidas en el laboratorio.

- Estudiar la posible correlación entre los ensayos de resistencia a la compresión y el de viga semi-circular para el control de calidad de un hormigón para pavimentos, utilizando dos tipos de granulometrías.

1.2. Metodología

Este trabajo corresponde a un trabajo experimental de laboratorio para estimar las propiedades mecánicas de hormigones que emplean granulometrías optimizada por el método Shilstone y no optimizada (tradicional). La metodología comprende dos etapas:

- La primera etapa es una revisión de la literatura sobre el diseño de mezclas de hormigón, la importancia de la granulometría en las propiedades mecánicas de un hormigón para pavimento y la aplicación de la granulometría definida mediante la metodología Shilstone para hormigones.
- La segunda etapa es la fabricación y ensayos de probetas de hormigón para estimar las propiedades mecánicas involucradas en el diseño de un pavimento de hormigón tales como la resistencia a la compresión, a la flexión por tracción y a la tracción pura utilizando vigas prismáticas estandarizadas y especímenes de forma semi-circular.

En la Figura 1.1: se presenta el esquema metodológico propuesto para esta investigación con las principales actividades a desarrollar:

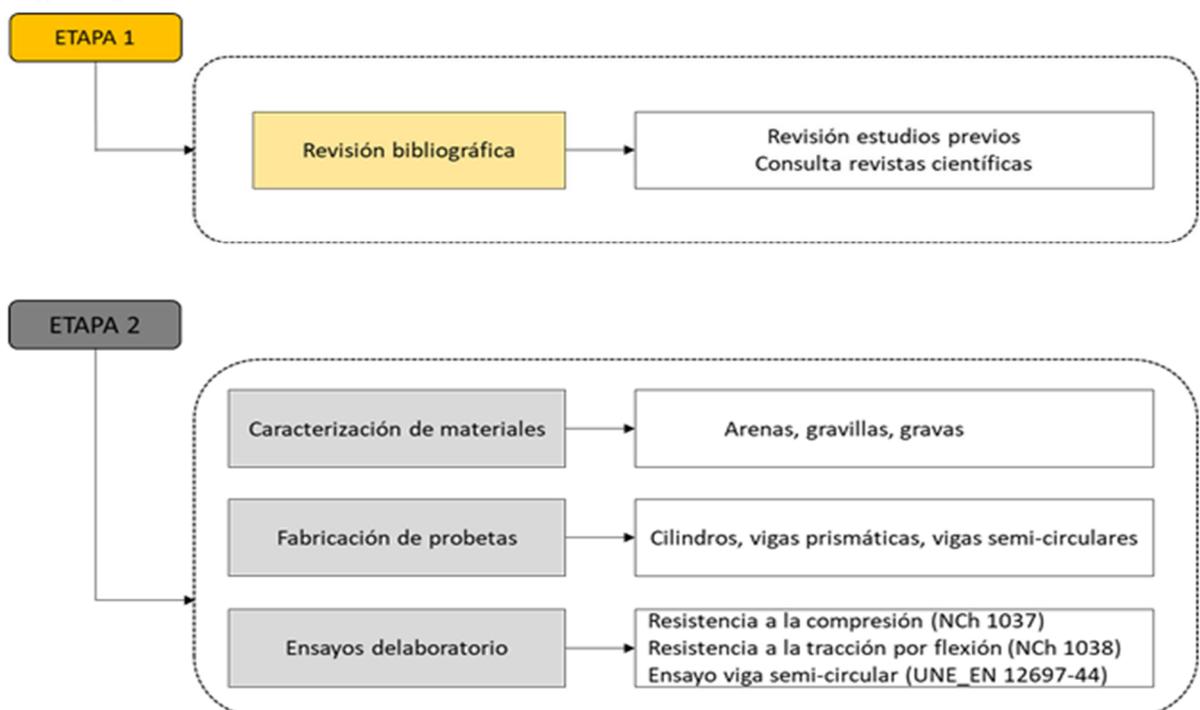


Figura 1.1: Esquema metodológico

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se consideran los aspectos más relevantes para el buen entendimiento del desarrollo de la tesis, los experimentos realizados y los análisis a los resultados obtenidos. Para lograr lo anterior, se hace una descripción de la importancia de la granulometría para la fabricación de una mezcla de hormigón, los métodos de optimización de esta granulometría y del método Shilstone por ser parte fundamental de la propuesta de investigación.

2.1. Importancia de la granulometría en las propiedades mecánicas del concreto

La granulometría, tiene importancia en los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados son fundamentales para un hormigón ya que afectan tanto las proporciones relativas de los agregados como los requerimientos de cemento y agua, la trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, retracción y durabilidad del hormigón. El requerimiento de cemento es un factor que controla el costo debido a que el cemento es el componente más caro del hormigón. La variación en la granulometría puede afectar seriamente la uniformidad del hormigón mezclada tras mezclada. Es recomendable que los agregados finos y gruesos tengan una curva de gradación suave para producir resultados que sean satisfactorios. Una gradación con arenas muy finas produce un hormigón costoso mientras que arenas y gravas muy gruesas producen un hormigón poco trabajable.

La selección de la granulometría para cualquier tipo de diseño o fabricación de hormigón es muy importante debido a que se pueden obtener diferentes propiedades mecánicas para cada tipo de hormigón, ya sea por su consistencia, docilidad, homogeneidad, masa específica. Estas consideraciones representativas de las propiedades del hormigón fresco son muy importantes para la calidad y el acabado de las mezclas produciendo en su masa reacciones químicas que condicionan sus características finales como material endurecido adquiridas por el hormigón a partir de la fase final de fraguado.

Por eso en la literatura de los agregados, se proponen distintos tipos de granulometrías, destacándose principalmente las siguientes tres: granulometría continua, aquella granulometría que tiene todos los tamaños por lo que no le falta ningún tamaño ver Figura 2.1; granulometría discontinua, aquella que le falta un tamaño intermedio, en el caso de faltar un tamaño intermedio la representación gráfica siempre es en el tamaño que falta una línea horizontal paralela al eje de abscisas ver Figura 2.2; y por ultimo y la menos usada es la granulometría uni-modular, aquella

que tiene uno o dos tamaños como, por ejemplo, la arena de playa o del desierto. Su característica principal es que gráficamente pasa de un tamiz donde pasa el 100% del material a uno donde pasa el 0% ver Figura 2.3, (Covarrubias, 2015).

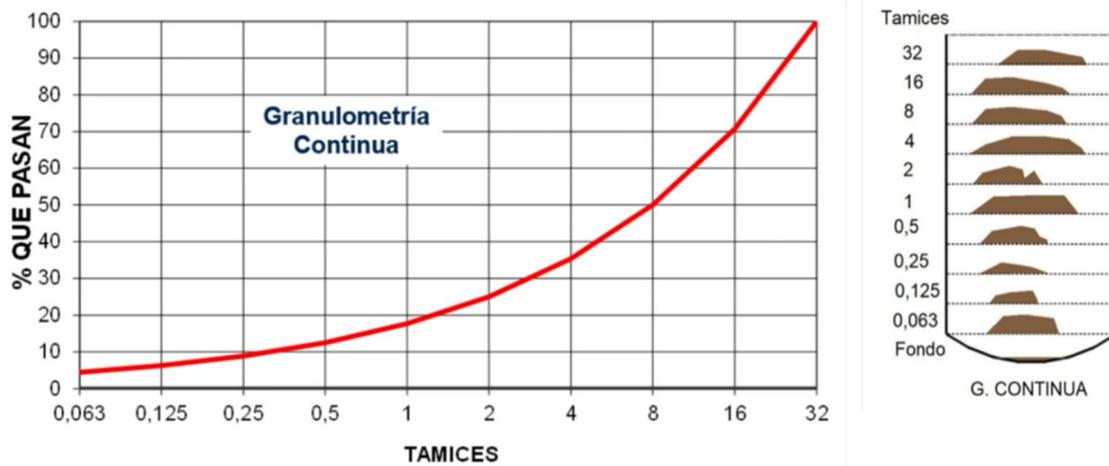


Figura 2.1: Granulometría Continua (Fuente: EHE 08)

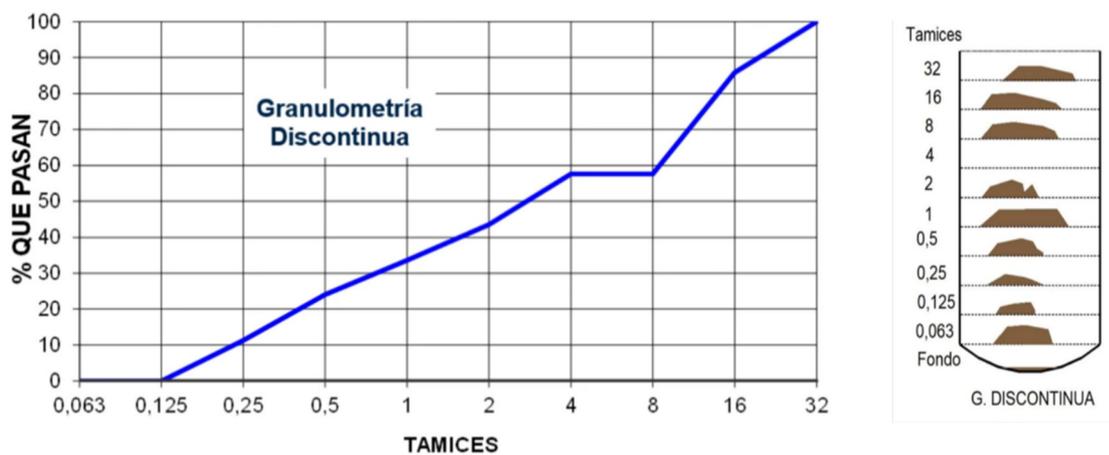


Figura 2.2: Granulometría Discontinua (Fuente: EHE 08)

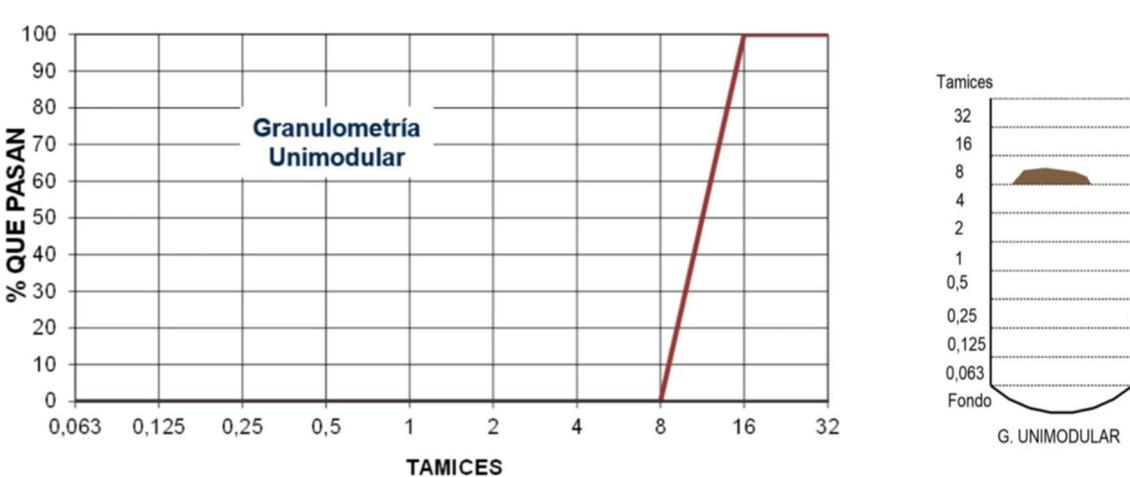


Figura 2.3: Granulometría Unimodular (Fuente: EHE 08)

De los tipos de granulometrías descritas, todas pueden arrojar resultados diferentes, pero para mezclas de hormigones para aplicaciones en pavimentos solo se recomienda usar la continua y discontinua.

2.2. Métodos de optimización de granulometrías

Existen diversas metodologías relacionadas con la optimización de la granulometría para la fabricación de una mezcla de hormigón. Estas metodologías emplean distintos conceptos para su aplicación como el porcentaje retenido o acumulado en un determinado tamiz, el módulo de finza de la arena o el porcentaje de finos. Se pueden emplear para fabricar distintos tipos de mezclas incluyendo las utilizadas en pavimentos de hormigón. A continuación, se describen algunas de estas metodologías.

2.2.1. Método de Fuller

De acuerdo con Agustín (2012), este método realiza sus diseños, utilizando algunos determinados agregados y se propone conformar una granulometría conjunta del agregado, de manera que se ajuste aproximadamente a una curva típica ideal tomado como referencia y obtenida experimentalmente de ensayos sobre trabajabilidad y densidad máxima del hormigón.

En concordancia con Fuller, una granulometría continua se podría obtener con agregados redondeados con un tamaño máximo de 50 ± 20 mm y un contenido de cemento superior a 300 kg/m^3 . Para el caso de los agregados chancados o triturados, la cantidad de finos se debe aumentar. Fuller sugirió que la curva de distribución granulométrica del agregado “ideal” a la hora de obtener un esqueleto granular compacto, requisito imprescindible en el intento de obtener un buen hormigón., debe seguir la forma mostrada en la Figura 2.4. Esta curva se toma como modelo para componer los agregados viene definida y debe ajustarse a la ecuación 1.

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1)$$

Donde, P es el porcentaje que pasa por cada tamiz, d es el tamaño de cada tamiz, y D es el tamaño máximo del agregado.

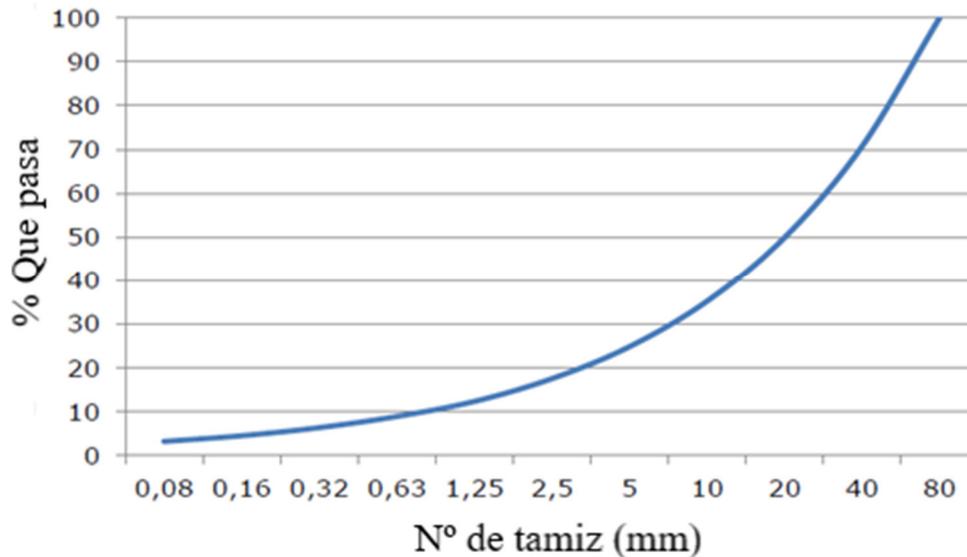


Figura 2.4: Curva ideal Fuller (Agustin, 2012).

2.2.2. Método Bolomey

El Método Bolomey puede considerarse como un perfeccionamiento del método Fuller y se muestra muy útil en el diseño de hormigones simples o armados, ya sea con agregados rodados o chancados, el desarrollo del método de Bolomey es exactamente igual que el del método Fuller, se determina el tamaño máximo de agregado, la cantidad de cemento a emplear, la consistencia de la mezcla que dispone para el hormigón, determinando en que proporción se mezclara las distintas fracciones de agregados, y aquí es donde se aporta buenas modificaciones respecto al primer método expuesto. Bolomey utiliza una curva de referencia de granulometría variable en función de la consistencia deseada en el hormigón y forma de los agregados (Correa, 2011). Esta viene definida por la ecuación 2.

$$P = A + (100 - A) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (2)$$

Donde, P es el porcentaje más fino que el tamiz, d es la apertura de cada tamiz, D es el tamaño máximo del agregado y A es la consistencia del hormigón (seco, plástico, blando y fluido) como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Valores de “a”

Valores de "A"		
Tipo de árido	Consistencia del hormigón	Valor de a
Rodado	Seco - plástica	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Chancado	Seco - plástica	12
	Blanda	13
	Fluida	14

Fuente: (Agustín, 2012)

2.2.3. Método Faury

El método Faury utiliza la granulometría para dosificar hormigones, de este modo logra determina las cantidades o proporciones de los agregados en base al mejor ajuste a una curva granulométrica de referencia, considerando la influencia del cemento como un agregado más. El método parte de una resistencia y luego se calcula la resistencia media requerida, introduciendo una serie de mejoras muy importantes respecto a los anteriores métodos, lo que lo hace muy importante en la aplicación de cualquier tipo de hormigones, ya sea en masa o armados, especialmente en los destinados a piezas prefabricadas en la que predomina la superficie del molde sobre su volumen: viguetas, vigas (Agustín, 2012).

Dentro de sus cálculos se incluye la determinación del tamaño máximo del agregado, D , que en el método de Faury se considera como el diámetro de los orificios del tamiz suficiente para dejar pasar todo el árido. El valor D puede calcularse convencionalmente por la ecuación 3:

$$D = d1 + (d1 - d2) \frac{x}{y} \quad (3)$$

Donde, $d1$ como el mayor de los tamices sobre el que quedan como residuo los granos más gruesos de la grava, siendo $d2$ el tamiz inmediatamente inferior y la relación entre ambos $d2 = d1/2$, es decir, en progresión geométrica de razón 2. Como “ x ” designamos a la proporción de granos de dimensiones superiores a $d1$, y por “ y ” a los granos comprendidos entre $d1$ y $d2$, retenidos, por tanto, en el tamiz $d2$, (Agustín, 2012).

Una vez que se conoce D , el paso siguiente es fijar la relación existente entre el volumen y la superficie del molde; a ésta se le denomina radio medio. Esto quiere decir que se considera

como volumen, no el de la pieza o estructura entera, sino el de las zonas más armadas representativas. El radio medio del molde está definido, por la Ecuación 4.

$$R = \frac{V}{S} \quad (4)$$

Donde, R es el radio medio del molde, V es el volumen del molde y S es la superficie del molde. Por otra parte, este método tiene en cuenta el efecto pared, delimitado como la relación existente entre el tamaño máximo del agregado D y el radio medio del molde R, es decir $\frac{D}{R}$. De esta manera hace que el método de Faury, cumpla adecuadamente la construcción de piezas prefabricadas en las que impera la superficie del molde sobre su volumen, es decir, en aquellas piezas en las que el efecto pared tiene un valor importante.

2.2.4. Método del American Concrete Institute (ACI)

El instituto americano de concreto (ACI 211.1-91) es el método de dosificación más utilizado en todo el mundo, siendo el más adecuado para cualquier proyecto realizada con hormigón. En las siguientes líneas se resumen los pasos que se deben seguir para dosificar un hormigón.

En primera instancia se debe considerar el tamaño máximo del agregado a utilizar, el método ACI propone que sea el mayor posible (por razones de economía de cemento y de agua), siempre y cuando este tamaño máximo no sea superior que 1/5 de la dimensión menor de la pieza a hormigonar, ni mayor que 3/4 de la separación mínima entre armaduras, ni de 1/3 del espesor en el caso de una losa.

Para la elección de la consistencia adecuada, se usa el asentamiento más reducido posible compatible con la colocación adecuada del hormigón en obra. Los valores que se recomiendan de asentamiento en el cono de Abrams están en función de distintos tipos de construcción, para el caso de pavimentos de hormigón oscilan 0-3 pulgadas.

A partir de la consistencia obtenida, del tamaño máximo del agregado elegido, de su forma y granulometría y de la cantidad de aire incorporado se puede determinar la cantidad de agua necesaria por metro cúbico de hormigón, siendo esta independiente de la cantidad de cemento utilizado.

A diferencia de los métodos anteriormente expuestos, el método ACI se debe fijar la relación agua/cemento. Esta se determina según predominen razones de durabilidad o de resistencia.

En otras palabras, el agregado grueso, contenga una mayor cantidad de posible que sea compatible con la docilidad con el fin de conseguir la máxima resistencia, y la mínima cantidad de agua de amasado con la menor retracción. La cantidad de agregado grueso se determina mediante ensayos de laboratorio, sin embargo, si no se dispone de tales datos, puede obtenerse una indicación aceptable con la ayuda de tablas; estas proporcionan el volumen del agregado grueso por unidad de volumen de hormigón en función del diámetro máximo del agregado, de la docilidad y del módulo de finura de la arena. El peso del agregado grueso se calcula por metro cúbico de hormigón y multiplicando el valor obtenido por mil y por la densidad de conjunto del agregado grueso (en kg/dm^3).

2.2.5. Método Shilstone

Este método tiene su origen en James Shilstone quien a finales de los años 80's propuso un procedimiento para el diseño de mezclas de hormigón basado en la dosificación de los agregados utilizando una gradación combinada dosificando adecuadamente los agregados. Mediante algunos estudios experimentales, Shilstone encontró que las propiedades del hormigón se veían afectadas por factores relacionados con la gradación del agregado por lo que su trabajo se concentró en la trabajabilidad de la mezcla con la posibilidad de realizar ajustes a la granulometría. Concluyó que se podían fabricar mezclas de hormigón con mayores resistencias y mejor trabajabilidad a una menor relación agua-cemento, comparadas con mezclas fabricadas por los métodos tradicionales, al combinar los agregados y el material cementicio de forma óptima. El método Shilstone permite la reducción en el contenido de pasta gracias al uso de los tamaños intermedios de los agregados, los cuales permiten suficiente volumen de pasta para llenar los vacíos y proveer trabajabilidad. Dentro de los beneficios que se le atribuyen a este método están la reducción de la retracción del hormigón, el menor costo, las mayores resistencias y mejora de la trabajabilidad del hormigón (Larrain, 2019).

Shilstone se basa en tres gráficos que gradúa la granulometría para obtener mezclas con granulometrías optimizadas. Estos gráficos son el gráfico araña, el gráfico factor de rugosidad vs factor de trabajabilidad y el gráfico exponente 0,45.

- **Gráfica Araña:** se utiliza para obtener porcentajes retenidos en cada una de los tamices de la granulometría combinada.
- **Factor Rugosidad vs Factor de Trabajabilidad:** se define como el porcentaje acumulado retenido en el tamiz de 3/8” (9.5 mm) la fracción gruesa. Se aplica en función a la trabajabilidad del hormigón fresco de la mezcla y su idoneidad en el tipo de construcción.
- **Exponente 0.45:** utilizado masivamente en mezclas asfálticas también se emplea para la fabricación de mezclas de hormigón. Investigaciones anteriores determinaron que al utilizar partículas de tamaño intermedio los hormigones podían obtener la máxima resistencia (Ramakrishnan, 2004).

2.3. Granulometrías recomendadas por el MOP Chile 2018

El Manual de Carreteras de Chile 2018, tiene especificadas las distintas bandas granulométricas para los agregados finos y gruesos a ser utilizados en la fabricación de hormigones y morteros, dentro de los cuales se incluyen las mezclas para hormigones para pavimentos de acuerdo con la sección 8.201.1.C, la Tabla 2.2 muestran las distintas bandas granulométricas recomendadas para los agregados finos y gruesos a ser empleados en la fabricación de hormigones. Para el caso de los agregados gruesos, las bandas granulométricas 40-20 y 20-5 son las recomendadas para mezclas de hormigón para pavimentos, ver la Tabla 2.3 de la sección 8.201.1. E.

Tabla 2.2: Tipos granulométricos de Agregado Fino para Hormigón (Manual carretera de Chile V8, 2018)

Tamaños		1	2	3	4	5	6	7
Denominación		Muy Gruesa	Gruesa	Media o Normal	Media Gruesa	Fina	Muy Fina	Discontinua
Tamices		% acumulado que pasa						
(mm)	(ASTM)							
10	3/8”	100	100	100	100	100	100	100
5	Nº 4	60-75	75-90	95-100	70-90	90-100	95-100	30-60
2,5	Nº 8	35-55	55-80	80-100	40-80	85-100	90-100	30-40
1,25	Nº 16	27-50	35-60	50-85	40-70	70-90	85-100	30-40
0,630	Nº 30	15-40	22-40	25-60	40-60	60-80	80-100	17-40
0,315	Nº 50	8-25	12-25	10-30	25-37	37-50	50-62	9-25
0,160	Nº 100	3-10	3-10	2-10	6-13	12-20	15-20	4-10
MF máximo		3,45	2,95	2,15	2,50	2,46	1,13	3,85
MF mínimo		4,52	3,98	3,38	3,79	1,60	1,18	4,80

Tabla 2.3: Tipos granulométricos de Agregado Grueso para Hormigón (Manual carretera de Chile V8, 2018)

Tamices		% acumulado que pasa para los siguientes grados (definidos por tamaños límites en mm)						
(mm)	(ASTM)	63-40	50-25	40-20 (*)	25-5	20-5 (*)	12,5-5	10-2,5
80	3"	100						
63	2½"	90-100	100					
50	2"	35-70	90-100	100				
40	1½"	0-15	35-70	90-100	100			
25	1"	-	0-15	20-55	90-100	100		
20	¾"	0-5	-	0-15	-	90-100	100	
12,5	½"		0-5	-	25-60	-	90-100	100
10	⅜"			0-5	-	20-55	40-70	90-100
5	Nº 4				0-10	0-10	0-15	10-30
2,5	Nº 8				0-5	0-5	0-5	0-10
1,25	Nº 16							0-5

* Banda usadas en hormigón de pavimento

2.4. Método Shilstone para la optimización de granulometrías

Shilstone propone dividir la gradación total sobre una base volumétrica en tres fracciones: gruesa, intermedia y fina. Estas fracciones se determinan según el tamaño de la partícula como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Fracciones volumétricas (Shilstone, 1987)

Fracción	Rango
Gruesa	ret 3/8"
Intermedia	3/8"- Nº8
Fina	Nº8-200

Shilstone también menciona que la relación “b/bo” propuesta en 1938 por Goldbeck y Gray, debe llegar a la gradación total del agregado grueso y fino combinado. Donde establece hormigones colocados sin la ayuda de la vibración, produciendo mezclas bajas en agregado grueso, teniendo en cuenta el volumen de partículas mezcladas de las proporciones de agregado o cantidades por unidad de volumen. Por tal motivo este método depende del módulo de finura del agregado con respecto a la unidad de peso seco del agregado y el tamaño máximo nominal del agregado grueso (Shilstone y Shilstone Jr. 1987). La Tabla 2.5 presenta la relación entre el Tamaño Nominal Máximo (TNM) y el módulo de fineza del agregado fino.

Tabla 2.5: b/bo (Shilstone, 1987)

TNM del Agregado Grueso (b)	Volumen del agregado grueso seco y compacto por unidad de volumen de hormigón					
	Módulos de fineza del agregado fino MF (bo) para hormigón					
	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.4
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58	0.56
1"	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.61
1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.66
2"	0.78	0.76	0.74	0.72	0.7	0.68
3"	0.81	0.79	0.77	0.75	0.73	0.71
6"	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79	0.77

Donde “b” es el Tamaño Nominal Máximo (TNM) del agregado, y “bo” es el módulo de fineza (MF) del agregado.

Utilizando la Tabla 2.5 se pueden definir el volumen del agregado grueso y el volumen del agregado fino, para fabricar las mezclas de hormigón con el método ACI. Hay que tener en consideración que las arenas actualmente utilizadas en la construcción son demasiado finas, lo que puede traer problemas al diseño del hormigón, que generaría problemas de alto volumen de carga y que aumentara la demanda de agua. La mayor demanda de agua puede provocar una mayor contracción y luego agrietamientos. La arena fina debe eliminarse para permitir que los materiales cementicios completen la deficiencia en los tamaños faltantes (Lafrenz, 2001). En la Figura 2.5, se observa la relación que existe entre el porcentaje de aumento de volumen de los agregados y el porcentaje de humedad añadida a las arenas, mientras más fina sea la arena se necesita más agua a la mezcla, por esa razón aumenta la humedad, por eso clasifica la arena en tres tipos: fina, media y gruesa. Por ejemplo, si se agrega 5% de porcentaje de humedad, tendremos un aumento de volumen sobre el agregado fino de 18% para arenas gruesas, y un aumento 37% para arenas finas.

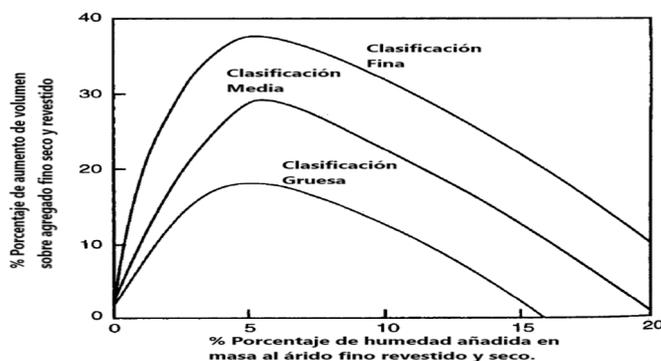


Figura 2.5: Porcentaje volumen vs Porcentaje humedad (Lafrenz, 2001)

La arena media y gruesa necesitan menos agua respecto a su volumen. Las arenas utilizadas para las mezclas de hormigón para pavimentos, deben estar comprendidas entre estos dos tipos de arenas. Debido a que el slump requerido para hormigones para pavimentos es bajo, Lafrenz afirma que es mejor emplear arenas con un MF mayor a 3.10.

De la misma forma Shilstone definió que los agregados combinados impactan la trabajabilidad de la mezcla, planteando que se puede obtener una trabajabilidad deseada cambiando las proporciones adicionadas a la mezcla en lugar de cambiar el contenido de agua (Shilstone, 1987). Concluyó que por cada combinación de agregados mezclados con una cantidad determinada de material cementicio colocados a una consistencia constante, existe una combinación óptima del agregado que tiene menor relación A/C, produciendo la mayor resistencia donde la mezcla optimizada tiene la menor interferencia de partículas respondiendo mejor a un vibrador de alta frecuencia y alta amplitud. Esto implica que no puede usarse para todas las construcciones debido a las variaciones en las necesidades de colocación y acabado (Richardson, 2005).

Las normas del ACI establecen pautas para los materiales de origen de los cuales Shilstone se basó para sus investigaciones, definiendo y estableciendo requisitos de gradación combinada del agregado utilizado en pisos o pavimentos de hormigón. Se establece el cumplimiento con las gradaciones combinadas del agregado, produciendo una matriz deseable mientras reduce la demanda de agua de la mezcla de hormigón y reduce la cantidad de pasta de cemento requerida para recubrir el agregado (Shilstone, 1990).

2.4.1. Consideraciones y restricciones del método de optimización Shilstone

Shilstone basó su investigación de la granulometría combinada optimizada de los agregados para mezclas de hormigón para pavimentos en tres gráficos: araña o tarántula, factor de rugosidad vs factor de trabajabilidad y potencia 0.45.

El gráfico “factor de rugosidad vs factor de trabajabilidad” se considera el método principal para desarrollar la gradación combinada, las otras dos gráficas se usan para verificar los resultados de la gráfica que ayuda a identificar las áreas que necesita material intermedio y regular el agregado para una granulometría optimizada. A continuación, se describen con más detalle estos gráficos.

2.4.1.1. Gráfico araña o curva tarántula.

El objeto principal del gráfico es mantener la forma de una araña como se observa en la Figura 2.6. Con este gráfico, Shilstone define el porcentaje del agregado combinando retenido en cada tamiz y de esta forma determinar cuáles son los tamaños excesivos o deficientes (Shilstone, 1990).

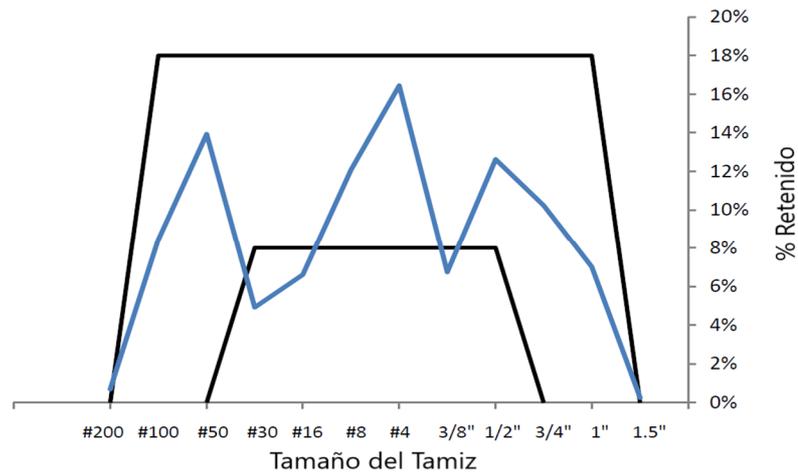


Figura 2.6: Gráfico araña. (Shilstone, 1990)

La importancia de esta metodología es la adición de materiales intermedios retenidos en cada tamiz a la granulometría combinada, lo cual mejora notablemente la cohesión del hormigón con menos cantidad de agua, logrando así un mejor asentamiento de las partículas chancadas del agregado grueso. Lo anterior da como resultado un hormigón con mayor resistencia a la compresión.

Para construir el gráfico araña se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para agregados de gran tamaño con tamaños máximos nominal de 1 ½" (38 mm), está en el rango de 8 – 18 %retenido en cada tamiz.
- Para agregados con tamaños máximos nominal del agregado 1" o ¾" (25 o 19 mm), está en el rango de 8-22% retenido en cada tamiz por debajo del tamaño superior y por encima de la N° 100.
- El porcentaje retenido ideal para cada tamiz N° 30 y N° 50 es de 8 - 15%.
- El porcentaje retenido ideal para el tamiz N° 100 es de 1.5 - 5%.
- El porcentaje retenido ideal para el tamiz N° 200 es de 0 – 4%.

Esta distribución de tamaño de partícula es apropiada para partículas redondas y cúbicas en los tamices N°4 a N°16 (4.75 a 1.18 mm). Si los agregados disponibles para estos tamaños son astillados o quebrados, afilados o alargados, se considera razonable que el porcentaje retenido en un solo tamiz sea de 4 a 8% de las proporciones de las mezclas debiéndose ajustar de manera individual para cada uno de los tamices. (ACI 302, 2004).

Por otro lado, la construcción del gráfico araña también presenta algunas restricciones que deben tenerse en cuenta, siendo las más relevantes las siguientes:

- a. No se permite que el porcentaje retenido en dos tamices adyacentes se encuentre por debajo del 5%
- b. No se permite que el porcentaje retenido en tres tamaños de tamices adyacentes se encuentre por debajo del 8%.
- c. Cuando el porcentaje retenido en cada uno de los dos tamaños de tamices adyacentes es inferior al 8%, el porcentaje total retenido en cualquiera de estos tamices y el tamiz superior e inferior adyacente debe ser de al menos el 13%.

Para ilustrar este último punto se propone el siguiente ejemplo:

Si los tamices N°4 y N°8 retienen cada uno un 6% de agregados, entonces:

- El total retenido en los tamices de 3/8" y N°4, debe ser de al menos el 13%.
- El total retenido en los tamices N°8 y N° 16, debe de ser de al menos el 13%

Lo anterior está soportado por Weymouth (1938) quien describió la importancia de la distribución de los tamaños de tamices individuales en las granulometrías optimizadas. Si hay una deficiencia en un tamiz, pero existe exceso en un tamiz adyacente, los dos tamaños son un grupo y se equilibran entre sí. Cuando hay una deficiencia de partículas en cada uno de los dos tamaños de tamiz adyacentes pero un exceso en los tamices adyacentes a cada uno, los tamaños adyacentes tienden a equilibrar el valle generado por dos puntos. Si hay tres tamaños deficientes adyacentes, hay un problema que debe ser corregido.

2.4.1.2. Gráfico “factor de rugosidad vs factor de trabajabilidad”

El gráfico se estructura mediante el cálculo del factor de rugosidad (eje X) y el factor de trabajabilidad (eje Y) del agregado a utilizar para la fabricación de la mezcla. Este gráfico se divide cinco zonas para identificar los agregados bien graduados para diferentes tamaños máximos nominales como se muestra en la Figura N° 2.7. Además, existe una franja que se considera la zona de optimización del hormigón denominada zona “0”, configurada debajo de las zonas I, II y III como se observa en la Figura N° 2.8.

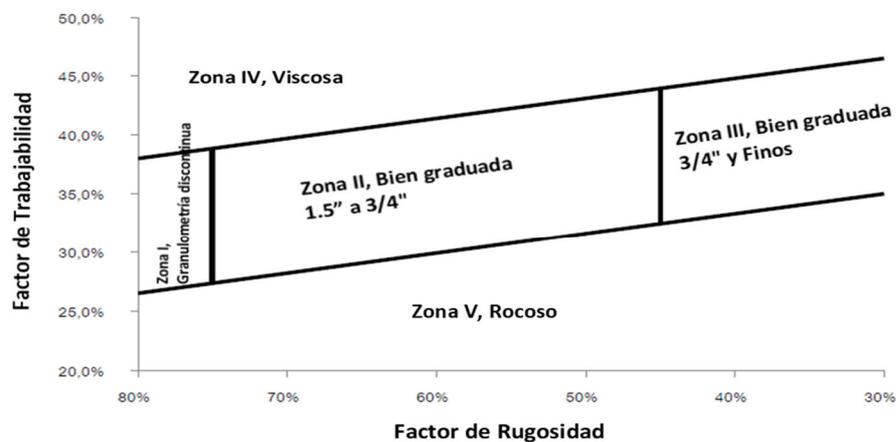


Figura 2.7: Gráfico “factor de rugosidad vs factor de trabajabilidad”

(Shilstone, 1990)

La variación en la clasificación total del agregado es indicativa de ciertas características generales para cada tipo de zona relacionadas con el hormigón como se muestra en la Tabla 2.6, (Shilstone y Shilstone Jr, 2002).

Tabla 2.6. Descripción de las zonas gráfico “factor de rugosidad vs factor de trabajabilidad”

Zona	Descripción
I	Es gruesa, tienes gradiente de segregación, tiende a separarse, problemas de agrietamiento, burbujas y problemas de rugosidad.
II	Bien graduado con tamaños de áridos máximos de 50 mm a 19 mm, la mejor zona para mezclas diarias, dependiendo del uso, hormigón trabajable y de baja permeabilidad.
III	Agregado de ¾” o tamaño máximo nominal de 19 mm, más fino, gravilla.

IV	Exceso de arena, granulometría discontinua, presencia de segregación al momento del vibrado conllevando a una baja resistencia y probabilidad alta de agrietamiento
V	Rocoso, agregado para hormigón en masa, baja trabajabilidad, mínima presencia de finos y presenta vacíos entre sus partículas.

La zona 2 y 3 no presentan segregación o problemas con la trabajabilidad del hormigón, por lo que es importante el tamaño máximo nominal (TMN) y localizar la zona correcta donde se desea trabajar. La mayor parte de los hormigones tradicionales en general que se usan en la construcción se encuentra en la zona “0”. Shilstone considera la zona 2 que está por encima de la zona 0 como un hormigón optimizado y a su vez sub-divide la zona II en 5 áreas. Cada zona tiene asociado un tipo de mezcla de hormigón para el cual es recomendado o es preferible su uso, concluyendo que la zona 2.2 es la ideal para pavimentos de hormigón como se muestra en la Figura N° 2.8. La zona 2 presenta las siguientes recomendaciones:

- Zona II-1 : Excelente pero con precaución.
- Zona II-2 : Excelente para pavimentos y encofrados deslizantes
- Zona II-3 : De losa de alta calidad
- Zona II-4 : Bueno en general
- Zona II-5 : Varían según la necesidad de material y construcción.

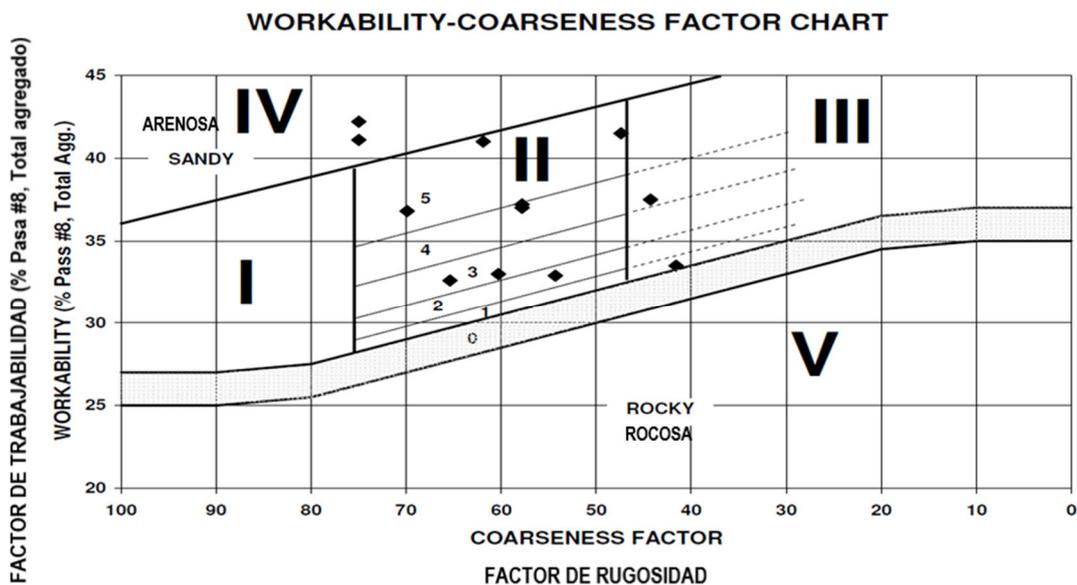


Figura 2.8: Áreas y zonas del gráfico “factor de rugosidad vs factor de trabajabilidad” (Shilstone y Shilstone Jr, 2002)

Según la sectorización de la Zona II y en relación con el método constructivo a emplear, se identifican tres sectores que implican recomendaciones de colocación del hormigón. Estos sectores son A, B y C y se observan en la Figura 2.9. Para mezclas ubicadas en el sector A, los pavimentos exhiben un buen comportamiento al ser colocados por trenes pavimentadoras, para los ubicados en el sector B son mezclas más finas por lo que la pavimentación mecánica con moldaje y colocación en terreno es más apropiada, finalmente para el sector C es para pavimentos colocados y terminados con trabajo manual (USAF, 1997).

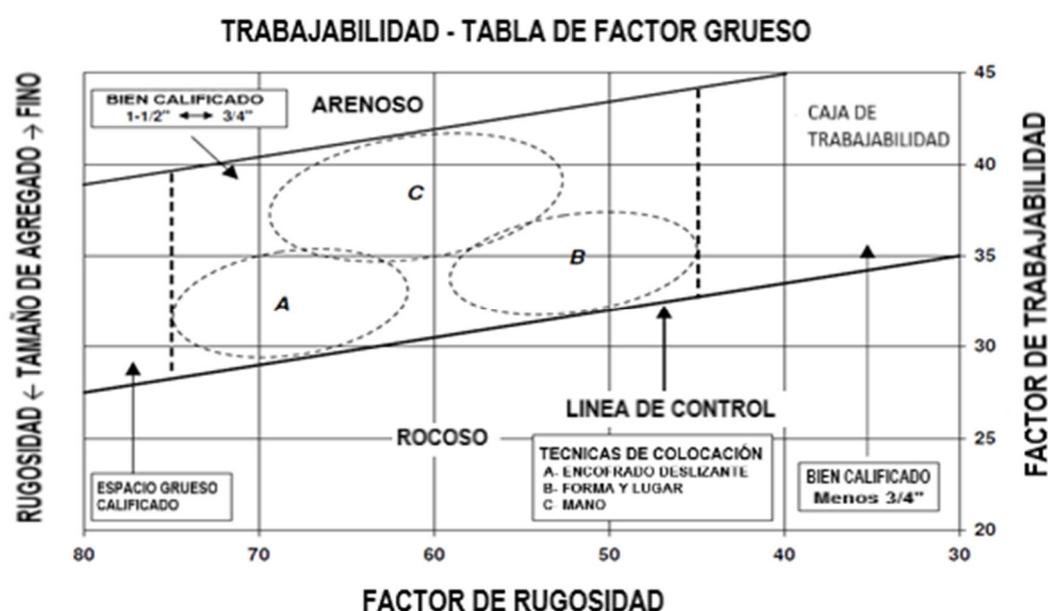


Figura 2.9: Zonas Recomendadas para métodos constructivos (USAF, 1997)

2.4.1.2.1. Factor de Rugosidad (FR)

El factor de rugosidad (eje horizontal), se define como el porcentaje acumulado retenido en el tamiz de 3/8" (9.5 mm) de la fracción gruesa, sobre el porcentaje retenido en el tamiz N° 8 (2.36 mm) de la fracción intermedia y más fino que el tamiz N° 8 y más grueso que el tamiz N° 200. Cuanto mayor sea el factor de rugosidad, mayor es el contenido de agregado grueso presente en la mezcla. El factor de rugosidad se calcula utilizando la Ecuación 5.

$$Factor\ de\ rugosidad = \frac{\% \text{ Retenido encima de } \frac{3}{8} \text{ del Tamiz}}{\% \text{ Retenido encima de } \#8 \text{ del tamiz}} \times 100 \quad (5)$$

2.4.1.2.2. Factor de Trabajabilidad (FT)

El factor de trabajabilidad se define como el porcentaje combinado que pasa el tamiz N° 8 (2.36 mm), más una corrección del contenido de material cementicio de. Si esta cantidad es mayor a la cantidad de referencia (335 kg/m³) se considera un +2.5% en la cantidad del agregado fino y si es menor se considera un -2.5% a la cantidad de agregado fino. Cuando la mezcla contiene exactamente el valor de referencia de material cementicio, no hay factor de corrección.

A medida que se incrementan los materiales cementosos, el contenido de agregado fino debe reducirse para mantener el mismo factor de trabajabilidad y viceversa. Un aumento o una disminución en el contenido de material cementoso o el contenido de agregado fino sin un ajuste compensatorio en el otro de estos dos componentes afectará la viabilidad de la mezcla, los que se pueden determinar a partir de las siguientes ecuaciones 6 y 7:

$$FT = W + 2.5 \frac{(C-564)}{94} \quad (\text{Unidad inglesa}) \quad (6)$$

$$FT = W + 2.5 \frac{(C-335)}{43} \quad (\text{unidad sistema internacional}) \quad (7)$$

Donde:

C= Contenido de materiales cementantes, lb/yd³ o kg/m³ según el sistema de unidades empleado.

W= % que pasa por el tamiz # 8.

2.4.1.3. Gráfico de potencia 0.45

El gráfico de potencia 0.45 se usa para desarrollar gradaciones uniformes para diseños de mezcla de asfalto. Ramakrishnan (2004) realizó una investigación aplicando el gráfico de potencia 0.45 en la fabricación de hormigón. Encontró que las mezclas cuya granulometría se ceñían a la línea de máxima densidad, arrojaban mayores resistencias.

La Figura 2.10 presenta un gráfico exponente 0.45. Se muestra la línea de densidad máxima (línea azul) específica para gradaciones típicas ideales y una granulometría de prueba (línea rosa). Se construye con el tamaño del tamiz para cada tamaño de agregado elevado a la potencia 0.45 y el porcentaje que pasa en cada tamiz.

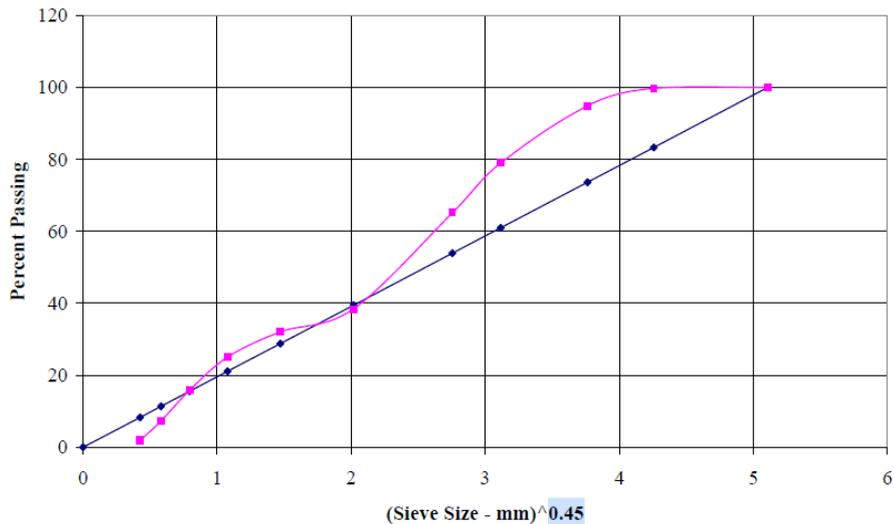


Figura 2.10: Factor 0.45 (Shilstone y Shilstone Jr, 2002)

2.4.2. Casos reales de aplicación de la metodología Shilstone

A continuación, se describen brevemente algunos casos reales donde se aplicó la metodología Shilstone para la optimización de la granulometría para la fabricación de mezclas de hormigón.

a.- El método de optimización granulométrico de los agregados ha sido empleado en algunos proyectos en Chile. Por ejemplo, la incorporación de la metodología Shilstone en las licitaciones propuestas por parte de la Dirección de vialidad a todos los proyectos que contemplan el uso del hormigón en pavimentos. Uno de estos proyectos es la licitación del camino La Pólvora (Ruta Ch60) (MOP, 2015).

b. Uno de los casos más particulares es en Holanda. Para construir una losa con hormigón optimizado con la metodología Shilstone, se recomendó extender el gráfico araña del rango de 8-18% a 6-22% cuando es difícil encontrar tamaños intermedios de agregado.

c.- El Departamento de Transporte y Operaciones del estado de Kansas en los Estados Unidos, permite que el contratista proponga una mezcla optimizada, mencionando el método Shilstone como una posible forma de diseño de la mezcla y proporciones de agregado. Para fines de diseño, una de las posibles gradaciones optimizadas para el hormigón, tiene por ciento individuos retenidos entre los límites de 8-24 para tamices 1/2" y # 16. Para los tamices # 30 y #50,

porcentajes retenidos entre los límites de 8-15, controlando la gradación por gráficos de análisis de tamiz (KansasDOT, 2004).

d.- La Junta de la Industria del Hormigón del Medio Oeste, ubicada en Kansas City, Missouri, adoptó la banda 8-18 en sus especificaciones con algunas consideraciones: el tamiz # 50 puede tener menos del 8 por ciento retenido, los tamices más finos que el tamiz # 50 deben retener menos del 8 por ciento y el tamiz más grueso que retiene cualquier material puede tener menos del 8 por ciento retenido. Solo cuando sea necesario se puede ampliar la banda de control a 6-22 (MCIB 2000).

2.4.2.1. Caso real de Shilstone, Factor de rugosidad vs Factor de trabajabilidad

Shilstone reportó parte de su experiencia en el uso del método propio. En Canadá utilizó una mezcla con un slump bajo y la mezcla fue colocada en forma segregada, ya que se dejó caer desde el camión. Este problema se evidenció por su posición en el gráfico “factor de rugosidad (FR) vs factor de trabajabilidad (FT)” (FR = 83, FT = 31). Las áreas segregadas no se pudieron compactar adecuadamente como otras áreas, por lo que se convirtieron en puntos débiles en la losa que se tuvo que moler. Una segunda mezcla colocada en Texas desde una cinta transportadora se segregó. Esto se pudo anticipar analizando el mismo gráfico de “factor de rugosidad (FR) vs factor de trabajabilidad (FT)” (FR = 78, FT = 29). El deslave del borde ocurrió cuando no había suficiente mortero para proporcionar cohesión (Shilstone y Shilstone Jr. 1997). Un tercer caso que involucraba una mezcla graduada con dos agregados mezclados, diseñado de acuerdo con el método ACI 211 y producido en el laboratorio PCA (FR = 79, FT = 37), se ajustó agregando un agregado de tamaño intermedio (FR = 58, FT = 36).

CAPITULO 3: MATERIALES Y MÉTODO EXPERIMENTAL

Este capítulo presenta el procedimiento desarrollado para realizar el diseño de las mezclas de hormigón propuestas para esta investigación, incluyendo la elección de la granulometría, la caracterización de los materiales, el diseño propiamente tal de las mezclas y los ensayos a las mezclas en estado fresco y endurecido. Los siguientes numerales describen con más detalle cada uno de estos procedimientos

3.1. Definición de la resistencia especificada

Para esta investigación se propuso una resistencia mínima especificada de 35 MPa medido en probetas cúbicas (H35) para pavimentos según el Manual de Carreteras de Chile, volumen N°8. Este valor corresponde actualmente a un hormigón G30 según la norma NCh170 Of 2016, correspondiente a una resistencia a la compresión medida en probetas cilíndricas de 30 MPa. Esta condición se deja constante tanto para las mezclas Shilstone como para las MOP, dejando como única variable la granulometría recomendada para cada método.

3.2. Elección de las granulometrías de prueba

La elección de las granulometrías se basó en la metodología Shilstone propuestas en sus investigaciones, principalmente en el gráfico de factor de trabajabilidad y factor de rugosidad, eligiendo una granulometría optimizada (G1) y otra no optimizada (G2). Como se menciona en el capítulo 2, el gráfico proponen zonas ideales para hormigones, según sus características de la mezcla del hormigón, ya sea por su trabajabilidad y rugosidad, obtenida por la granulometría desde el diseño del hormigón, sobre todo centrándose en la zona identificada como “II” es la recomendada para hormigones y específicamente la zona II-2 es la ideal para mezclas de hormigón para pavimentos. Para la G1 se eligió la granulometría en la zona II-2, y para la G2 no optimizada se eligió aquella que este fuera del rango de la zona optimizada II, eligiendo la zona “IV”.

Además, se tomó como referencia inicial el manual de carreteras de Chile versión 2018, para la selección de la granulometría, optando por el TMN 3/4”, tomando en cuenta la banda denominada 20-5 al ser una de las recomendadas para hormigones para pavimento, además que se disponía de un material con un tamaño máximo nominal de 20 mm, ver tabla 3.1, así también se toma como referencia los tipos de agregados finos que dispone dicho manual de carreteras de Chile, ver tabla 3.2, cabe mencionar que las tablas mencionadas son solamente referencia para dicha investigación, por eso se opta por granulometrías continuas con módulo de fineza mayor

3.10 recomendado para pavimentos de hormigón, teniendo porcentajes retenidos en todos los tamices, y teniendo un mejor comportamiento que la granulometría discontinua para hormigones.

Tabla 3.1: Granulometría del agregado grueso

Tamices		% acumulado que pasa para los siguientes grados (definidos por tamaños límites en mm)						
(mm)	(ASTM)	63-40	50-25	40-20 (*)	25-5	20-5 (*)	12,5-5	10-2,5
80	3"	100						
63	2½"	90-100	100					
50	2"	35-70	90-100	100				
40	1½"	0-15	35-70	90-100	100			
25	1"	-	0-15	20-55	90-100	100		
20	¾"	0-5	-	0-15	-	90-100	100	
12,5	½"		0-5	-	25-60	-	90-100	100
10	⅜"			0-5	-	20-55	40-70	90-100
5	Nº 4				0-10	0-10	0-15	10-30
2,5	Nº 8				0-5	0-5	0-5	0-10
1,25	Nº 16							0-5

* Banda usadas en hormigón de pavimento

Fuente: Manual de Carreteras de Chile, volumen 8, Tabla 8.201.1.E, versión 2019

Tabla 3.2: Tipos granulométrico de árido fino para hormigón

Tamaños		1	2	3	4	5	6	7
Denominación		Muy Gruesa	Gruesa	Media o Normal	Media Gruesa	Fina	Muy Fina	Discontinua
Tamices		% acumulado que pasa						
(mm)	(ASTM)							
10	⅜"	100	100	100	100	100	100	100
5	Nº 4	60-75	75-90	95-100	70-90	90-100	95-100	30-60
2,5	Nº 8	35-55	55-80	80-100	40-80	85-100	90-100	30-40
1,25	Nº 16	27-50	35-60	50-85	40-70	70-90	85-100	30-40
0,630	Nº 30	15-40	22-40	25-60	40-60	60-80	80-100	17-40
0,315	Nº 50	8-25	12-25	10-30	25-37	37-50	50-62	9-25
0,160	Nº 100	3-10	3-10	2-10	6-13	12-20	15-20	4-10
MF máximo		3,45	2,95	2,15	2,50	2,46	1,13	3,85
MF mínimo		4,52	3,98	3,38	3,79	1,60	1,18	4,80

Fuente: Manual de Carreteras de Chile, volumen 8, Tabla 8.201.1.C, versión 2019

3.3. Descripción y caracterización de los materiales

3.3.1. Cemento

El cemento utilizado para esta investigación es un cemento puzolánico de alta resistencia utilizado para pavimentos de hormigón. Este tipo de cemento genera altas resistencias a edad temprana y finales, como también menor calor de hidratación. El cemento pertenece a la marca Bío Bío y cumple con los requisitos de la NCh148 Of 1968.

3.3.2. Agregados

Los utilizados fueron comprados en la empresa “Áridos Caval Chile” y cuentan con una certificación de origen detallada en el Anexo 2. Estos materiales son de origen chancado y cumplen con los requerimientos de la normativa. Estos agregados fueron sometidos a ensayos de laboratorio para determinar sus propiedades físicas e hidráulicas, tomando en cuenta la norma ASTM de ensayos de materiales certificadas por el ACI. Las Tablas 3.3 y 3.4 muestran las propiedades físicas para cada una de las fracciones de los agregados utilizados.

Tabla 3.3: Propiedades físicas de los agregados finos

Propiedad del árido	Norma Chilena	Norma Internacional	Agregado Fino
Densidad aparente suelta seca (kg/m ³)	NCh 1239	ASTM C 128-1	3280
Densidad aparente compactada (kg/m ³)	NCh 1239	ASTM C 128-1	3406
Humedad (%) por secado		ASTM C 566 - 97	1.07
Peso específico. S.S.S (kg/m ³)		ASTM C 128-1	2705
Absorción (%)	NCh 1239	ASTM C 128-1	1.9
Módulo de Fineza	NCh 165 (Anexo A)	ASTM C 127-1	5.4

Tabla 3.4: Propiedades físicas de los agregados gruesos

Propiedad del árido	Norma Chilena	Norma Internacional	Árido Grueso
Densidad aparente suelta seca (kg/m ³)	NCh 1117	ASTM C 127-1	2438
Densidad aparente compactada (kg/m ³)	NCh 1117	ASTM C 127-1	2573
Humedad (%) por secado		ASTM C 566 - 97	0.9

Peso específico. S.S.S (kg/m ³)		ASTM C 127-1	2648
Absorción (%)	NCh 1117	ASTM C 127-1	2.2
Tamaño Máximo Nominal	NCh 165	ASTM C 128-1	3/4"

3.3.3. Agua

Se utilizó agua potable obtenida de la red del acueducto instalada en los laboratorios del DECON UC perteneciente a la Escuela de Construcción Civil.

3.4. Diseño de las mezclas de pruebas y confección de especímenes

3.4.1. Diseño de las mezclas de prueba

Se eligió el método de diseño de mezclas de hormigón de la ACI. Los cálculos completos de los diseños utilizados en esta investigación se pueden consultar en el Anexo 2. La Tabla 3.5 muestra las proporciones de cada uno de los materiales para la fabricación de las mezclas.

Tabla 3.5: Proporción de los materiales para la fabricación de los hormigones (kg/m³)

Material	Peso (kg)
Cemento	480
Agua	210
Agregado fino	1020
Agregado grueso	935

Los agregados pétreos fueron tamizados y separados en función de su tamaño para garantizar el cumplimiento de las granulometrías de estudio propuestas como se muestra en la Figura 3.1. Las probetas se fabricaron en los laboratorios del DECON UC perteneciente a la Escuela de Construcción Civil de la Universidad Católica de Chile. Los laboratorios tuvieron ambiente controlado con una temperatura de 20 °C ± 1°C.



Figura 3.1: Separación por tamaño de los agregados gruesos y finos (Soto J., 2019)

3.4.2. Confección de las probetas

Se utilizó una betonera para el mezclado mecánico de los materiales, los cuales fueron agregados desde el más grueso al más fino. Se siguió el procedimiento descrito en el Anexo 3. La compactación se realizó en una mesa vibratoria y el procedimiento de curado se realizó mediante inmersión en piscina, según lo recomendado por las normas ACI 308, NCh 170:2016. Los tiempos de curado utilizados fueron 7, 14 y 28 días. La Figura 3.2 presenta algunas de las actividades ejecutadas para la confección de los especímenes.

a. Mezcla de agregados



b. Preparación Vigas Prismáticas



c. Curado de las muestras



Figura 3.2: Procedimiento de preparación de muestras

Se fabricaron especímenes cilíndricos con un tamaño de 15x15x30 cm, para la determinación de la resistencia a la compresión, especímenes prismáticos (vigas) de dimensiones 15x55x15 cm, para la estimación de la resistencia a la flexión por tracción y especímenes semi-circulares (SCB)

para la determinación de la resistencia a la flexión por tracción con dimensiones de 5x15x7.4 cm, estos especímenes se obtienen 10 muestras de un cilindro de 15x15x30 cm, con separaciones de 5-6 cm.

Las probetas semi-circulares se obtuvieron 10 muestras a partir de especímenes cilíndricos que fueron cortados en rodajas con separaciones de 5-6 cm, las cuales fueron posteriormente cortadas a la mitad como se muestra en la Figura 3.3.

a. Corte Cilíndrico (SCB)



b. Muestras listas para ensayo (SCB)



Figura 3.3: Procedimiento de preparación de muestras

3.5. Ensayos al hormigón fresco y endurecido

3.5.1. Hormigón fresco

Posterior a la confección de las mezclas se midió la propiedad de docilidad del hormigón en estado fresco utilizando la norma NCh1019 Of 2009. Es necesario controlar esta propiedad con el fin de establecer que el hormigón confeccionado corresponde al que fue diseñado. La realización del ensayo en el laboratorio se describe en el Anexo 4.

3.5.2. Hormigón endurecido

Se estimaron las propiedades de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos, la resistencia a la tracción por flexión en especímenes prismáticos y la resistencia a la tracción por flexión en especímenes semi-circulares a las mezclas de hormigón en estado endurecido. Los ensayos mencionados se describen brevemente a continuación y el Anexo 4 presenta mayor detalle de los procedimientos y ejecución de cada uno de ellos. La Figura 3.4, muestra los tres tipos de ensayo.

- Ensayo a compresión simple: Se mide la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos según la NCh1037 Of2009. Se aplicó una velocidad de carga de $0,35 \text{ N/m}^2/\text{s}$.
- Ensayo a tracción por flexión: Se mide la resistencia a la tracción por flexión de probetas prismáticas según la NCh1038 Of2009. Se utilizó una velocidad de carga de $0,016 \text{ N/m}^2/\text{s}$.
- Ensayo a tracción por SCB: debido a que no existe una norma aplicada directamente al hormigón para especímenes semi-circulares, se utilizó la norma española UNE-EN 12697-44 empleada para especímenes asfálticos. Este ensayo permite estimar la resistencia a la tracción por flexión con carga en el centro. La velocidad de aplicación de la carga fue de $5,0 \text{ mm/min}$.



(a) Ensayo a compresión



(b) Ensayo a tracción por flexión



(c) Ensayo SCB

Figura 3.4: Ensayos al hormigón endurecido

3.6. Matriz experimental

La matriz experimental para esta investigación se muestra en la Tabla 3.6. Se incluye el tipo de mezcla de hormigón ensayado según la granulometría elegida, la edad de ensayo de los especímenes, la tipología de especímenes fabricados y la cantidad de ellos.

Tabla 3.6: Matriz experimental

Tipo de mezcla	Edad	Probetas cilíndricas		Probetas prismáticas
G1	7 días	3 cilindros	1 cilindro (Equivalente 10 semi círculos)	1 vigas
	14 días	3 cilindros	1 cilindro (Equivalente 10 semi círculos)	1 vigas
	28 días	3 cilindros	1 cilindro (Equivalente 10 semi círculos)	1 vigas
G2	7 días	3 cilindros	1 cilindro (Equivalente 10 semi círculos)	1 vigas
	14 días	3 cilindros	1 cilindro (Equivalente 10 semi círculos)	1 vigas
	28 días	3 cilindros	1 cilindro (Equivalente 10 semi círculos)	1 vigas
Total		24 cilindros		6 vigas

CAPITULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización mecánica en laboratorio de las mezclas de hormigón fabricadas con granulometría optimizada y no-optimizada. Las propiedades estimadas fueron la resistencia a la compresión cilíndrica, la resistencia a la tracción por flexión en viga y la resistencia a la flexión por tracción en vigas semi-circulares. Los resultados y su correspondiente análisis se desarrollan en los siguientes numerales para ambas mezclas de prueba y se presentan de la siguiente manera:

- ✓ Aplicación de la metodología Shilstone para las granulometrías de prueba
- ✓ Resistencia a la compresión cilíndrica
- ✓ Resistencia a la tracción por flexión con viga prismática
- ✓ Resistencia a la flexión por tracción con viga semi-circular (SCB)

4.1. Metodología Shilstone para las granulometrías de prueba

4.1.1. Obtención de las granulometrías combinadas de ensayo

La elección de las granulometrías optimizada (G1) y no optimizada (G2) se basó principalmente en la propuesta de Shilstone definida en el gráfico de factor de trabajabilidad vs factor de rugosidad. Como se mencionó en el capítulo 2, este gráfico propone zonas para identificar las características de las mezclas de hormigón según su trabajabilidad y rugosidad otorgada por la granulometría de los agregados utilizados para su fabricación. De acuerdo con la Figura 4.1, la zona identificada como “II” es la recomendada para hormigones y específicamente la zona II-2 es la ideal para mezclas de hormigón para pavimentos.

Por lo anterior, se eligió como granulometría G1 optimizada aquella que se localizara en la zona II-2 y para la granulometría G2 no optimizada aquella que estuviera fuera del rango de la zona “II”. Esta última elección es aleatoria por lo que se eligió la zona “IV”. Para definir los porcentajes retenidos y pasantes en cada uno de los tamices se tuvo en cuenta dos recomendaciones establecidas por el método Shilstone para optimizar la granulometría: la cantidad de material retenido en los tamices intermedios 3/8” a N° 8 y los límites establecidos por el gráfico araña. Para lograr lo anterior, se utilizó un tamaño máximo de los agregados para ambas granulometrías fue de 3/4”, una arena gruesa para la granulometría G1 y una arena media o fina para la granulometría G2 (según Tabla 2.2, del capítulo 2).

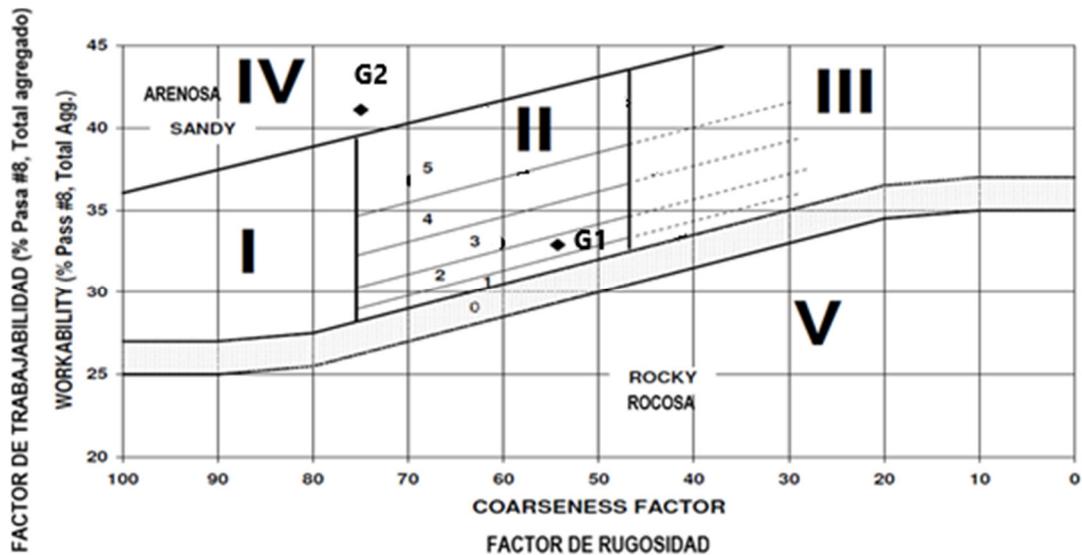


Figura 4.1: Localización de las granulometrías de estudio G1 y G2

Se realizaron tanteos sucesivos hasta conformar las granulometrías objetivo localizadas en las zonas ya mencionadas (II y IV) cuidando de cumplir con el gráfico de factor de trabajabilidad vs factor de rugosidad y el gráfico araña. La diferencia principal de las dos granulometrías es la cantidad de material pasante entre los tamices 3/8" y N° 8. El resultado de las granulometrías G1 y G2 se muestran en la Figura 4.2.

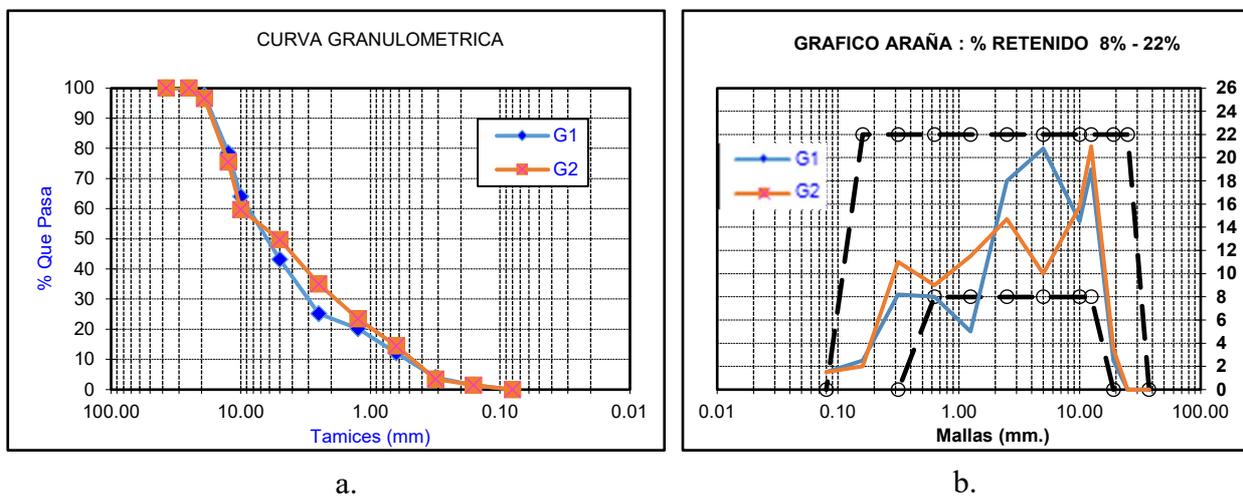


Figura 4.2: Granulometrías de estudio.

a. Curva granulométrica b. Gráfico araña

Se observa que los porcentajes retenidos de las granulometrías combinadas prácticamente se encuentran dentro de los rangos propuestos por el gráfico araña, indicando que tiene una buena graduación y distribución de sus tamaños. La granulometría G1 tiene un punto fuera del rango

propuesto, pero se considera normal y permitido de acuerdo con la metodología Shilstone como se especifica en el capítulo 2.3.1 en consideraciones y restricciones del grafico araña.

4.4.2. Cálculo del módulo de finura de las granulometrías de ensayo

El módulo de fineza (MF) es un índice de la fineza del agregado, entre mayor sea el módulo de fineza, más grueso será el agregado. El MF del agregado grueso o del agregado fino se obtiene conforme a la norma ASTM C 125 sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100. Las mallas que se emplean para determinar el módulo de finura son la de 0.15 mm (No.100), 0.30 mm (No.50), 0.60 mm (No.30), 1.18 mm (No.16), 2.36 mm (No.8), 4.75 mm (No.4), 9.52 mm (3/8”), 19.05 mm (3/4”), 38.10 mm (1½”). De acuerdo con lo anterior, los MF para los materiales utilizados en esta investigación fueron de 5,5 y 5,4 para las granulometrías G1 y G2 respectivamente. Los cálculos de los módulos de fineza se encuentran en el anexo 2, la formula se presenta con la ecuación 8.

$$MF = \frac{\sum \%Ret\ Acumulado\ (3/4",\ 1/2",\ 3/8",\ #4,\ #8,\ #16,\ #30,\ #50,\ #100)}{100} \quad (8)$$

Se observa que las dos granulometrías estudiadas G1 y G2 tienen similares módulos de fineza, lo que se debe a que los porcentajes retenidos acumulados en la malla 1/2” y 3/8” son prácticamente iguales y que las arenas seleccionadas tienen porcentajes representativos de arena gruesa o arena gruesa media.

4.4.3. Aplicación y explicación de la metodología Shilstone y gráficos

En este numeral se muestra el procedimiento recomendado por Shilstone para la construcción de los gráficos que sirven de apoyo para conocer el grado de optimización de la granulometría. Estos son los gráficos araña, factor de rugosidad vs factor de trabajabilidad y exponente 0,45.

a. Gráfico Araña

Teniendo en cuenta las recomendaciones y limitaciones entregadas por el método Shilstone se construyó el gráfico araña para las dos granulometrías de estudio. Para lograr lo anterior, se calcularon los porcentajes de peso retenido para cada uno de los tamices involucrados en el estudio cumpliendo como se muestra en la Tabla 4.3, teniendo en consideración que utiliza granulometría combinada para ambas granulometrías, pero la G1 utiliza los parámetros de la

metodóloga Shilstone para obtener una granulometría optimizada y posteriormente se construyó el gráfico araña como se muestra en la Figura 4.2.

b. Gráfico “factor de rugosidad vs factor de trabajabilidad”

El factor de rugosidad se calcula empleando la Ecuación 9. Hay que tener en cuenta que, al aumentar la cantidad del tamaño del agregado intermedio o fino, la mezcla será más fina y el factor de rugosidad disminuirá en valor. Por otro lado, al aumentar la cantidad de agregado grueso también aumentará el factor de rugosidad.

$$\text{Factor de rugosidad} = \frac{\% \text{ Retenido acumulado en el tamiz } \frac{3}{8}}{\% \text{ Retenido acumulado en el tamiz } \#8} \times 100 \quad (9)$$

En la Tabla 4.1 muestra los porcentajes retenidos acumulados para las dos granulometrías de estudio, de la cual solo se tomará el tamiz 3/8” y el tamiz número 8, como se indica en la ecuación 1, en resumen, se explica en la Tabla 4.2 el cálculo del factor de rugosidad.

Tabla 4.1: Porcentaje retenido acumulado, Factor de Rugosidad

% Retenido Acumulado			
PULGADAS	MILIMETROS	G1	G2
1 1/2"	37.50	0.00	0.00
1"	25.00	0.00	0.00
3/4"	19.00	2.50	3.50
1/2"	12.50	21.50	24.50
3/8"	10.00	36.00	40.29
Nº4	5.00	56.80	50.29
Nº8	2.50	74.80	64.99
Nº16	1.25	79.80	76.50
Nº30	0.63	87.80	85.50
Nº50	0.32	96.00	96.50
Nº100	0.16	98.50	98.50
Fondo	0.08	100.00	100.00

TABLA 4.2 : Calculo de Factor de Rugosidad

Granulometría	% retenido acumulado tamiz 3/8"	% retenido acumulado tamiz Nº 8	Factor de rugosidad
G1	36,00	74,80	48,13
G2	40,29	64,99	61,99

El factor de trabajabilidad, en el eje vertical representa el porcentaje combinado que pasa el tamiz N° 8 (2.36 mm), debe hacerse una corrección basada en el contenido de material cementoso de 564 lb/yd³ (335 kg/m³) si es mayor a esta cantidad se considera +2.5% en la cantidad del agregado fino y si es menor a la cantidad se considera -2.5% a la cantidad de agregado fino, cuando la mezcla contiene 564 lb/yd³ (335 kg/m³) de material cementoso, no hay factor de corrección. Con respecto al factor de trabajabilidad, el impacto de 94 lb (43 kg) de cemento Portland es aproximadamente igual a un ajuste similar de 2.5 %. A medida que se incrementan los materiales cementicios, el contenido de agregado fino debe reducirse para mantener el mismo factor de trabajabilidad y viceversa. Un aumento o una disminución en el contenido de material cementoso o el contenido de agregado fino sin un ajuste compensatorio en el otro de estos dos componentes afectará la viabilidad de la mezcla, en la cual tenemos dos ecuaciones con diferentes unidades métricas, ver la ecuación 6 y 7 del capítulo 2.

El Factor de trabajabilidad se puede calcular utilizando la ecuación 10.

$$\text{Factor de trabajabilidad} = \% \text{ pasa \#8 } (\pm 2.5\% \text{ por encima } 43 \text{ Kg cada } 335 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}) \quad (10)$$

La Tabla 4.1 muestra los porcentajes que pasan por cada uno de los tamices utilizados en este trabajo y la Tabla 4.3 presenta los resultados del factor de trabajabilidad.

Tabla 4.3: Cálculo del Factor de trabajabilidad para las granulometrías de estudio

Granulometría	Factor de trabajabilidad (FT)
G1	$FT = 25.20 + 2.5(480 - 335)/43 = 33.63$
G2	$FT = 35.01 + 2.5(480 - 335)/43 = 43.44$

(*) Para ambas granulometrías se consideró una cantidad de cemento de 480 kg/m³

Una vez calculado el factor de rugosidad y el factor de trabajabilidad de las granulometrías de estudio, se relacionan en el formato propuesto por Shilstone como se muestra en la Figura 4.3

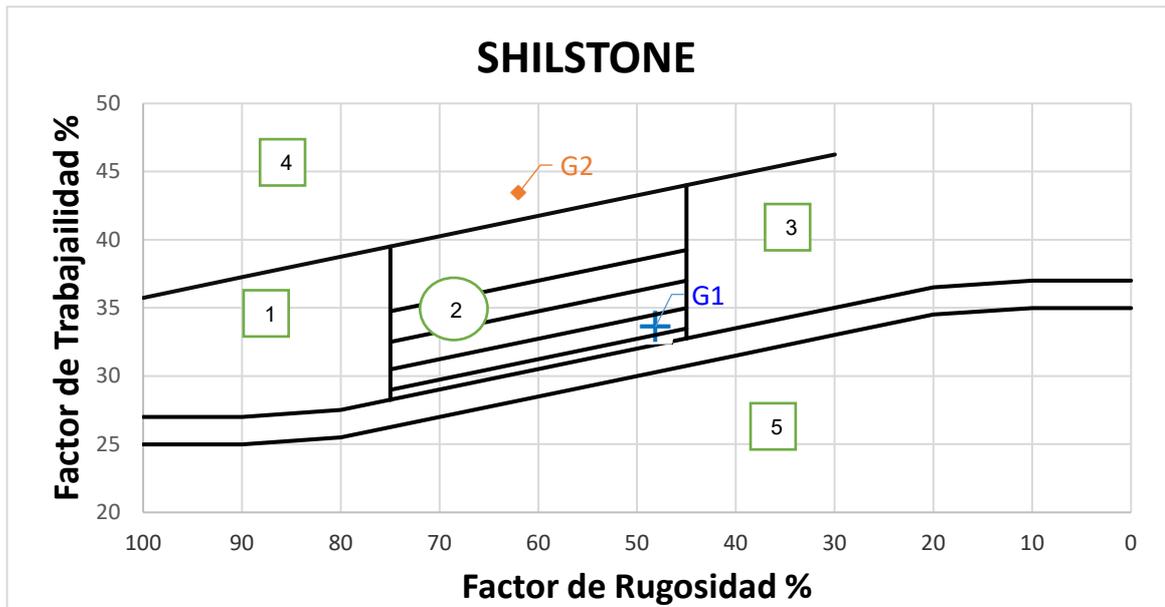


Figura 4.3: Factor Rugosidad y Factor Trabajabilidad para las granulometrías de estudio

De acuerdo a lo establecido en el capítulo 2.3.2 factor rugosidad vs factor de trabajabilidad del gráfico de Shilstone se divide en cinco zonas. Estas identifican los agregados bien graduados para diferentes tamaños máximo nominal, así como también existe una barra de tendencia que se considera como la zona de optimización de un hormigón en general. Según la Figura N° 4.3, la granulometría G1 se ubica en la zona 2.2 establecido para agregados máximos de 50mm – 19mm bien graduado teniendo una granulometría con TMN 20 mm, baja permeabilidad, trabajable y excelente para pavimentos de hormigón como se especifica en las sub-zonas del capítulo 2 descritas en la Figura 2.9. La granulometría G2 se ubica en una zona 4 con un TMN de 20 mm y arenoso. Este tipo de granulometría se puede utilizar para hormigones fluidos teniendo cuidado de no generar segregación al momento del vibrado produciendo una resistencia baja y una alta probabilidad de agrietamiento.

Se considera entonces que la granulometría G1 tiene un menor trabajabilidad y menor rugosidad comparada con la G2, pudiéndose utilizar en pavimentos de hormigón ubicándose en la zona ideal como lo establece la gráfica de Shilstone para ese tipo de granulometrías. Estos resultados coinciden con los resultados de asentamientos de conos obtenidos ya que la granulometría G1 tiene menor asentamiento (1.25 cm), comparada con la G2 que tiene (2.54 cm).

De acuerdo con la figura 2.9, la granulometría G1 se localiza en el sector B indicando que la mezcla de hormigón se puede colocar mediante una pavimentadora con moldajes en terreno. También puede extenderse con pavimentadoras sin moldaje debido al bajo asentamiento que presenta teniendo en cuenta las condiciones específicas del proyecto. En cuanto la granulometría

G2, no se localiza en ninguno de los 3 sectores (A, B y C), por lo que se recomienda su colocación a mano.

c. Gráfico exponente 0,45

La Figura 4.4, presenta el gráfico exponente 0,45 para las dos granulometrías de estudio. Se observa que ambas granulometrías se encuentran cerca de la línea de máxima densidad; no obstante, la granulometría G2 parece acercarse más comparada con la granulometría G1 presentando una mayor compacidad. Esto puede indicar que los hormigones fabricados con la granulometría G2 tengan una mayor densificación, un mejor desempeño estructural y principalmente una alta compacidad, lo cuál es la mejor protección contra el acceso de sustancias perjudiciales.

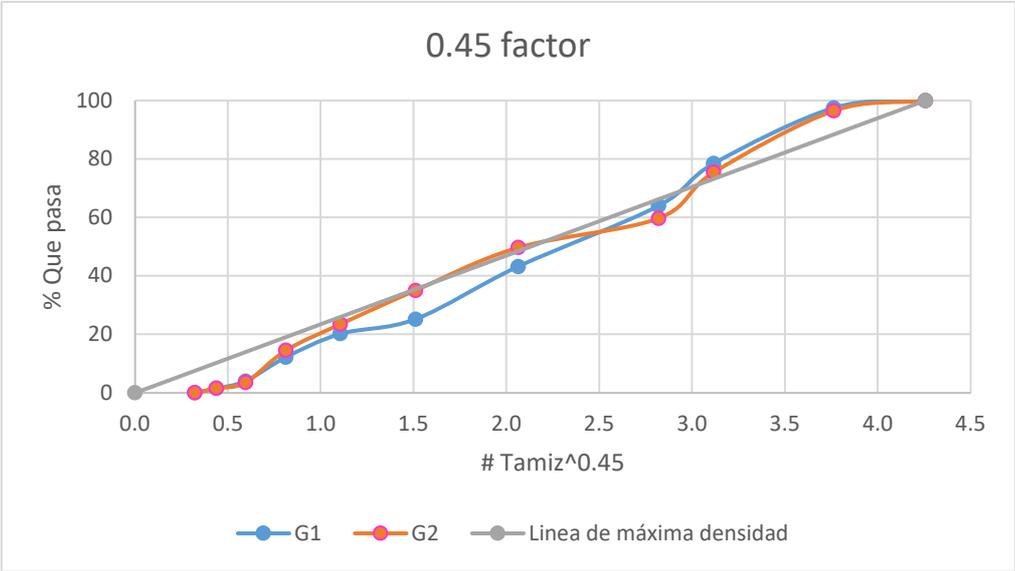


Figura 4.4: Grafico exponente 0.45

4.2. Ensayos al hormigón fresco

4.2.1. Ensayo de docilidad mediante el Cono de Abrams

Como se muestra en la Figura 4.5 se obtuvieron valores de descenso de altura del hormigón fresco que fueron 1.27 cm (0.5”) para G1 y 2.54 cm (1”) para G2, lo que representa un cono bajo y una consistencia seca.



Figura 4.5: Ensayos docilidad, cono de Abrams

4.3. Ensayos al hormigón endurecido

4.3.1. Ensayo a compresión cilíndrica

Para la resistencia a la compresión se ensayaron tres cilindros por cada edad de ensayo y cada hormigón de prueba. La Tabla 4.4 presenta los resultados de resistencia a la compresión para los hormigones de prueba.

Tabla 4.4: Resistencia a la compresión cilíndrica

Tipo de mezcla	Edad (días)	Resistencia a la compresión (MPa)	Desviación estándar para 95% de confiabilidad (MPa)	Error estándar para 95% de confiabilidad (MPa)	COV (%)
-G1	7	40.6	0.6	0.4	1.5
	14	44.4	2.0	1.1	4.4
	28	50.1	3.6	2.1	7.2
G2	7	40.2	0.5	0.3	1.1
	14	41.7	1.8	1.0	4.3
	28	44.7	3.7	2.1	8.2

Para una mejor visualización y comprensión de los datos se muestra la Figura 4.6, donde los errores estándar son relativamente bajos para las dos granulometrías, obteniendo el error máximo de 2.1 para la edad de ensayo de los 28 días, los coeficientes de variación estimado para todo el espacio muestral estudiado son menores al 10%, lo que indica que los datos obtenidos en el laboratorio son homogéneos y por lo tanto el valor promedio de las resistencias son representativos y confiables, como se muestra en la Figura 4.6.

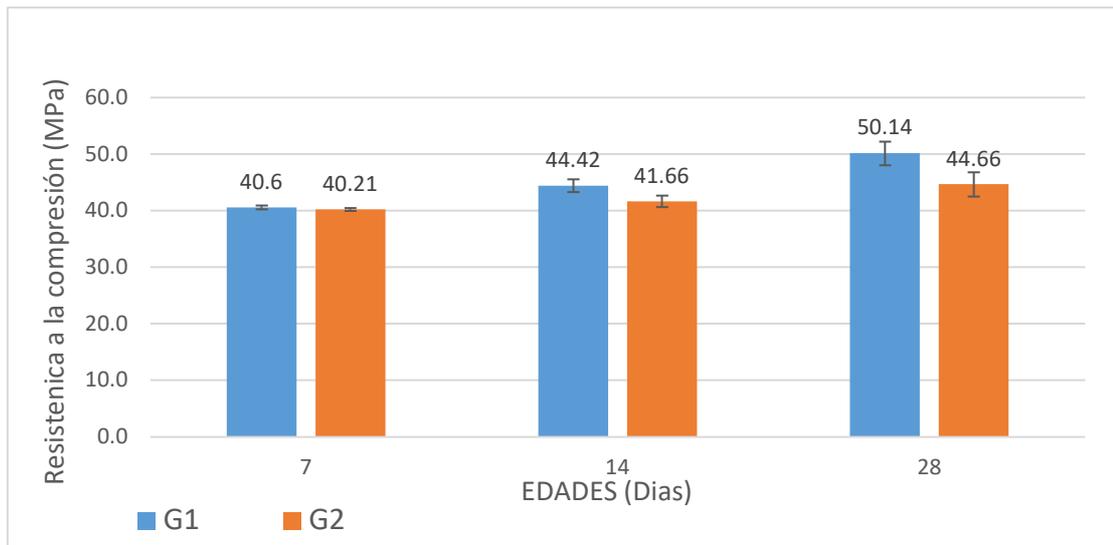


Figura 4.6: Resistencia a la compresión del hormigón endurecido

Estos resultados muestran que la resistencia a la compresión aumenta con la edad de ensayo de los especímenes para las dos mezclas de estudio. Las mezclas con la granulometría tipo G1 obtuvo mayores resistencias que las mezclas con la granulometría G2. Esto se esperaba ya que la mezcla G1 cumple con la optimización propuesta por Shilstone. No obstante, las resistencias de las dos mezclas a los 28 días fueron superiores a la resistencia especificada en el diseño (35 MPa) lo que podría deberse al uso de un cemento de alta resistencia no contemplado en el procedimiento de diseño de la mezcla.

4.3.2. Ensayo a flexión por tracción de viga

Para la propiedad de resistencia a la flexión por tracción se ensayó solamente una probeta prismática para cada edad de curado. Esto no permitió evaluar estadísticamente los resultados, pero si tener una idea general de la magnitud de los valores de esta propiedad.

La Tabla 4.5 presenta los resultados de la resistencia a la flexo-tracción por viga para las dos mezclas de prueba utilizadas en esta investigación. De acuerdo con los datos obtenidos en el laboratorio, se observa que la resistencia a la flexión por tracción por viga aumenta con la edad de ensayo de los especímenes. Esta tendencia se cumple para los dos tipos de mezclas de prueba. El aumento de la resistencia teniendo como base el valor obtenido a los 7 días de ensayo son del 14.28% y 20.63% para los especímenes G1 ensayados a los 14 y 28 días. Este aumento es mayor al que se produce en la resistencia a la compresión.

Tabla 4.5: Resistencia a flexo-tracción por viga prismatica

Tipo de mezcla	Edad (días)	Resistencia a la flexo-tracción (MPa)	Aumento de la resistencia (%)
G1	7	6.3	-
	14	7.2	14.3
	28	7.6	20.6
G2	7	5.4	-
	14	7.1	31.5
	28	7.4	37.0

Los resultados muestran que la resistencia a la flexo-tracción aumenta con la edad de ensayo de los especímenes para las dos mezclas de estudio. Las mezclas con la granulometría tipo G1 obtuvo mayores resistencias que las mezclas con la granulometría G2. Esto se esperaba ya que la mezcla G1 cumple con la optimización propuesta por Shilstone. No obstante, las resistencias de las dos mezclas a los 28 días fueron superiores a la resistencia especificada en el diseño (4.5 MPa) lo que podría deberse al uso de un cemento de alta resistencia no contemplado en el procedimiento de diseño de la mezcla.

La Figura 4.7 presenta de manera gráfica la relación entre la edad de ensayo de las probetas y la resistencia a la flexión del hormigón. Se propone una ecuación de ajuste del tipo logarítmico debido a que es la que presenta un mejor coeficiente de determinación (R^2). Esta tendencia es sólo válida para el rango experimental estudiado. Se obtuvieron valores de R^2 , 0.94 y 0.83 para las granulometrías G1 y G2 respectivamente. Estas ecuaciones de correlación permiten estimar la resistencia a la flexión por tracción para cualquier edad de curado de los especímenes.

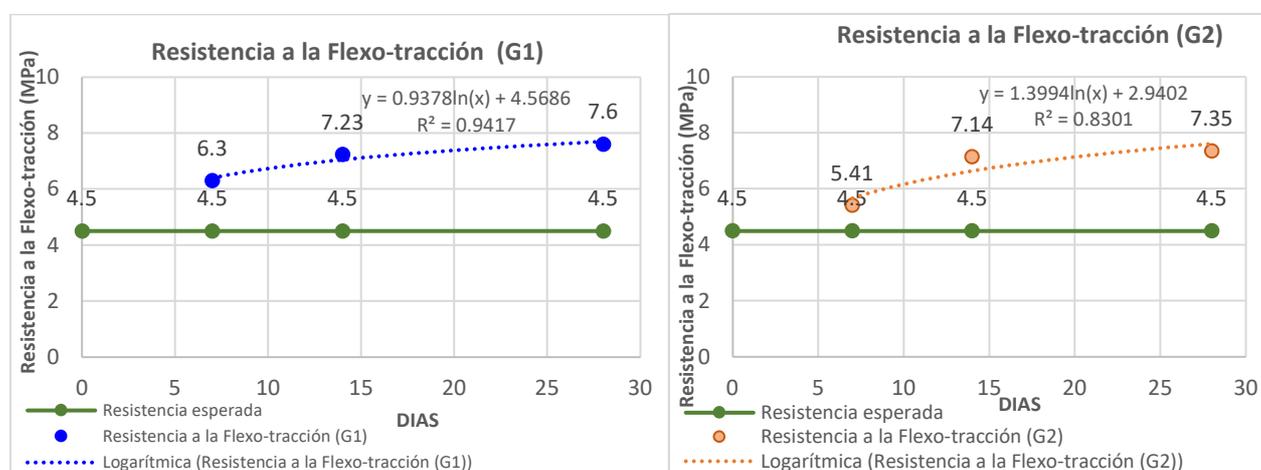


Figura 4.7: Línea de tendencia logarítmica y valor R2. G1 Y G2

La resistencia obtenida en la flexo-tracción por viga, indica que la granulometría optimizada G1, presenta una mayor resistencia inicial que la granulometría no optimizada G2, aunque la resistencia a los 28 días muestra datos similares, la granulometría optimizada sigue siendo superior a la granulometría no optimizada

4.3.3. Ensayo a flexión por tracción de viga semi-circular (SCB)

Se tomaron 10 puntos muestrales para cada uno de los especímenes ensayados a los 7,14 y 28 días. Todos los ensayos cumplieron con la fracturación en los límites permitidos del ensayo SCB experimentales, garantizando la homogeneidad y representatividad de los datos obtenidos en el laboratorio. En la Tabla 4.6 y Figura 4.8 se muestran los resultados del ensayo.

Tabla 4.6: Resistencia a tracción SCB, Desviación estándar y error estándar

Tipo de mezcla	Edad (días)	Resistencia a la tracción, Promedio (MPa)	Desviación estándar para el 95% de confiabilidad (MPa)	Error estándar para 95% de confiabilidad (MPa)	COV (%)
G1 (Shilstone)	7	5.4	0.6	0.2	11.2
	14	5.7	0.4	0.1	7.5
	28	6.7	0.5	0.2	7.4
G2 (MOP)	7	5.2	0.9	0.3	16.6
	14	5.5	0.6	0.2	10.8
	28	6.3	0.6	0.2	9.6

Para una mejor visualización de los datos mostrados se muestra la siguiente figura 4.8

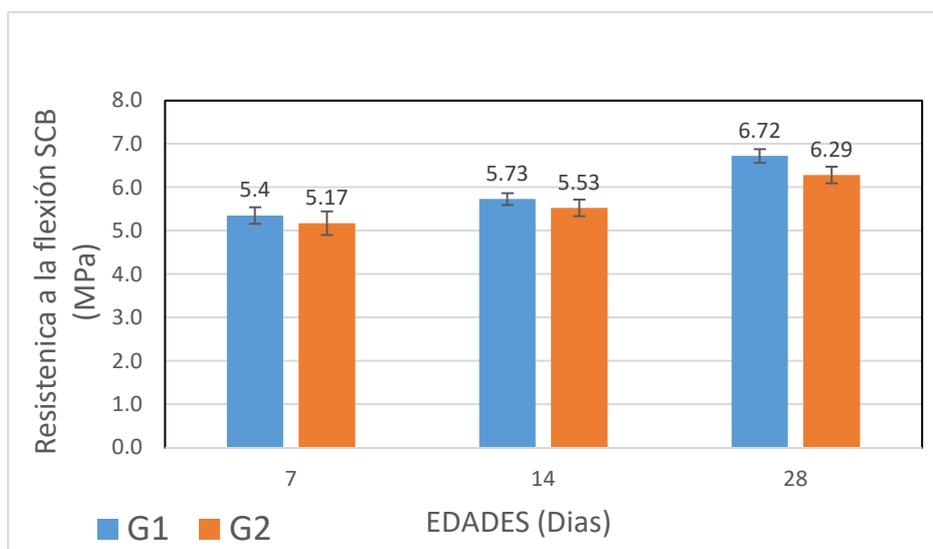


Figura 4.8: Resistencia a la flexión SCB

Los resultados muestran que la resistencia a la tracción por SCB aumenta con la edad de ensayo de los especímenes para las dos mezclas de estudio. Las mezclas con la granulometría tipo G1 obtuvo mayores resistencias que las mezclas con la granulometría G2, aunque las diferencias no son significativas cuando se tiene en cuenta el error estándar de los ensayos. Esto se esperaba ya que la mezcla G1 cumple con la optimización propuesta por Shilstone. No obstante, las resistencias de las dos mezclas a los 28 días fueron superiores a la resistencia especificada en el diseño (4.5 MPa) lo que podría deberse al uso de un cemento de alta resistencia no contemplado en el procedimiento de diseño de la mezcla.

De acuerdo con los datos obtenidos en el laboratorio, se observa que la resistencia a la flexión por tracción SCB aumenta con la edad de ensayo de los especímenes, obteniendo la ecuación y la línea de tendencia, donde se puede definir que la resistencia a la compresión de mezcla optimizada G1 tiene un mejor comportamiento con una línea de tendencia "Logarítmica", similar a lo descrito en la resistencia a la flexo-tracción por viga, que es la mejor tendencia ya que los valores crecen de manera gradual y decrecen cuando su vida útil a cumplido en el transcurso del tiempo. El valor de R^2 de 0.959, lo que significa que tiene menos dispersión de datos.

4.4. Relación entre las propiedades de resistencia del hormigón endurecido

4.4.1. Relación entre compresión cilíndrica y flexo-tracción en vigas

La figura 4.9 muestran que la ecuación de regresión más apropiada que se ajustan a los datos experimentales corresponde a una ecuación de tipo logarítmica. Obteniendo una mejor correlación de la resistencia a la compresión y flexo- tracción del hormigón. En conclusión, la ecuación logarítmica tanto para la granulometría G1 y G2, se puede utilizar para tener una rápida conversión estimando resistencias específicas de la flexo-tracción de viga, a través de la resistencia a la compresión cilíndrica.

Este análisis de correlación nos ayuda a tener resultados rápidos por medio de conversiones entre las diferentes magnitudes de la resistencia utilizando una fórmula empírica. Se selecciona la ecuación con el mayor valor del Coeficiente de determinación (R^2), indicando que entre mayor sea, más ajustada está la ecuación a los datos experimentales. Los valores de coeficiente de determinación son 0.89 y 0.67 para las granulometrías G1 y G2 respectivamente, indicando una correlación positiva fuerte (G1) y media (G2).

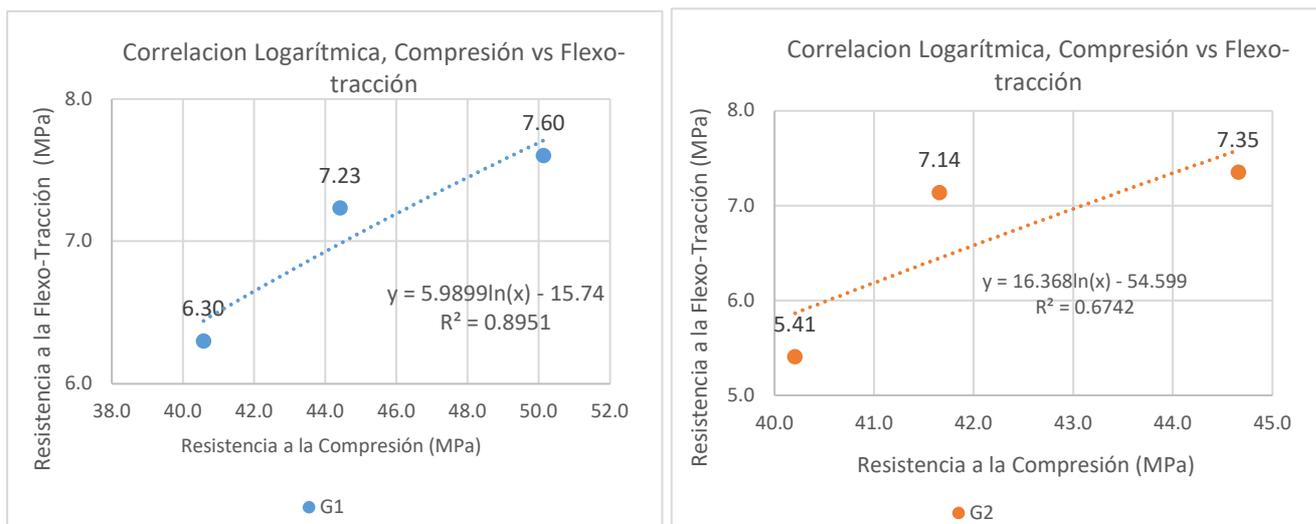


Figura 4.9: Línea de tendencia y ecuación de correlación entre magnitudes. G1 y G2

Los modelos de regresión obtenidos corresponden a las Ecuaciones 8 y 9. La Tabla 4.7 presenta un análisis del porcentaje de error entre los valores experimentales y los entregados por los modelos de regresión. Se observa que la ecuación propuesta para la granulometría G1 se ajusta más a los datos experimentales debido a que los porcentajes de error son menores comparados con los calculados para la granulometría G2.

$$f_s = 5.9899 \ln(f'c) - 15.74 \quad (8)$$

$$f_s = 16.368 \ln(f'c) - 54.60 \quad (9)$$

Donde:

F1 = Ecuación logarítmica de la granulometría G1

F2 = Ecuación logarítmica de la granulometría G2

Tabla 4.7: Análisis de correlación entre compresión cilíndrica y flexo -tracción, G1 y G2

Granulometría	Edad (días)	Valor de resistencia (MPa)				% error
		Datos experimentales			Predicho	
		Compresión ($f'c$)	Flexión	Formula Logarítmica	Flexión (f_s)	
G1	7	40.58	6.30	$5.9899 \ln(f'c) - 15.74$	6.44	2.22
	14	44.42	7.23	$5.9899 \ln(f'c) - 15.74$	6.98	-3.45
	28	50.14	7.60	$5.9899 \ln(f'c) - 15.74$	7.71	1.45
G2		Compresión ($f'c$)	Flexión	F2	Flexión (f_s)	
	7	40.21	5.41	$16.368 \ln(f'c) - 54.60$	5.83	7.76
	14	41.66	7.14	$16.368 \ln(f'c) - 54.60$	6.45	-9.66
	28	44.66	7.35	$16.368 \ln(f'c) - 54.60$	7.58	3.12

Por lo visto en la tabla 4.7, la ecuación propuesta por la granulometría G1 presenta porcentajes de error menores al porcentaje de error de la granulometría G2. Ya que los errores mostrados son relativamente pequeños, se puede utilizar la formula logarítmica para predecir una magnitud de resistencia de flexión por viga utilizando la resistencia a la compresión cilíndrica.

Otra forma de analizar una posible correlación entre las resistencias a la compresión y a la flexión de vigas es calcular los cocientes de cada punto experimental y determinar si existe una constante que permita realizar una conversión más simplificada pero ajustada a los datos experimentales. En la Tabla 4.8 se muestran los cocientes obtenidos para este trabajo, obteniéndose un valor promedio de 6.39 (p_1) para la granulometría optimizada G1 y 6.45 (p_2) para la granulometría no optimizada G2. El promedio calculado teniendo en cuenta todos los valores de los cocientes tanto de la G1 como de la G2 es de 6.42 (p). La tabla presenta un análisis de los resultados utilizando estos valores únicos para predecir una de las propiedades mecánicas del hormigón cuando se conoce la otra.

Tabla 4.8: Análisis de correlación entre compresión cilíndrica y flexo -tracción G1 y G2, por cociente

Granulometría	Edad (días)	Valor de resistencia (MPa)				% error
		Datos experimentales			Valor Predicho	
		Compresión (f'_c)	Flexión (f_s)	Cociente (f'_c/f_s)	Flexión (f'_c/p)	
G1	7	40.58	6.30	6.44	6.35	0.79
	14	44.42	7.23	6.14	6.95	-3.87
	28	50.14	7.60	6.60	7.84	3.16
	Promedio (p_1)			6.39		
G2	7	40.21	5.41	7.43	6.23	15.16
	14	41.66	7.14	5.83	6.46	9.52
	28	44.66	7.35	6.08	6.92	-5.85
	Promedio (p_2)			6.45		

Donde:

V_p = Valores predichos

p_1 = Promedio de cocientes G1

p_2 = Promedio de cocientes G2

p_3 = Promedio de cocientes (G1+G2)

p = p_1, p_2, p_3

Como se puede observar en la tabla 4.8, el porcentaje de error obtenido entre el valor predicho y la resistencia obtenida, son relativamente bajos para la granulometría optimizada G1, demostrando tener un mejor ajuste a los valores experimentales de la G2.

Después de encontrar los promedios de los cocientes tanto para la granulometría G1 y la granulometría G2 respectivamente (p_1 y p_2), y teniendo en cuenta todos los valores de los cocientes tanto de la G1 como de la G2 en general se obtiene un promedio (p_3) que es de 6.42.

Tabla 4.9: Correlación entre compresión cilíndrica y flexo -tracción G1 y G2, valores estimados y % de error

Granulometría	Edad (días)	Valor resistencia (MPa)					% error		
		Datos experimentales		Valores predichos (Vp)			Vp ₁	Vp ₂	Vp ₃
		Compresión (f'_c)	Flexión (f_s)	f'_c/p_1	f'_c/p_2	f'_c/p_3			
G1	7	40.58	6.30	6.35		6.32	0.79		0.32
	14	44.42	7.23	6.95		6.91	-3.87		-4.43
	28	50.14	7.60	7.84		7.81	3.16		2.76
G2	7	40.21	5.41		6.23	6.26		15.16	15.71
	14	41.66	7.14		6.46	6.49		9.52	-9.10
	28	44.66	7.35		6.92	6.96		-5.85	-5.31

Donde:

Vp= Valores predichos

p_1 = Promedio de cocientes G1

p_2 = Promedio de cocientes G2

p_3 = Promedio de cocientes (G1+G2)

Vp₁= % error de la granulometría G1

Vp₂= % error de la granulometría G2

Vp₃= % error de la granulometría (G1+G2)

Como se observa en la Tabla 4.9, la granulometría G1 muestra sus valores de error más ajustados a los valores experimentales que la granulometría G2 esto se debe a que existe una buena correlación de la granulometría optimizada entre las magnitudes de resistencias de compresión cilíndrica y flexo-tracción por viga. Utilizando un promedio de ambos promedios de los cocientes G1 y G2, podemos estimar la resistencia a la flexo-tracción a través de un factor único de 6.42. Es decir que la resistencia a la flexión del hormigón es 6.42 veces la resistencia

a la compresión cilíndrica. De acuerdo con el Manual de Pavimentos de Hormigón de Argentina (ICPA, 2004), la resistencia a la compresión oscila entre 7,14 a 8,30 veces la resistencia a la flexión. Como se puede ver, el valor promedio obtenido para esta investigación es inferior al rango propuesto en Argentina; lo que podría deberse al empleo de cemento de alta resistencia. Tradicionalmente los rangos propuestos para la relación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la compresión consideran cementos tradicionales y no especiales. No obstante, la National Ready Mixed Concrete Association (2000) menciona que la resistencia a la flexión oscila entre un 10 a 15 por ciento de la resistencia a la compresión dependiendo de la proporción de la mezcla y el tipo, tamaño y volumen de los agregados gruesos utilizados. En este trabajo se obtuvo un promedio de 15,7%, valor un poco superior a este rango.

4.4.2. Relación entre compresión cilíndrica y tracción en especímenes Semi-circulares (SCB)

La Figura 4.10 presenta los modelos de regresión hallados en esta investigación que relacionan la resistencia a la compresión y resistencia a la flexión SCB del hormigón. Se observa que la ecuación que mejor se ajusta a los datos experimentales es la de forma logarítmica. Esto es válido para el espacio muestral estudiado en esta investigación. Los modelos de regresión presentan coeficientes de determinación (R^2) de 0,97 y 1,0, indicando que las ecuaciones se ajustan muy bien a los datos experimentales. Esto señala que se ajusta más la relación de la resistencia a la compresión con la resistencia a la flexión obtenida mediante probetas semicirculares que la resistencia obtenida con vigas estandarizadas.

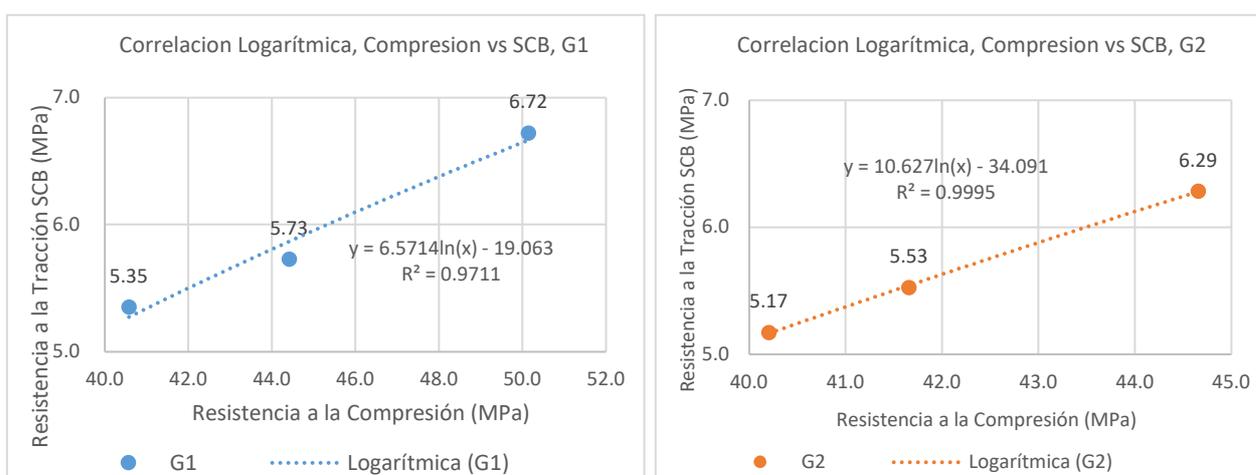


Figura 4.10: Línea de tendencia y ecuación de correlación entre Compresión y tracción SCB. G1 y G2

Las ecuaciones obtenidas como modelos de regresión corresponden a la Ecuaciones 10 y 11. Estas ecuaciones permiten estimar la resistencia a la flexión SCB a partir del valor de la resistencia a la compresión de cilindros del hormigón. El análisis del error de predicción de dichos modelos se presenta en la Tabla 4.10.

$$F1 = f_{sb} = 6.5714 \ln(f'c) - 19.063 \quad (10)$$

$$F2 = f_{sb} = 10.627 \ln(f'c) - 34.091 \quad (11)$$

Donde:

F1 = Formula logarítmica de la granulometría G1

F2 = Formula logarítmica de la granulometría G2

Tabla 4.10: Análisis de correlación entre compresión cilíndrica y flexo -tracción, G1 y G2

Granulometría	Edad (días)	Valor de resistencia (MPa)				% error
		Datos experimentales			Valor Predicho	
		Compresión ($f'c$)	Flexión SCB	Formula Logarítmica	Flexión SCB (f_{sb})	
G1	7			40.58		5.35	$6.5714 \ln(f'c) - 19.063$	5.27	-1.50
	14	44.42	5.73	$6.5714 \ln(f'c) - 19.063$	5.87	2.44
	28	50.14	6.72	$6.5714 \ln(f'c) - 19.063$	6.66	-0.89
G2		Compresión ($f'c$)	Flexión SCB	F2	Flexión SCB (f_{sb})	
	7	40.21	5.17	$10.627 \ln(f'c) - 34.091$	5.17	0
	14	41.66	5.53	$10.627 \ln(f'c) - 34.091$	5.54	0.18
	28	44.66	6.29	$10.627 \ln(f'c) - 34.091$	6.28	-0.16

Por lo visto en la Tabla 4.10, la ecuación propuesta por la granulometría G1 y G2 presenta porcentajes de errores pequeños a cada uno de los días ensayados. Pudiéndose utilizar la formula logarítmica para cada granulometría, prediciendo una magnitud de resistencia de tracción por ensayo SCB, utilizando la resistencia a la compresión cilíndrica.

Otra forma de analizar una posible correlación entre las resistencias a la compresión y tracción por ensayo SCB, es calcular los cocientes de cada punto experimental y determinar si existe una constante que permita realizar una conversión más simplificada pero ajustada a los datos experimentales y por lo tanto confiable. En la Tabla 4.11 se muestran los cocientes obtenidos para este trabajo, obteniéndose un valor promedio de 7.60 para la granulometría optimizada G1

y 7.47 para la granulometría no optimizada G2. El promedio calculado teniendo en cuenta todos los valores de los cocientes tanto de la G1 como de la G2 es de 7.54. La tabla presenta un análisis de los resultados utilizando estos valores únicos para predecir una de las propiedades mecánicas del hormigón cuando se conoce la otra, ver la Tabla 4.11 y 4.12

Tabla 4.11: Análisis de correlación entre compresión cilíndrica y tracción (SCB) G1 y G2, por cociente

Granulometría	Edad (días)	Valor de resistencia (MPa)				% error
		Datos experimentales			Valor Predicho	
		Compresión (f'_c)	Flexión (f_{sb})	Cociente (f'_c/f_{sb})	Flexión (f'_c/p)	
G1	7	40.58	5.35	7.59	5.34	0.19
	14	44.42	5.73	7.75	5.84	1.92
	28	50.14	6.72	7.46	6.60	-1.79
	Promedio (p)			7.60		
G2	7	40.21	5.17	7.78	5.38	4.06
	14	41.66	5.53	7.53	5.58	0.90
	28	44.66	6.29	7.10	5.98	-4.93
	Promedio (p)			7.47		

Como se puede observar en la Tabla 4.11, el porcentaje de error obtenido entre el valor predicho y la resistencia obtenida, son relativamente bajos para la granulometría optimizada G1, demostrando tener un mejor ajuste a los valores experimentales de la G2.

Después de encontrar los promedios de los cocientes tanto para la granulometría G1 y la granulometría G2 respectivamente (p_1 y p_2), y teniendo en cuenta todos los valores de los cocientes tanto de la G1 como de la G2 en general se obtiene un promedio (p_3) que es de 7.54.

Tabla 4.12: Correlación entre compresión cilíndrica y tracción (SCB) G1 y G2, valores estimados y % de error

Granulometría	Edad (días)	Valor resistencia (MPa)					% error		
		Datos experimentales		Valores predichos					
		Compresión	Flexión SCB	f'_c/p_1	f'_c/p_2	f'_c/p_3	Vp_1	Vp_2	Vp_3
G1	7	40.58	5.35	5.34		5.38	0.19		0.56
	14	44.42	5.73	5.84		5.89	1.92		2.79
	28	50.14	6.72	6.60		6.65	-1.79		-1.04
G2	7	40.21	5.17		5.38	5.32		4.06	2.90
	14	41.66	5.53		5.58	5.53		0.90	0
	28	44.66	6.29		5.98	5.92		-4.93	-5.88

Donde:

V_p = Valores predichos

p_1 = Promedio de cocientes G1

p_2 = Promedio de cocientes G2

p_3 = Promedio de cocientes (G1+G2)

Vp_1 = % error de la granulometría G1

Vp_2 = % error de la granulometría G2

Vp_3 = % error de la granulometría (G1+G2)

Como se visualiza en la tabla 4.12, la granulometría G1 muestra valores de error más ajustados a los valores experimentales que la granulometría G2. Esto se debe a que existe una buena correlación de la granulometría optimizada entre las magnitudes de resistencias de compresión cilíndrica y tracción por SCB. Utilizando un promedio de ambos promedios de los cocientes G1 y G2, podemos estimar la resistencia a la tracción por SCB, a través de un factor único de 7.54 veces la compresión cilíndrica.

En definición estos resultados muestran que la correlación logarítmica estimada para la resistencia a la tracción por SCB de la granulometría G1 tiene mejor correlación para la conversión entre la resistencia a la compresión, así como también se puede observar que tiene una menor diferencia porcentual que la granulometría G2 la cual tiene una mayor diferencia en su correlación. En conclusión, la ecuación de la granulometría G1 se puede utilizar para estimar resistencias específicas de tracción por SCB a través de la resistencia a la compresión cilíndrica.

4.4.3. Relación entre flexo-tracción en vigas y flexo-tracción en especímenes Semicirculares (SCB)

En este numeral se estudia una posible relación entre las resistencias a la flexión de vigas y flexión de probetas semicirculares con el fin de determinar la factibilidad del empleo de este último tipo de probetas como reemplazo de las vigas tradicionalmente utilizadas, este análisis de correlación nos ayuda a tener resultados rápidos por medio de conversiones entre las diferentes magnitudes de la resistencia utilizando una fórmula y línea de tendencia exponencial, ver figura 4.11.

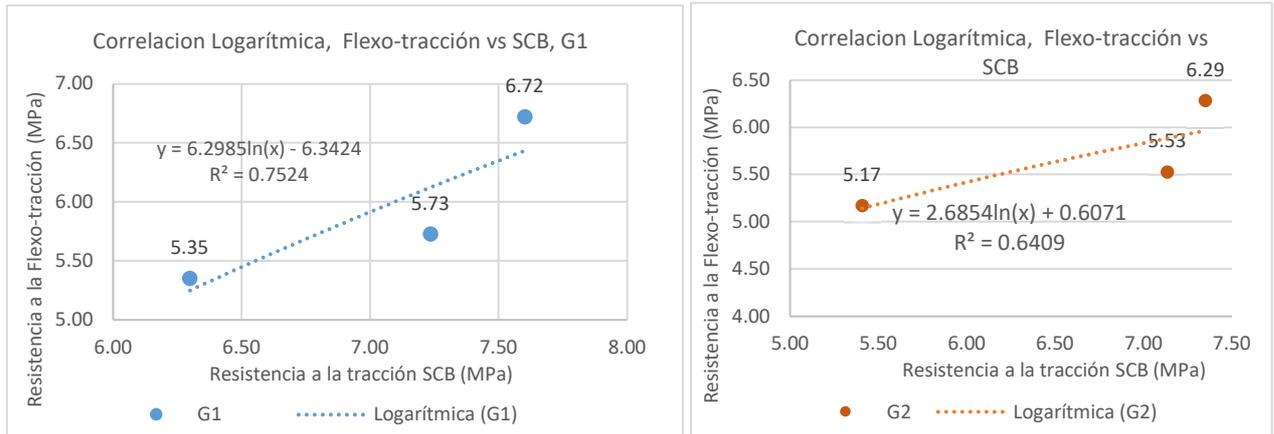


Figura 4.11: Línea de tendencia y ecuación de correlación entre Flexo-tracción y tracción SCB. G1 y G2

Una vez elegida la línea de tendencia y la ecuación logarítmica de la ecuación 12 y 13, para este caso se puede convertir y estimar resistencia a la flexo-tracción por viga utilizando la resistencia a la flexo-tracción por ensayo SCB, como se puede observar en la Tabla 4.13.

$$F1 = fs = 6.2985Ln(fs_b) - 6.3424 \quad (10)$$

$$F2 = fs = 2.6854Ln(fs_b) + 0.6071 \quad (11)$$

Donde:

F1 = Formula logarítmica de la granulometría G1

F2 = Formula logarítmica de la granulometría G2

Tabla 4.13: Análisis de correlación entre compresión cilíndrica y flexo -tracción, G1 y G2

Granulometría	Edad (días)	Valor de resistencia (MPa)			% error	
		Datos experimentales		Valor Predicho		
		Flexión SCB (<i>fs_b</i>)	Flexión	Formula Logarítmica F1		Flexión (<i>fs</i>)
G1	7	5.35	6.30	6.2985Ln(<i>fs_b</i>)-6.3424	4.22	33.02
	14	5.73	7.23	6.2985Ln(<i>fs_b</i>)-6.3424	4.65	35.68
	28	6.72	7.60	6.2985Ln(<i>fs_b</i>)-6.3424	5.66	25.53
G2		Flexión SCB (<i>fs_b</i>)	Flexión	F2	Flexión (<i>fs</i>)	
	7	5.17	5.41	2.6854Ln(<i>fs_b</i>)+0.6071	5.02	-7.21
	14	5.53	7.14	2.6854Ln(<i>fs_b</i>)+0.6071	5.20	-27.17
	28	6.29	7.35	2.6854Ln(<i>fs_b</i>)+0.6071	5.55	-24.49

Por lo visto en la Tabla 4.13, la ecuación propuesta por la granulometría G1 y G2 presenta porcentajes de errores elevados para cada uno de los días ensayados. Definiendo que las fórmulas logarítmicas de correlación para las dos granulometrías, no es la adecuada para el cálculo de la flexión por viga a través del cálculo de tracción por ensayo SCB.

De una manera distinta se puede analizar una posible correlación entre las resistencias a la flexo-tracción por viga y flexo-tracción por ensayo SCB, es calcular los cocientes de cada punto experimental y determinar si existe una constante que permita realizar una conversión más simplificada pero ajustada a los datos experimentales y por lo tanto confiable. En la Tabla 4.14 se muestran los cocientes obtenidos para este trabajo, obteniéndose un valor promedio de 0.84 para la granulometría optimizada G1 y 0.86 para la granulometría no optimizada G2. El promedio calculado teniendo en cuenta todos los valores de los cocientes tanto de la G1 como de la G2 es de 0.85. La tabla presenta un análisis de los resultados utilizando estos valores únicos para predecir una de las propiedades mecánicas del hormigón cuando se conoce la otra, ver la Tabla 4.14 y 4.15.

Tabla 4.14: Análisis de correlación entre flexo-tracción por viga y tracción (SCB) G1 y G2, por cociente

Granulometría	Edad (días)	Valor de resistencia (MPa)				% error
		Datos experimentales			Valor Predicho	
		Flexión SCB (f_{scb})	Flexión (f_s)	Cociente (f_{scb}/f_s)	Flexión (f_{scb}/ρ)	
G1	7	5.35	6.30	0.85	6.37	1.11
	14	5.73	7.23	0.79	6.82	-5.67
	28	6.72	7.60	0.88	8.00	5.26
	Promedio (p)			0.84		0.23
G2	7	5.17	5.41	0.96	6.02	11.28
	14	5.53	7.14	0.77	6.43	-9.94
	28	6.29	7.35	0.86	7.31	-0.54
	Promedio (p)			0.86		0.26

Como se puede observar en la Tabla 4.14, el porcentaje de error obtenido entre el valor predicho y la resistencia obtenida, son relativamente bajos para la granulometría optimizada G1, demostrando tener un mejor ajuste a los valores experimentales de la G2.

Después de encontrar los promedios de los cocientes tanto para la granulometría G1 y la granulometría G2 respectivamente (p_1 y p_2), y teniendo en cuenta todos los valores de los cocientes tanto de la G1 como de la G2 en general se obtiene un promedio (p_3) que es de 0.85

Tabla 4.15: Correlación entre flexo-tracción por viga y tracción (SCB) G1 y G2, valores estimados y % de error

Granulometría	Edad (días)	Valor resistencia (MPa)					% error		
		Datos experimentales		Valores predichos			Vp_1	Vp_2	Vp_3
		Flexión SCB (f_{sb})	Flexión (f_s)	f'_c/p_1	f'_c/p_2	f'_c/p_3			
G1	7	5.35	6.30	6.37		6.29	1.11		0.48
	14	5.73	7.23	6.82		6.74	-5.67		-6.78
	28	6.72	7.60	8.00		7.91	5.26		4.08
G2	7	5.17	5.41		6.02	6.08		11.28	12.38
	14	5.53	7.14		6.43	6.51		-9.94	-8.82
	28	6.29	7.35		7.31	7.40		-0.54	0.68

Donde:

Vp = Valores predichos

p_1 = Promedio de cocientes G1

p_2 = Promedio de cocientes G2

p_3 = Promedio de cocientes (G1+G2)

Vp_1 = % error de la granulometría G1

Vp_2 = % error de la granulometría G2

Vp_3 = % error de la granulometría (G1+G2)

Como se visualiza en la tabla 4.15, la granulometría G1 muestra valores de error más ajustados a los valores experimentales que la granulometría G2. Esto se debe a que existe una buena correlación de la granulometría optimizada entre las magnitudes de resistencias a flexo-tracción y tracción por SCB. Utilizando un promedio de ambos promedios de los cocientes G1 y G2, podemos estimar la resistencia a la flexo-tracción por viga a través de un factor único de 0.85 veces la resistencia a la tracción por SCB.

En definición estos resultados muestran que la correlación logarítmica estimada para la resistencia a la flexo-tracción por SCB de la granulometría G1 tiene mejor correlación para la conversión entre la resistencia a a flexo-tracción por viga, así como también se puede observar

que tiene una menor diferencia porcentual que la granulometría G2 la cual tiene una mayor diferencia en su correlación. En conclusión, la ecuación de la granulometría G1 se puede utilizar para estimar resistencias específicas de flexo-tracción de viga a través de la resistencia a la flexo-tracción por ensayo SCB.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y CONSIDERACIONES

5.1. CONCLUSIONES:

Se desarrolló un estudio experimental en el laboratorio para caracterizar distintas mezclas de hormigón fabricadas con dos distintas granulometrías optimizadas según la metodología Shilstone (una granulometría optimizada G1 y una no optimizada G2). Se midieron las propiedades de resistencia a la compresión cilíndrica, resistencia a la flexión de vigas y resistencia a la flexión utilizando probetas semicirculares. Las principales conclusiones obtenidas del estudio son:

- La granulometría optimizada (G1) tuvo mayores valores de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión de vigas y resistencia a la flexión de probetas semicirculares comparada con la granulometría no optimizada. Estos resultados corroboran lo indicado por Shilstone en su metodología, indicando que se pueden obtener mejores propiedades mecánicas de un hormigón cuando se localiza en una zona determinada del gráfico Factor de rugosidad vs Factor de trabajabilidad.
- Debido a las propiedades mecánicas de las mezclas de estudio y en que ambas granulometrías se utilizó los mismos tipos de agregados con granulometrías distintas, existe un aumento de la resistencia a la compresión de un 10.94% cuando se comparan las mezclas fabricadas con una granulometría optimizada (G1) y no optimizada (G2) respectivamente. En cuanto la resistencia a la flexión de vigas la diferencia es de un 3.40% y para la resistencia a la flexión de vigas semicirculares de un 6.50% para una edad de curado de 28 días. Este aumento de resistencias se debe principalmente al tipo de granulometría empleado que es la única variable del estudio ya que las demás condiciones de las mezclas permanecieron constantes para ambas granulometrías, específicamente al material retenido en los tamices N° 4 y N° 16 produciendo un mejor comportamiento en la densidad del hormigón.
- La granulometría optimizada utilizada en este trabajo se localiza en la zona 2.2, sector B del gráfico Shilstone, factor de rugosidad y factor de trabajabilidad. Esto indica que se recomienda que su colocación en el terreno sea de forma mecánica y no manual. Por otro lado, la granulometría no optimizada puede colocarse de ambas formas.

- Se obtuvieron ecuaciones de correlación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión de vigas de la forma logarítmica. Estas ecuaciones permiten estimar la propiedad de la resistencia a la flexión mediante la resistencia a la compresión de cilindros del hormigón. Se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de 0,89 y 0,67 para los hormigones fabricados con las granulometrías G1 y G2 respectivamente, indicando correlaciones positivas fuerte y media. En el caso de los hormigones con granulometría G2, los valores predichos presentan porcentajes de error superiores al 9%, representando diferencias de hasta 0,6 MPa respecto del valor experimental. También se obtuvo un coeficiente único para realizar la conversión de las propiedades de resistencia, obteniendo un valor de 6,42 cuando se tienen en cuenta ambas mezclas estudiadas. Con este factor único se obtienen porcentajes de error menores a los obtenidos por las ecuaciones de correlación individual para cada una de las mezclas estudiadas para los 28 días de curado. Lo anterior indica que es posible utilizar este factor único para predecir la resistencia a la flexión de vigas a partir de la resistencia a compresión del hormigón.
- Se obtuvieron ecuaciones de correlación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción por ensayo SC de la forma logarítmica. Estas ecuaciones permiten estimar la propiedad de la resistencia a la tracción SCB, mediante la resistencia a la compresión de cilindros del hormigón. Se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de 0,97 y 0,99 para los hormigones fabricados con las granulometrías G1 y G2 respectivamente, indicando correlaciones positivas débiles. En el caso de los hormigones con granulometría G1, los valores predichos presentan porcentajes de error superiores al 2%, representando diferencias de hasta 0,15 MPa respecto del valor experimental. También se obtuvo un coeficiente único para realizar la conversión de las propiedades de resistencia, obteniendo un valor de 7,54 cuando se tienen en cuenta ambas mezclas estudiadas. Con este factor único se obtienen porcentajes de error medio superiores a 2% y 5%, para los hormigones fabricados con granulometrías G1 y G2 respectivamente. Indicando que ambas correlaciones individuales, tanto la de ecuación logarítmica y por cálculo de promedio de cocientes para cada una de las mezclas estudiadas para los 28 días de curado. Lo anterior indica que es posible utilizar una ecuación de correlación y este factor único para predecir la resistencia a la tracción por ensayo SCB a partir de la resistencia a compresión del hormigón.

- Se obtuvieron ecuaciones de correlación entre la resistencia a la flexión por viga y la resistencia a la tracción por ensayo SCB de la forma logarítmica. Estas ecuaciones permiten estimar la propiedad de la resistencia a la flexión mediante la resistencia a la tracción por SCB del hormigón. Se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de 0,75 y 0,64 para los hormigones fabricados con las granulometrías G1 y G2 respectivamente, indicando correlaciones positivas y negativas, fuerte y media. En el caso de los hormigones con granulometría G2, los valores predichos presentan porcentajes de error superiores al 24%, representando diferencias de hasta 1,94 MPa respecto del valor experimental, y para los hormigones con granulometría G1, los valores predichos presentan porcentajes de error superiores a 35%, representando diferencias de 2,58 MPa. También se obtuvo un coeficiente único para realizar la conversión de las propiedades de resistencia, obteniendo un valor de 0.85 cuando se tienen en cuenta ambas mezclas estudiadas. Con este factor único se obtienen porcentajes de error menores a los obtenidos por las ecuaciones de correlación individual para cada una de las mezclas estudiadas para los 28 días de curado. Lo anterior indica que es posible utilizar este factor único para predecir la resistencia a la flexión de vigas a partir de la resistencia a tracción por ensayo SCB del hormigón.
- Los resultados muestran que la resistencia a la compresión aumenta con la edad de ensayo de los especímenes para las dos mezclas de estudio. Las mezclas con la granulometría tipo G1 obtuvo mayores resistencias que las mezclas con la granulometría G2. Esto se esperaba ya que la mezcla G1 cumple con la optimización propuesta por Shilstone. No obstante, las resistencias de las dos mezclas a los 28 días fueron superiores a la resistencia especificada en el diseño (35 MPa) lo que podría deberse al uso de un cemento de alta resistencia no contemplado en el procedimiento de diseño de la mezcla, de la misma forma la resistencia a la flexo-tracción por viga y tracción por SCB, muestran un mejor resultado para la granulometría optimizada G1, cumpliendo el objetivo principal de demostrar que la granulometría optimizada tiene mejores propiedades mecánicas que la granulometría no optimizada G2.

5.2. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS:

- Este trabajo se puede complementar con el estudio de otros métodos de optimización reportados en la literatura y compararlos con los obtenidos en esta investigación. De esta forma, se podrá conocer si alguno de los métodos de optimización de la granulometría para

la fabricación de un hormigón es más adecuado para obtener mejores desempeños estructurales.

- Incluir granulometrías propuestas en normativas de otros países para la fabricación de hormigones para pavimentos y recomendar mejores opciones para obtener buenos desempeños del material, adecuados al interés requerido.
- Se recomienda aumentar la matriz de ensayos para lograr datos estadísticamente más representativos que permitan obtener conclusiones más robustas y un análisis estadístico más profundo.

BIBLIOGRAFIA

- Abdulkareem, B. (1991). Optimization of aggregate gradation and Concrete maturity (Tesis para optar el título de Ingeniero). Baghdad University, Baghdad, Iraq.
- ACI Committee 302, 2004, "Guide for concrete floor and slab construction (ACI 302.1R-04)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 77 pp.
- ACI Committee 211, 2002, "Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete (ACI 211.3R-02)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 26 pp.
- Agustín, P. J. (2012). Optimización del esqueleto granular mediante la utilización del método de superficie de respuestas (MSR). Diseño de mezclas. (Tesis para optar el título de Arquitecto). Escuela de arquitectura e ingeniería de edificaciones, Universidad Politecnica de Cartagena, Colombia.
- Correa, D. C. (2011). Dosificación ponderal para hormigones de alta y baja densidad. (Tesis para optar el título de Magister). Escuela técnica superior de ingeniería de caminos, canales y puertos de Barcelona, Universidad Politecnica de Catalunya, España.
- Covarrubias, J.P. Guía de diseño estructural de pavimentos delgados con fibra para caminos de bajo volumen de tránsito. TCPavements. 2015.
- Cramer, S. M., M. Hall and J. Parry (1995). "Effect of Optimized Total Aggregate Gradation on Portland Cement Concrete for Wisconsin Pavements." Transportation Research Record 1478: 100-106.
- EHE (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural" Comisión permanente. Ministerio de la Presidencia. B.O.E. Madrid.
- ICPA – Instituto del Cemento Portland Argentino. (2014) Manual de diseño y construcción de pavimentos de hormigón, ISBN 978-950-677-003-7, Buenos Aires, Argentina, (2014).
- KansasDOT (2004). "Aggregates for Concrete, Special Provisions, Section 1102." 10.
- Larrain, B. A. (2019). Análisis anova del efecto de la granulometría dentro del grafico de shilstone en el desempeño global de los pavimentos de hormigón. (Tesis para optar el título de Ingeniero). Departamento de obras civiles, Universidad técnica Federico Santa Maria, Chile.
- Lafrenz, J. L. (2001). Material Selections to Minimize Early Cracking Of Concrete
- Pavement Panels. 2001 Missouri Concrete Conference, Rolla, Missouri.
- 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.

- National Ready Mixed Concrete Association, N. (2000). CIP 16- Flexural Strength Concrete. The Concrete in Practice Series (CIP), 102(1), 2. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- NCh164.Of2009 – Áridos para morteros y hormigones – Extracción y preparación de muestra.
- NCh170.Of2016 – Hormigón – Requisitos generales.
- 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.
- NCh1019.Of2009 – Construcción – Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento de cono de Abrams.
- NCh1037.Of2009 – Hormigón – Ensayo de compresión en probetas cúbicas y cilíndricas.
- Olek, A. R. (2012). Optimization of Mixture Proportions for Concrete Pavements - Influence of Supplementary Cementitious Materials, Paste Content and Aggregate Gradation. Joint Transportation Research Program, 1-64.
- Ramakrishnan, V (2004). Optimized Aggregate Gradation For Structural Concrete. South Dakota. Department of Transportation. Department of Civil & Environmental Engineering.
- Richardson, D. N. (2005). Aggregate gradation optimization literatura search. U. S. Department of Transportation. University of Missouri-Rolla.
- Shilstone, J. M. (1990). "Concrete Mixture Optimization." Concrete International 12(6): 33-39.
- Shilstone, J. M. (1990). Mixture Optimization for Fast-Track. 69th Annual Transportation Research Board Meeting, Washington, D.C.
- Shilstone Sr, J., & Shilstone Jr, J. (2002). Performance - Based Concrete Mixtures and Specifications for Today. Concrete International, 80-83.
- Soto J. (2019). Investigación de laboratorio para estimar la resistencia a la flexotracción de un hormigón para pavimento y su correlación con la resistencia a compresión (Tesis para optar al título de Magíster en Construcción). Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Taylor P, P. (2012). Concrete Pavement Mixture Design and Analysis (MDA). National Concrete Pavement Technology Center, 1-86.

- USAF (1997). United States Air Force Guide Specification, Military Airfield Construction, Rigid Airfield Pavement Surface. U. S. A. Force: 1-33.

ANEXOS

ANEXO 1: ELECCION DE LA GRANULOMETRIA

A. Selección de la Granulometría

Para la selección de los agregados, se tomó como referencia inicial las granulometrías recomendadas por el manual de carreteras de Chile versión 2018. Para las arenas se selecciono dos tipos de arenas una arena muy gruesa y arena media o gruesa. Ver la Tabla A.1 y Tabla A.2.

Tabla A.1: Granulometría agregado fino muy grueso

PESO INICIAL 1020.0 g.

MALLAS		PESO RETENIDO	%	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
PULGADAS	MILIMETROS				
3/8"	10.000		0.0	0.0	100.0
Nº4	5.000	357	35.0	35.0	65.0
Nº8	2.500	204	20.0	55.0	45.0
Nº16	1.250	66.3	6.5	61.5	38.5
Nº30	0.630	112.2	11.0	72.5	27.5
Nº50	0.315	112.2	11.0	83.5	16.5
Nº100	0.160	102	10.0	93.5	6.5
FONDO	0.000	66.3	6.5	100.0	0.0
MODULO DE FINEZA					4.0

Tabla A.2: Granulometría agregado fino media gruesa

PESO INICIAL 1020.0 g.

MALLAS		PESO RETENIDO	%	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
PULGADAS	MILIMETROS				
3/8"	10.000		0.0	0.0	100.0
Nº4	5.000	204	20.0	20.0	80.0
Nº8	2.500	204	20.0	40.0	60.0
Nº16	1.250	51	5.0	45.0	55.0
Nº30	0.630	51	5.0	50.0	50.0
Nº50	0.315	193.8	19.0	69.0	31.0
Nº100	0.160	219.30	21.5	90.5	9.5
FONDO	0.000	96.90	9.5	100.0	0.0
MODULO DE FINEZA					3.1

Para la selección del agregado grueso se utiliza un agregado con tamaño máximo nominal 3/4", se tomó como referencia inicial las granulometrías recomendadas por el manual de carreteras de Chile versión 2018. Ver la Tabla A.3

Tabla A.3: Granulometría agregado fino media gruesa

PESO INICIAL		935.0		g.	
MALLAS		PESO	%	% RETENIDO	% QUE PASA
PULGADAS	MM	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	
2"	50.00		0.00	0.00	0.00
1 1/2"	37.50		0.00	0.00	0.00
1"	25.00		0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	46.75	5.00	5.00	95.00
1/2"	12.50	163.63	17.50	22.50	77.50
3/8"	9.50	374.00	40.00	62.50	37.50
Nº 4	4.75	280.50	30.00	92.50	7.50
*Nº 8	2.36	46.75	5.00	97.50	2.50
FONDO		23.38	2.50	100.00	0.00
				T.M.N.	3/4"

A partir de estas granulometrías recomendadas por el manual de carreteras, que se tomaron como referencia inicial combinaremos los agregados, considerando una granulometría optimizada que cumpla los requisitos que establece la metodología Shilstone como muestra la tabla A.4 y otra granulometría no optimizada como se muestra en la tabla A.5.

Tabla A.4: Granulometría combinada G1

PESO INICIAL		935.0		g.		PESO INICIAL		1020.0		g.	
PESO COMBINADO		1955.0									
PULGADAS	MILIMETROS	PESO		%RETENIDO	% RETENIDO		% QUE PASA				
		RETENIDO			ACUMULADO						
1 1/2"	37.50			0.00	0.00	100					
1"	25.00			0.00	0.00	100					
3/4"	19.00	48.9		2.50	2.50	97.5					
1/2"	12.50	371.5		19.00	21.50	78.5					
3/8"	10.00	283.5		14.50	36.00	64					
Nº4	5.00	406.6		20.80	56.80	43.2					
Nº8	2.50	351.9		18.00	74.80	25.2					
Nº16	1.25	97.8		5.00	79.80	20.2					
Nº30	0.63	156.4		8.00	87.80	12.2					
Nº50	0.32	160.3		8.20	96.00	4					

N°100	0.16	48.9	2.50	98.50	1.5
Fondo	0.08	29.3	1.50	100.00	0
MODULO DE FINEZA					5.5

Tabla A.5: Granulometría combinada G2

PESO INICIAL g. PESO INICIAL g.

PESO COMBINADO		1955.0			
PULGADAS	mm	PESO	%RETENIDO	% RETENIDO	% QUE PASA
		RETENIDO		ACUMULADO	
1 1/2"	37.50		0.00	0.00	100
1"	25.00		0.00	0.00	100
3/4"	19.00	68.4	3.50	3.50	96.5
1/2"	12.50	410.6	21.00	24.50	75.5
3/8"	10.00	308.7	15.79	40.29	59.71
N°4	5.00	195.5	10.00	50.29	49.71
N°8	2.50	287.4	14.70	64.99	35.01
N°16	1.25	225.0	11.51	76.50	23.5
N°30	0.63	176.0	9.00	85.50	14.5
N°50	0.32	215.1	11.00	96.50	3.5
N°100	0.16	39.1	2.00	98.50	1.5
Fondo	0.08	29.3	1.50	100.00	0
MODULO DE FINEZA					5.4

Según lo visualizado de resumen en las tablas 4.2 y 4.3 del capítulo 4, con estos factores podemos determinar si una granulometría es optimizada o no en esta investigación.

TABLA 4.2: Calculo de Factor de Rugosidad

Granulometría	% retenido acumulado tamiz 3/8"	% retenido acumulado tamiz N° 8	Factor de rugosidad
G1	36,00	74,80	48,13
G2	40,29	64,99	61,99

Tabla 4.3: Cálculo del Factor de trabajabilidad para las granulometrías de estudio

Granulometría	Factor de trabajabilidad (FT)
G1	$FT = 25.20 + 2.5(480 - 335)/43 = 33.63$
G2	$FT = 35.01 + 2.5(480 - 335)/43 = 43.44$

(*) Para ambas granulometrías se consideró una cantidad de cemento de 480 kg/m³

ANEXO 2: PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

B. Propiedades y características del ensayo de los agregados

El diseño de mezcla de esta investigación se realizó con la metodología del ACI, teniendo en cuenta algunas consideraciones del manual de carreteras Chile 2018, para pavimentos de hormigón.

B.1. Ensayo del Agregado grueso

Se toma una muestra de árido seco de masa y es separada por medio de una serie de tamices de aberturas progresivas menores, determinando el tamaño de las partículas y sus porcentajes parciales retenido y expresar las granulometrías en función del porcentaje que pasa. La cantidad de árido grueso superior a 4 kg cuando su tamaño máximo absoluto sea igual o inferior a 40 mm, según la NCh1117-EOF77.

Finalmente se Consignó una muestra de 5.063 gr para esta investigación, sacar la muestra en una bandeja en el horno por 24 horas a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Se pesa la muestra seca al siguiente día. Este ensayo nos permite saber el peso específico del agregado grueso. Además, comparar el peso de agregado seco y saturado de agua para así saber el porcentaje de absorción de agua que tiene el agregado grueso.

Datos obtenidos de ensayos hechos en el laboratorio con dos números de muestras (A y B)

- Peso tara = 5.063 gr
- Volumen tara = 5.110 cc

- **Peso suelto**
A = 12.460 kg
B= 12.456 kg

- **Peso Compactada (P.C)**
A = 13.161 kg
B= 13.139 kg

- **Peso Sumergido (P.S)**
A = 2.955 kg
B= 3.0793 kg

- **Peso Seco horno (P.S.Horno)**
A = 4.750 kg
B= 4.944 kg

- **Peso Suelto saturado (P.S.Saturado)**

$$A = 4.851 \text{ kg}$$

$$B = 5.054 \text{ kg}$$

- **Peso Húmedo (P.Humedo)**

$$A = 4.805 \text{ kg}$$

$$B = 4.980 \text{ kg}$$

B.2.1. Densidad neta

se considera el volumen macizo de las partículas más el volumen de los poros inaccesibles (Cerrados), para determinar la densidad neta se debe tomar en cuenta el estado de saturación y superficie seca.

$$Dn = \frac{P. S. Horno}{(P. S. Horno - P. Sumergido)}$$

a) $Dn = 2.6462 \text{ gr/cc}$

b) $Dn = 2.6509 \text{ gr/cc}$

c) Promedio = $2.6485 \text{ gr/cc} \approx 2648 \text{ kg/m}^3$

B.2.2. Peso unitario suelto seco

El peso volumétrico de un agregado es el peso que alcanza un determinado volumen unitario. Nos permite determinar el rendimiento de las mezclas, contenido de aire, y es un indicador del peso unitario del concreto endurecido.

1- Se determina el peso y el volumen del molde.

2- Se coloca la piedra en el molde sin compactar.

3- Una vez lleno el molde se enrasa la superficie con las varillas.

4- Pesar el molde contenido con piedra.

Donde:

$$P. U. S. S = \frac{P. Suelto}{Volumen de la tara}$$

a) $P. U. S. S = 2.438 \text{ gr/cc}$

b) $P. U. S. S = 2.438 \text{ gr/cc}$

c) Promedio = $2.438 \text{ gr/cc} \approx 2438 \text{ kg/m}^3$

B.2.3. Peso unitario compactado seco

- 1- Se determina el peso y el volumen del molde.
- 2- Se coloca la piedra en el molde sin compactar.
- 3- Una vez lleno el molde se enrasa la superficie con las varillas.
- 4- Pesarse el molde contenido con piedra.

Donde:

$$\underline{P.U.C.S} = \frac{\text{P. Compactada}}{\text{Volumen de la tara}}$$

- a) P.U.C.S = 2.576 gr/cc
- b) P.U.C.S = 2.571 gr/cc
- c) Promedio = 2.573 gr/cc \approx 2573 kg/m³

B.2.4. % Absorción

Masa de agua necesaria para llevar un material pétreo del estado seco al estado saturado superficialmente seco, y es una medida de la porosidad del mismo.

Para ello debe pesarse el material en estado seco y luego sumergirlo en agua 24 horas para obtener estado s.s.s. Se determina la absorción por diferencia de peso, llevado a porcentaje.

Donde:

$$A(\%) = \frac{(\text{P. S. S. Saturado} - \text{P. S. Horno})}{\text{P. S. Horno}} \times 100$$

- a) A(%) = 2.126
- b) A(%) = 2.225
- c) Promedio = 2.176 %

B.2.5. % Humedad

Peso húmedo de la muestra pétreo natural, con respecto al material en estado seco al horno. Se determina la humedad por diferencia de peso, llevado a porcentaje.

Donde:

$$H(\%) = \frac{(\text{P. Húmedo} - \text{P. S. Horno})}{\text{P. S. Horno}} \times 100$$

- a) H (%) = 1.158

- b) $H (\%) = 0.728$
 c) Promedio = 0.728 %

B.2. Ensayo de Agregado fino

El módulo de fineza (MF) es un índice de la fineza del agregado, entre mayor sea el módulo de fineza, más grueso será el agregado. El MF del agregado grueso o del agregado fino se obtiene conforme a la norma ASTM C 125 sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100.

Tabla B.1: Granulometría Combinada Modulo de Fineza G1 y G2

MODULO DE FINEZA COMBINADA G1			
PULGADAS	%RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1 1/2"	0.00	0.00	100
1"	0.00	0.00	100
3/4"	2.50	2.50	97.5
1/2"	19.00	21.50	78.5
3/8"	14.50	36.00	64
Nº4	20.80	56.80	43.2
Nº8	18.00	74.80	25.2
Nº16	5.00	79.80	20.2
Nº30	8.00	87.80	12.2
Nº50	8.20	96.00	4
Nº100	2.50	98.50	1.5
Fondo	1.50	100.00	0
MODULO DE FINEZA			5.5

MODULO DE FINEZA COMBINADA G2			
PULGADAS	%RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1 1/2"	0.00	0.00	100
1"	0.00	0.00	100
3/4"	3.50	3.50	96.5
1/2"	21.00	24.50	75.5
3/8"	15.79	40.29	59.71
Nº4	10.00	50.29	49.71
Nº8	14.70	64.99	35.01
Nº16	11.51	76.50	23.5
Nº30	9.00	85.50	14.5
Nº50	11.00	96.50	3.5
Nº100	2.00	98.50	1.5
Fondo	1.50	100.00	0
MODULO DE FINEZA			5.4

Procedimiento de ensayo

Después, se introduce 200 gr del agregado fino en estado SSS en el matraz ("pipeta") para luego llenarlo de agua hasta el 90% de su capacidad calibrada. Se realiza movimientos al matraz con el fin de que se expulse las burbujas de aire atrapado. Para pesarlo, el nivel del agua debe alcanzar la línea calibrada. Finalmente, se extrae todas las partículas y el agua a una bandeja para colocarlo en el horno 24 horas a $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Se pesa la muestra seca al siguiente día. Este ensayo nos permite saber el peso específico del agregado fino. Además, comparar el peso de agregado seco y saturado de agua para así saber el porcentaje de absorción de agua que tiene el agregado fino.

Datos obtenidos de ensayos hechos en el laboratorio con dos números de muestras (A y B)

B.2.1. Densidad aparente

Peso = 1678 gr
Volumen = 962 cc

2.- Peso suelto

A= 3151 gr
B =3160 gr

3.- Peso compactado

A= 3277 gr
B =3277 gr

4.- Peso saturado superficial seco (P.S.S.S)

A= 200 gr
B =200 gr

5.- Peso seco al horno (P.S.H)

A= 196.30 gr
B =196.20 gr

6.- Peso húmedo

A= 201.24 gr
B =201.14 gr

7.- Peso sumergido

Densidad real
A= 196.30 gr
B =196.20 gr

Matraz + Agua

A= 657.40 gr
B =659.40 gr

P.S: $(P.S.S.S / (\text{Matraz} + \text{agua} + P.S.S.S - \text{densidad real}) \times 1000$

A= 657.40 gr
B =659.40 gr

(*) Con estos datos obtenidos se procede a calcular las siguientes propiedades de la arena:

B.2.2. Peso específico

Es la relación entre el peso y el volumen del material sólido. Para determinar el peso específico o la densidad se debe tomar en cuenta el estado de saturación y la superficie seca.

Donde:

$$V. S. S. S = (P. S. S. Horno + (Matraz + agua) - Densidad real$$

- a) V.s.s.s= 72.50 gr
- b) V.s.s.s= 72.60 gr
- c) Promedio = 72.55 gr

Donde el peso específico:

$$P. E = \frac{P. S. Horno}{(V. s. s. s)}$$

- a) P.E = 2.7076 gr
- b) P.E = 2.7025 gr
- c) Promedio = 2.7050 gr

B.2.3. Peso unitario suelto seco (p.u.s.s)

El peso volumétrico de un agregado es el peso que alcanza un determinado volumen unitario. Nos permite determinar el rendimiento de las mezclas, contenido de aire, y es un indicador del peso unitario del concreto endurecido.

- 1- Se determina el peso y el volumen del molde.
- 2- Se coloca la arena en el molde sin compactar.
- 3- Una vez lleno el molde se enrasa la superficie con las varillas.
- 4- Pesar el molde contenido con arena.

Donde:

$$P. U. S. S = \frac{P. Suelto}{Volumen de la tara}$$

- a) P.U.S.S= 2.438 gr/cc
- b) P.U.S.S= 2.438 gr/cc
- c) Promedio = 2.438 gr/cc \approx 2438 kg/m³

B.2.4. Peso unitario compactado seco

- 1- Se determina el peso y el volumen del molde.
- 2- Colocar la arena en tres capas.
- 3- En cada capa se empareja con la mano y se apisona con 25 golpes con la varilla de 5/8 distribuida de manera uniforme.
- 4- Una vez que esté lleno el molde se enrasa la superficie con la varilla.
- 5- Pesar el molde con arena compactada.

Donde:

$$P.U.C.S = \frac{P. Compactada}{Volumen de la tara}$$

- d) P.U.C.S= 3.406 gr/cc
- e) P.U.C.S= 3.406 gr/cc
- f) Promedio = 3.406 gr/cc \approx 3406 kg/m³

B.2.5. % Absorción

Masa de agua necesaria para llevar un material pétreo del estado seco al estado saturado superficialmente seco, y es una medida de la porosidad del mismo.

Para ello debe pesarse el material en estado seco y luego sumergirlo en agua 24 horas para obtener estado s.s.s. Se determina la absorción por diferencia de peso, llevado a porcentaje.

Donde:

$$A(\%) = \frac{(P. S. S. Saturado - P. S. Horno)}{P. S. Horno} \times 100$$

- d) A(%) = 1.885
- e) A(%) = 1.937
- f) Promedio = 1.911 %

B.2.6. % Humedad

Peso húmedo de la muestra pétreo natural, con respecto al material en estado seco al horno. Se determina la humedad por diferencia de peso, llevado a porcentaje.

Donde:

$$H(\%) = \frac{(P. Humedo - P. S. Horno)}{P. S. Horno} \times 100$$

- g) H (%) = 1.070
- h) H (%) = 1.070
- i) Promedio = 1.070 %

ANEXO 3 : DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN POR EL MÉTODO DE LA ACI

C. Método de diseño de las mezclas de hormigón

Para este método se utilizaron los parámetros y especificaciones de la NCh 163-2013 y NCh 170-2016 respecto a los agregados, para la elaboración del diseño de mezclas se optó por utilizar la norma internacional del ACI para el estudio de la granulometría combinada optimizada estableciendo las pautas para la fabricación de hormigones con resistencia a la compresión, cabe resalta que el diseño de mezcla de la NCh utiliza un factor de seguridad del 20%, mientras que la norma del ACI utiliza un factor de seguridad empírica, como se muestra en la Tabla C.1.

Tabla C.1: Factor de seguridad, ASTM-C33

F'C	F'cr
Menos de 210	F'C + 70
210 – 350	F'C + 84
>350	F'C + 98

(*) Considerando un G35 mínimo para pavimentos según la especificación del manual de carreteras de Chile con una resistencia a la compresión 350 kg/cm².

C.1. Cálculo F'cr (resistencia promedio requerida)

$$F'_{cr} = F'_c + F_s$$

$$F'_{cr} = 350 + 84$$

$$F'_{cr} = 434 \text{ kg/cm}^2$$

C.2. Cantidad de agua sin aire incorporado, para TMN de agregados y consistencia indicada en la tabla C.2.

Tabla C.2: Volumen De Agua por m³

Asentamiento	Agua en Lt/m ³ , Para TMN Agregados y Consistencia Indicadas							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	--

Concreto Con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	187	184	174	166	154	--

De lo cual se selecciona según su tamaño máximo nominal, que se desea diseñar:

TMN: 3/4", Asentamiento 1" – 2"

Agua = 190 L/m ³

C.3. Relación agua cemento R a/c

F'cr= 434 kg/cm² y utilizar la tabla # 11 e interpolar

Tabla C.3: Relación Agua/Cemento Por Resistencia

F'c Kg/cm ²	Relación a/c en peso	
	Concreto sin Aire Incorporado	Concreto Con Aire Incorporado
150	0.8	0.71
200	0.7	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.4
400	0.43	--
450	0.38	--

[	400		0.43]
[	434		x]
[	450		0.38]
x=	0.396			
R a/c =	0.396			

C.4. Cantidad de cemento

$$R a/c = A/C$$

$$C=190/0.396$$

$$C=479.79 \text{ Kg}$$

Cantidad de Cemento = 479.79 Kg.

C.5. Cantidad A. grueso

Módulo de Fineza del agregado fino, pero se está utilizando un material combinado en la cual esta ocasión tomaremos el MF, de la granulometría combinada.

Mf= 5.4 (interpolar)

[	5.20		0.38]
[	5.4		x]
[	5.60		0.34]
	X=	0.36		
	V=	0.36		

P.U.S.S= PESO/VOLUMEN

PESO= 0.36x 2573

PESO A. GRUESO = 926.418 kg

C.6. Cantidad de Agregado Fino

Volumen absoluto

Cemento = 479.79 kg/(3.15 gr/cm³ x1000) = 0.1523 m³

Agua = 190 kg/(1x1000 kg/cm³) = 0.19 m³

Aire= 2.0/100 = 0.00 m³

A. grueso = 926.418 kg/(2.646 gr/cm³x1000) = 0.3501 m³

0.694 m³

V.A. FINO = 1m³ – 0.694 m³

V.A. FINO = 0.3076 m³

C.7. Peso A. FINO

P.U.S.S = PESO/VOLUMEN

P= 3280.146 kg/m³ X 0.2878 m³

P= 1008.95 Kg

C.8. Preparación del diseño en estado Seco “Diseño Teórico”

Cemento = 479.79 kg
 Agua = 190 lts
 A. fino = 1008.95 kg
 A. grueso = 926.419 kg

C.9. Corrección por humeado de los agregados

C.10.

A. Grueso = $926.419 \times (1+(\%H/100)) = 935.155$

A. Fino = $943.351 \times (1+(\%H/100)) = 1019.751$

C.11. Agua Efectiva

A. Grueso y A. Fino = Peso en estado seco $\times (1+(\%H/100))$

A. Grueso = $926.419 \times (1+(\%H/100)) = -11.419$

A. Fino = $943.351 \times (1+(\%H/100)) = -8.483$

A. aparente = -19.920

A.E = (A.DISEÑO) \pm A.APARENTE

A.E = $190 - (-19.35)$

A.E= 210 L

C.12. Preparación del diseño en estado Húmedo “Diseño Teórico”

Cemento = 480 kg
 Agua = 210 lts
 A. fino = 1020 kg
 A. grueso = 935 kg

C.13. Dosificación

CEMENTO	A. FINO	A. GRUESO	AGUA
480/480	1020/480	935/480	209/11.28
1	2.13	1.95	18.59

ANEXO 4 : RESULTADO DE MAGNITUDES DE RESISTENCIAS

D.1. RESULTADOS COMPRESION DE PROBETAS CILINDRICAS DE HORMIGONES

Tabla D.1: Resultados de las resistencias a la compresión en probetas Cilíndricas

Nº	Decon UC	Edad	Peso (kg)	Carga (KN)	Carga MN	d1 (mm)	d2 (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	Área (m2)	Presión (MPa)
1	G1	7	12.53	739.00	0.74	151.00	151.00	303.0	300.0	0.02	41.3
2	G1	7	12.58	709.00	0.71	150.00	150.00	300.0	300.0	0.02	40.1
3	G1	7	12.66	713.00	0.71	150.00	150.00	300.0	300.0	0.02	40.3
											40.6

1	G2	7	12.65	717.00	0.72	150.00	150.00	300.0	300.0	0.02	40.6
2	G2	7	13.17	732.00	0.73	152.00	152.00	307.0	307.0	0.02	40.3
3	G2	7	12.59	711.00	0.71	151.00	151.00	300.0	300.0	0.02	39.7
											40.2

Nº	Decon UC	Edad	Peso (kg)	Carga (KN)	Carga MN	d1 (mm)	d2 (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	Área (m2)	Presión (MPa)
1	G1	14	12.59	758.00	0.76	150.00	150.00	290.0	290.0	0.02	42.9
2	G1	14	12.63	773.00	0.77	150.00	150.00	300.0	300.0	0.02	43.7
3	G1	14	12.66	813.00	0.81	149.00	149.00	300.0	300.0	0.02	46.6
											44.4

1	G2	14	12.64	727.00	0.73	150.00	150.00	300.0	300.0	0.02	41.1
2	G2	14	12.61	701.00	0.70	149.00	149.00	300.0	300.0	0.02	40.2
3	G2	14	12.70	771.00	0.77	150.00	150.00	300.0	300.0	0.02	43.6
											41.7

Nº	Decon UC	Edad	Peso (kg)	Carga (KN)	Carga MN	d1 (mm)	d2 (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	Área (m2)	Presión (MPa)
1	G1	28	13.25	837.00	0.84	152.00	152.00	305.0	305.0	0.02	46.13
2	G1	28	12.61	903.00	0.90	150.00	150.00	305.0	305.0	0.02	51.10
3	G1	28	12.73	940.00	0.94	150.00	150.00	300.0	300.0	0.02	53.19
											50.1

1	G2	28	12.66	833.00	0.83	150.00	150.00	300.0	300.0	0.02	47.14
2	G2	28	12.60	724.00	0.72	151.00	151.00	300.0	300.0	0.02	40.43
3	G2	28	12.77	820.00	0.82	150.00	150.00	300.0	300.0	0.02	46.40
											44.7

D.2.RESULTADOS FLEJO- TRACCIÓN POR VIGA DE HORMIGONES

Tabla D.2: Resultados de las resistencias a la flexo-tracción por viga

Nº	Edad	Peso (kg)	Ancho (mm)	Base (mm)	Altura (mm)	KN	Área	Mpa
G1	7	29.92	154	548	150	39.7	6302.87	6.30
			152	548	151			
G2	7	30.24	151	552	151	33.7	6231.31	5.41
			153	553	151			

Nº	Edad	Peso (kg)	Ancho (mm)	Base (mm)	Altura (mm)	KN	Área	Mpa
G1	14	30.06	153	552	151	45.27	6257.47	7.23
			152	552	151			
G2	14	30.22	154	548	151	45.27	6344.48	7.14
			153	548	151			

Nº	Edad	Peso (kg)	Ancho (mm)	Base (mm)	Altura (mm)	KN	Área	Mpa
G1	28	29.98	153	549	150	47.36	6229.71	7.60
			150	549	151			
G2	28	30.54	152	551	152	46.19	6283.95	7.35
			152	552	152			

Granulometría Optimizada			
Nº	Decon UC	Edad	Presión (MPa), Promedio
1	G1	7	6.30
2	G1	14	7.23
3	G1	28	7.60

Granulometría no Optimizada			
Nº	Decon UC	Edad	Presión (MPa), Promedio
1	G2	7	5.41
2	G2	14	7.14
3	G2	28	7.35

D.3. RESULTADOS TRACCIÓN POR ENSAYO SCB DE HORMIGONES

Tabla D.3: Resultados de las resistencias a la tracción por ensayo SCB

G1	7 DIAS							
	Nº	Peso (kg)	Ancho (mm)	Base (mm)	Altura (mm)	Kgf	N	MPa
	1	0.989	50	150	72.4	787	8025.04	4.56
	2	1.025	50	150	73.5	754	7688.54	4.37
	3	1.006	50	150	73	894	9116.12	5.18
	4	1.015	50	150	73.3	943	9615.77	5.47
	5	1.071	52	150	74.4	891	9085.53	4.97
	6	1.025	52	150	71	935	9534.20	5.21
	7	0.979	50	150	73	1025	10451.93	5.94

G2	7 DIAS							
	Nº	Peso (kg)	Ancho (mm)	Base (mm)	Altura (mm)	Kgf	N	MPa
	1	0.994	49	150	74	1101	11226.90	6.51
	2	0.997	49	150	73.4	1030	10502.91	6.09
	3	0.996	48	150	76	859	8759.22	5.19
	4	0.946	48	150	72	788	8035.24	4.76
	5	1.001	50	150	72	997	10166.41	5.78
	6	1.025	50	150	74	1006	10258.18	5.83
	7	0.98	48	150	73.2	671	6842.19	4.05

8	1.027	50	150	74	1030	10502.91	5.97
9	0.954	48	150	74	1006	10258.18	6.07
10	0.948	48	150	73	958	9768.73	5.78
PROMEDIO							5.35

8	0.969	48	150	73.3	670	6831.99	4.05
9	0.966	48	150	73.5	825	8412.53	4.98
10	0.981	48	150	74	747	7617.16	4.51
PROMEDIO							5.17

G1	14 DIAS						
Nº	Peso (kg)	Ancho (mm)	Base (mm)	Altura (mm)	Kgf	N	MPa
1	1.039	50	150	73.2	1135	11573.60	6.58
2	1.076	51	150	74.2	970	9891.09	5.51
3	1.023	50	150	74.4	953	9717.74	5.52
4	1.01	50	150	74	1017	10370.35	5.89
5	0.992	49.3	150	73.4	1071	10920.99	6.30
6	0.998	49.2	150	73.5	911	9289.47	5.37
7	1.029	50.4	150	73.4	1011	10309.17	5.81
8	1.021	50	150	74	983	10023.65	5.70
9	1.028	51.5	150	72.2	944	9625.97	5.31
10	1.065	51.2	150	74.5	936	9544.39	5.30
PROMEDIO							5.73

G2	14 DIAS						
Nº	Peso (kg)	Ancho (mm)	Base (mm)	Altura (mm)	Kgf	N	MPa
1	0.907	45	150	74	722	7362.23	4.65
2	0.911	45	150	73	899	9167.10	5.79
3	0.955	49	150	74.2	849	8657.25	5.02
4	0.999	49	150	75	1058	10788.43	6.26
5	1.027	50.5	150	75	655	6679.04	5.50
6	1.015	50.5	150	72.2	702	7158.29	5.50
7	1.037	50.7	150	75	877	8942.77	5.01
8	1.016	50.7	150	73.7	881	8983.56	5.04
9	1.076	50	150	73	1081	11022.96	6.27
10	1.142	50	150	73.5	1078	10992.37	6.25
PROMEDIO							5.53

G1	28 DIAS						
Nº	Peso (kg)	Ancho (mm)	Base (mm)	Altura (mm)	Kgf	N	MPa
1	1.026	50.4	150	73	1120	11420.64	6.44
2	1.052	51	150	74	1119	11410.44	6.36
3	0.981	48	150	74	1106	11277.88	6.68
4	0.975	47.4	150	73	1057	10778.23	6.46
5	1.003	49	150	74	1154	11767.34	6.83

G2	28 DIAS						
Nº	Peso (kg)	Ancho (mm)	Base (mm)	Altura (mm)	Kgf	N	MPa
1	0.996	49	150	73	1149	11716.35	6.80
2	0.979	49	150	73	1233	12572.90	7.29
3	0.972	48	150	74.4	1089	11104.53	6.57
4	0.937	47	150	74	1004	10237.79	6.19
5	1.019	51.3	150	72.4	1115	11369.66	6.30

6	0.992	49	150	73	1179	12022.26	6.97
7	1.001	49	150	73.4	1352	13786.34	8.00
8	0.988	49	150	73.4	1127	11492.02	6.67
9	1.049	50	150	75	1133	11553.20	6.57
10	1.014	50.4	150	71.5	1089	11104.53	6.26
PROMEDIO							6.72

6	1.058	51.5	150	73.5	986	10054.24	5.55
7	0.978	49	150	72.5	939	9574.98	5.55
8	0.987	49	150	74	1168	11910.10	6.91
9	1.043	51	150	74	1064	10849.61	6.05
10	1.005	51	150	72.2	994	10135.82	5.65
PROMEDIO							6.29