

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA DE AGREGADOS
ADICIONADOS CON EL 3.5, 4.5 Y 5.5% DE LIMALLA FINA, PARA LAS
MEZCLAS DE CONCRETO.**

**ELIECER BELTRÁN CASTILLO
VICTOR HUGO ORTIZ ARIZA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA DE AGREGADOS
ADICIONADOS CON EL 3.5, 4.5 Y 5.5% DE LIMALLA FINA, PARA LAS
MEZCLAS DE CONCRETO.**

**ELIECER BELTRÁN CASTILLO
VICTOR HUGO ORTIZ ARIZA**

**Tesis de grado como requisito para optar
al título de Ingenieros Civiles**

**Director:
CLAUDIA PATRICIA RETAMOSO LLAMAS
M.I.C. Ingeniera Civil**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Septiembre de 2010.

*A Dios por ser la fuente de
sabiduría y amor en mi diario
vivir.*

*A mis padres Alba Marina y Enrique
Alberto, por todos sus esfuerzos,
dedicación, orientación y entera
confianza.*

*A mis hermanos Germán Enrique y
Beto, por ser mis mejores amigos y
por su incondicionalidad.*

*A mi abuela Roselia, por su gran
amor y por sus valiosos consejos.*

*A toda mi familia por su gran
apoyo.*

ELIÉCER BELTRÁN CASTILLO

A Dios nuestro señor por llenarme de salud y permitirme llegar hasta este punto de mi vida donde no se acaba un sueño, si no por el contrario comienza el recorrido de un sendero lleno de nuevas enseñanzas y nuevas experiencias.

*A mis padres **Martha Cecilia Ariza Sánchez y Víctor Hugo Ortiz Silva***

Por brindarme su amor, su apoyo incondicional en cada momento de mi vida, por haberme dado la oportunidad de estudiar, y sobre todo por haberme inculcado valores y enseñarme a no decaer ante situaciones difíciles.

*A mis hermanos **Luis Fernando y***

***Carlos Eduardo** Por estar siempre acompañándome y apoyándome en mi proceso formativo, llenándome de ganas por cumplir una a una todas mis metas.*

VICTOR HUGO ORTÍZ ARIZA

AGRADECIMIENTOS

A Dios nuestro señor todo poderoso, que nos ha llenado de bendiciones, y nos ha dado salud para cumplir nuestro sueño de ser profesionales.

A la Ingeniera Claudia Patricia Retamoso Llamas, Directora del proyecto, por su constante apoyo, asesorías e ideas, por su buena disposición, dedicación, profesionalismo, experiencia en la orientación de este trabajo. Por su valiosa amistad y por su infinito respaldo durante este proceso de formación académica.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, por brindarme una educación de alta calidad y en especial a los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil por compartir sus conocimientos y experiencias de vida.

A las personas encargadas del laboratorio, la Ingeniera Luz Marina Torrado Gómez, Don Helí Rueda y Don Vicente Páez, por sus valiosas orientaciones y su buena disposición.

A la Dra. María Fernanda Serrano Guzmán, por su colaboración, atención y apoyo en la ejecución de este trabajo.

A los auxiliares de investigación Julián Felipe Porras García, Wilson Álvarez Gómez y Henry Andrey Mercado Otavo, por su colaboración y permanente apoyo.

A la empresa INDUSTRIAS LAVCO Ltda., por su amabilidad y colaboración.

A nuestros amigos, por su lealtad y compañerismo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. OBJETIVOS	10
1.1. Objetivo General.....	10
1.2. Objetivos Específicos.....	10
2. RELEVANCIA DEL ESTUDIO.....	11
3. METODOLOGIA	12
3.1. Tamaño de la Muestra para la Elaboración de Cilindros de Concreto.....	12
3.2. Materiales.....	14
3.3. Premuestra.....	15
3.4. Caracterización de los Materiales	15
3.5. Diseño de Mezcla.....	15
3.6. Elaboración de Cilindros de Concreto.....	15
3.7. Prueba de Resistencia a la Compresión de Mezclas de Concreto	16
3.8. Determinación del Módulo de Elasticidad Estático	16
4. JUSTIFICACIÓN	17
5. ALCANCE	18
6. MARCO TEÓRICO.	19
6.1. Materiales para la Elaboración de Muestras de Concreto.....	19
6.1.1. Cemento.....	19
6.1.1.1 Fabricación del cemento portland	19
6.1.1.2 Tipos de cemento portland.....	21
6.1.2. Agua.....	22
6.1.2.1 Agua de mezclado	23
6.1.2.2 Agua de curado.....	23
6.1.3. Agregados.....	23
6.1.3.1 Agregado Grueso.....	24
6.1.3.2 Agregado fino.....	24
6.1.4. Limalla de hierro gris	24
6.1.5. Aditivos.....	26
6.1.5.1 Aditivos acelerantes.....	27
6.1.5.2 Aditivos superplastificantes.....	27
6.1.5.3 Aditivos retardantes.....	27
6.1.5.4 Aditivos inclusores de aire.....	28
6.1.5.5 Aditivos reductores de agua.....	28
6.1.5.6 Aditivos minerales.....	28
6.1.5.7 Otros aditivos	28
6.2. Investigaciones en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.....	29
6.2.1. Análisis del comportamiento mecánico de un concreto aligerado con la corteza que contiene las semillas del pino cupressun sempervirens.....	29
6.2.2. Análisis del comportamiento de cenizas volantes de las centrales termoeléctricas de Tasajero y Paipa IV como material cementante en la producción de concreto.....	29
6.2.3. Análisis del comportamiento mecánico y económico de vigas de concreto con adiciones de PET reciclado.....	30

6.2.4.	Análisis del comportamiento mecánico del concreto hidráulico para pavimentos utilizando las fibras de las hojas caulinares del Bambú o Guadua.....	30
6.2.5.	Aprovechamiento de Escombros como Agregados no Convencionales en Mezcla de Concreto.	30
6.2.6.	Evaluación técnico-económica del uso del concreto reciclado en la construcción de obras civiles.	31
6.3.	Investigaciones en otros lugares.....	31
6.3.1.	Study on the Strength Characteristics of SCC with GGBS and RHA as Mineral Admixtures.....	31
6.3.2.	Experimental Evaluation of Corrosion Rate of Rebars in M25 Concrete with Water Proofing Admixture.....	31
6.3.3.	Durability of Fly Ash Concrete to Chloride Ingress.....	32
6.4.	Concreto.	32
6.4.1.	Propiedades del Concreto Fresco.....	32
6.4.1.1	Trabajabilidad o Manejabilidad.....	33
6.4.1.2	Segregación o vaciado del concreto	33
6.4.1.3	Exudación o Sangrado.....	33
6.4.1.4	Contenido de aire.....	34
6.4.1.5	Contenido de agua.....	34
6.4.1.6	Proceso de Fraguado.....	34
6.4.1.7	Contracción Plástica	34
6.4.2.	Propiedades del Concreto Endurecido.....	35
6.4.2.1	Resistencia a la Compresión.....	35
6.4.2.2	Resistencia a la Flexión	35
6.4.2.3	Resistencia a la Tracción	36
7.	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	37
7.1.	Pruebas Preliminares.....	37
7.2.	Caracterización de los Agregados Convencionales y no Convencionales.....	38
7.2.1.	Densidad del Cemento	38
7.2.2.	Análisis Granulométrico de los Agregados.....	39
7.2.3.	Determinación de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables en los Agregados.....	39
7.2.4.	Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas Usadas en la Preparación de Morteros o Concretos.....	39
7.2.5.	Gravedad Específica y Absorción de Agregados Gruesos.	40
7.2.6.	Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos.	41
7.2.7.	Resistencia al Desgaste de los Agregados por Medio de la Máquina de los Ángeles	42
7.2.8.	Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos de los Agregados	43
7.2.9.	Humedad Natural de los Agregados.....	44
7.2.10.	Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos.....	44
7.2.11.	Densidad de la Limalla Fina.....	45
7.2.12.	Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados.....	46
7.2.13.	Índice de Aplanamiento y Alargamiento de los Agregados.....	46
7.3.	Ensayos al Concreto en Estado Fresco.....	47
7.3.1.	Asentamiento del Concreto (Slump).....	47

7.3.2.	Elaboración y Curado de Muestras de Concreto	48
7.4.	Ensayos al Concreto en Estado Endurecido	49
7.4.1.	Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto.....	49
7.4.2.	Determinación del módulo de elasticidad estático.....	50
8.	DISEÑO DE MEZCLA.....	51
8.1.1.	Datos previos.....	53
8.1.2.	Elección del Asentamiento	53
8.1.3.	Elección del Tamaño Máximo Nominal (TMN).....	54
8.1.4.	Estimación del Contenido de Aire	54
8.1.5.	Estimación del Agua de Mezclado.....	55
8.1.6.	Relación Agua/Cemento.....	56
8.1.7.	Cantidad de Cemento.....	56
8.1.8.	Estimación del Volumen de Agregados	57
8.1.9.	Ajuste de Agua de la Mezcla	60
8.1.10.	Determinación de las Cantidades de Material con Ajuste de Agua para un Metro Cúbico (m ³).....	61
8.1.11.	Ajuste de las Cantidades de Material	62
9.	RESULTADOS.....	64
9.1.	Resultados de la Caracterización de los Materiales	64
9.1.1.	Análisis Granulométrico	65
9.1.2.	Densidad del Cemento	66
9.1.3.	Densidad de la Limalla de Hierro Gris.....	66
9.2.	Resultados del Concreto en Estado Endurecido.....	66
9.2.1.	Resistencia a la Compresión de Muestras de Concreto	67
9.2.1.1	Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 3,5%.....	67
9.2.1.2	Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 4,5%.....	68
9.2.1.3	Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 5,5%.....	72
9.2.1.4	Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 0%.....	74
9.3.	Módulo de Elasticidad Estático	75
9.3.1.	Cálculo Tipo para Determinar el Módulo de Elasticidad Estático.....	76
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	80
10.1.	Con Respecto a la Caracterización de los Materiales.....	80
10.1.1.	Análisis Granulométrico.....	81
10.1.2.	Densidad del Cemento.....	82
10.1.3.	Densidad de la Limalla de Hierro Gris.....	82
10.2.	Con Respecto al Concreto en Estado Endurecido.....	82
10.2.1.	Resistencia a la Compresión de Muestras de Concreto.....	82
10.2.1.1	Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 3,5%.....	83
10.2.1.2	Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 4,5%.....	84
10.2.1.3	Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 5,5%.....	85
10.2.1.4	Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 0%.....	85
10.2.2.	Comparación de los valores de resistencia máxima a los 7, 14 y 28 días para las distintas mezclas de concreto.....	86
10.2.2.1	Resistencia a la Compresión de la Limalla Fina a los 7 días.	86
10.2.2.2	Resistencia a la Compresión de la Limalla Fina a los 14 días.	87
10.2.2.3	Resistencia a la Compresión de la Limalla Fina a los 28 días.	88
10.2.3.	Resumen de los Resultados de la Resistencia a la Compresión de Mezclas de Concreto Adicionadas con Limalla Fina.....	88

10.2.4.	Módulo de Elasticidad Estático de Muestras de Concreto.	90
11.	CONCLUSIONES	93
12.	RECOMENDACIONES	96
13.	BIBLIOGRAFÍA	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Número de Muestras Requeridas según Análisis Estadístico para Muestra Estándar	12
Tabla 2.	Determinación de la Muestra a Elaborar.....	13
Tabla 3.	Distribución de las Mezclas.	14
Tabla 4.	Tipos de cemento.	22
Tabla 5.	Propiedades de los agregados	53
Tabla 6.	Criterios para la Elección del Asentamiento.	53
Tabla 7.	Porcentaje de aire atrapado.....	55
Tabla 8.	Estimación agua de mezclado	55
Tabla 9.	Relación agua/cemento	56
Tabla 10.	Distribución en porcentaje de los agregados.....	57
Tabla 11.	Mezclas en peso de los agregados.	59
Tabla 12.	Mezclas en volumen de los agregados.....	59
Tabla 13.	Mezclas con Ajuste de Agua.....	60
Tabla 14.	Cantidades de Material para las Diferentes Mezclas.	62
Tabla 15.	Cantidades de Material para un molde metálico (Diámetro= 15cm, Altura= 30cm).	63
Tabla 16.	Caracterización de los Agregados	64
Tabla 17.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 3,5% a 7 Días	67
Tabla 18.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 3,5% a 14 Días	68
Tabla 19.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 3,5% a 28 Días	68
Tabla 20.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 4,5% a 7 Días	69
Tabla 21.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 4,5% a 14 Días	70
Tabla 22.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 4,5% a 28 Días	71
Tabla 23.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 5,5% a 7 Días	73
Tabla 24.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 5,5% a 14 Días	73
Tabla 25.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 5,5% a 28 Días	74
Tabla 26.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 0% a 7 Días	74
Tabla 27.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 0% a 14 Días	75
Tabla 28.	Resultados Resistencia Compresión Limalla 0% a 28 Días	75
Tabla 29.	Valores de Excentricidad y Diámetro de la muestra	76
Tabla 30.	Procedimiento para determinar el Módulo de Elasticidad Estático.....	77
Tabla 31.	Resultados del Módulo de Elasticidad Estático	78
Tabla 32.	Requisitos de los agregados.....	80
Tabla 33.	Resumen de los Resultados de la Resistencia a la Compresión de Mezclas de Concreto	89
Tabla 34.	Resumen de los Resultados del Módulo de Elasticidad Estático.....	91
Tabla 35.	Precio de 1 m ³ de Concreto Adicionado con Limalla Fina de 31 MPa	97
Tabla 36.	Precio de 1 m ³ de Concreto Convencional de 31 MPa	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Cuadro Resumen de la Metodología.	16
Figura 2.	Proceso de fabricación del cemento portland por vía húmeda	20
Figura 3.	Proceso de fabricación del cemento portland por vía seca.....	21
Figura 4.	Proceso de Obtención de la Limalla.	26
Figura 5.	Comparación con la carta colorimétrica de Gardner.....	40
Figura 6.	Picnómetro con la muestra de arena	41
Figura 7.	Máquina de los Ángeles.....	42
Figura 8.	Esferas de Carga Abrasiva	42
Figura 9.	Masa Unitaria Agregado Fino.	43
Figura 10.	Masa Unitaria Agregado Grueso	43
Figura 11.	Horno y Muestra para Humedad.....	44
Figura 12.	Agitador mecánico para el ensayo de equivalente de arena.	45
Figura 13.	Probeta con limalla de hierro gris	46
Figura 14.	Calibradores Metálicos de índices de alargamiento y aplastamiento.	47
Figura 15.	Ensayo de asentamiento a través del cono de Abrams.....	48
Figura 16.	Procedimiento para la elaboración y curado de los cilindros de concreto, a) curado de las muestras, b) elaboración de especímenes	49
Figura 17.	Ensayo de Compresión.....	50
Figura 18.	Cilindro de concreto con el compresómetro.....	50
Figura 19.	Pasos para el diseño de mezcla	52
Figura 20.	Análisis Granulométrico del Agregado Grueso	65
Figura 21.	Análisis Granulométrico del Agregado Fino.....	66
Figura 22.	Módulo de Elasticidad Estático de Mezclas de Concreto.....	77
Figura 23.	Curvas Granulométricas Agregado Grueso Respecto Curva Ideal. .	81
Figura 24.	Curvas Granulométricas Agregado Fino Respecto Curva Ideal.....	81
Figura 25.	Resistencia a la Compresión Limalla Fina 3,5%.....	83
Figura 26.	Resistencia a la Compresión Limalla Fina 4,5%.....	84
Figura 27.	Resistencia a la Compresión Limalla Fina 5,5%.....	85
Figura 28.	Resistencia a la Compresión Limalla Fina 0%.....	86
Figura 29.	Resistencia a la Compresión Limalla Fina 7 días	87
Figura 30.	Resistencia a la Compresión Limalla Fina 14 días	87
Figura 31.	Resistencia a la Compresión Limalla Fina 28 días	88
Figura 32.	Análisis del Aumento de Resistencia a Compresión en la Mezcla 2 a los 28 días de edad del Concreto con respecto a la Mezcla Convencional.....	90
Figura 33.	Comportamiento Módulo de Elasticidad Estático en Mezclas de Concreto	92

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO:	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA DE AGREGADOS ADICIONADOS CON EL 3.5, 4.5 Y 5.5% DE LIMALLA FINA, PARA LAS MEZCLAS DE CONCRETO.
AUTOR(ES):	ELIECER BELTRÁN CASTILLO VICTOR HUGO ORTIZ ARIZA
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería Civil
DIRECTOR(A):	Claudia Patricia Retamoso Llamas

RESUMEN

Este trabajo de grado busca determinar el porcentaje óptimo de limalla de hierro gris en mezclas de concreto, el cual debe proporcionar un aumento significativo en la resistencia a la compresión de dichas mezclas. Para esto, cierta cantidad de agregado fino será reemplazado por los porcentajes de limalla de hierro gris, la cual fue suministrada por INDUSTRIAS LAVCO Ltda. Para lograr lo anterior, se planeó a través de dos etapas, la primera etapa consistió en realizar una pre-muestra de 120 especímenes de concreto con 5 diferentes porcentajes de limalla de hierro gris, variando las proporciones tanto del agregado grueso como del fino en cada uno de los porcentajes. De esta forma se pudo determinar, que el porcentaje de limalla fina que aporta la mayor resistencia a la compresión se encuentra alrededor del 4%. La segunda etapa, consistió en realizar 285 cilindros de concreto para 4 porcentajes de limalla de hierro gris, a través de 5 mezclas diferentes para cada porcentaje, los cuales fueron probados a los 7, 14 y 28 días de su elaboración, con el fin de conocer la resistencia a la compresión que habían adquirido, realizando su respectiva comparación con las muestras patrones. Esto se logró gracias a la caracterización previa de los materiales que iban hacer posteriormente utilizados, los cuales deben cumplir con los parámetros y características que exigen las normas INVIAS y NTC, como también al diseño de mezcla que proporcionó la MIC Claudia Patricia Retamoso Llamas. Con los resultados del presente estudio, se pudo concluir que el porcentaje de limalla de hierro gris que aporta la mayor resistencia a la compresión es de 3.5%, y que la mezcla de agregados que mejor se comporta tiene como distribución en peso (65% Agregado Grueso, 31.5% Agregado Fino y 3.5% Limalla Fina).

PALABRAS CLAVES: Concreto, mezclas, limalla de hierro gris, resistencia a la compresión, diseño de mezcla, aditivo.

GENERAL SUMMARY OF PROJECT DEGREE

TITLE:	STUDY OF BEHAVIOR OF MIX AGGREGATES ADDED WITH 3.5, 4.5 AND 5.5% OF STEEL SWARF FOR CONCRETE MIXTURES.
AUTHOR(S):	ELIECER BELTRÁN CASTILLO VICTOR HUGO ORTIZ ARIZA
FACULTY:	Civil Engineering
DIRECTOR:	Claudia Patricia Retamoso Llamas

ABSTRACT

This work seeks to determine the optimal percentage of gray iron shavings in concrete mixtures, which should provide a significant increase in resistance to compression of these mixtures. For this purpose an amount of fine aggregate will be replaced by percentages of gray iron shavings, which were supplied by Industrias LAVCO Ltda. In order to achieve this, two stages were planned. The first stage consisted of making a pre-sample of 120 concrete specimens with five different percentages of gray iron shavings, varying the proportions of both the fine and the coarse aggregate in each of the percentages. In this way the percentage of fine swarf that provides the greater compressive strength could be determined, which is around 4%. The second stage consisted of making 285 concrete cylinders for 4 gray iron shavings percentages, through five different mixes for each percentage, which were tested at the 7, 14 and 28 days of their development to know the compressive strength they had acquired by comparison with their respective standard samples. This could be achieved for the previous characterization of the materials that were subsequently used, which must comply with the parameters and characteristics required by the INVIAS and NTC rules as well as the mix design that provided the MIC Claudia Patricia Retamoso Llamas. With the results of this study it was concluded that the percentage of gray iron shavings that get the greatest compressive strength is 3.5% and the mix aggregates best behaved has a weight distribution of 65% Added Coarse, 31.5 fine aggregate and 3.5% of thin swarf .

KEY WORDS: Concrete mixes, gray iron shavings, compressive strength, mix design, additive.

INTRODUCCIÓN

La problemática actual por la que está pasando el medio ambiente es preocupante, debido al crecimiento desmedido de la demanda de los recursos naturales no renovables utilizados en el campo de la construcción, y a la falta de conocimiento y desaprovechamiento de nuevos materiales que pueden ser adicionados a las mezclas de concreto, los cuales garantizan y hasta pueden mejorar las características de exigencia de las diferentes obras civiles, en las cuales se pueden utilizar estos nuevos agregados no convencionales.

La industria de la construcción demanda grandes cantidades para la elaboración de todo tipo de obra civil. El más utilizado es el concreto, el cual es una mezcla de tres componentes esenciales (cemento, agua y agregados). Los componentes que se utilizan, son adquiridos a partir de la explotación de canteras o ríos, pero trayendo asociado numerosos impactos negativos al medio ambiente.

Teniendo como referencia los argumentos anteriormente planteados, es de vital importancia implementar nuevos productos al mercado, involucrando en lo posible materiales que hayan sido reciclados de procesos industrializados, claro está, que estos materiales cumplan con ciertos requisitos mínimos para su futura incorporación, con el fin de reducir la explotación desmedida de recursos naturales no renovables para el campo de la construcción. Dicha reducción se podría lograr incorporando en el mercado mezclas de concreto con ciertos porcentajes de limalla de hierro gris (3.5, 4.5 y 5.5%), con lo cual se obtiene un aumento considerable de la resistencia de mezclas de concreto a la compresión, y el aprovechamiento de la limalla de hierro gris, como elemento fundamental en la elaboración de dichas mezclas.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General.

Determinar la composición óptima de la mezcla de agregados adicionados con el 3.5, 4.5 y 5.5% de limalla fina, para las mezclas de concreto, con el fin de aumentar su resistencia a la compresión.

1.2. Objetivos Específicos.

Identificar a través de ensayos en el laboratorio el comportamiento de la mezcla de agregados adicionada con el 3.5, 4.5 y 5.5% de limalla fina, respecto a la mezcla de concreto.

Elaborar registros de los ensayos de compresión realizados a los cilindros testigo, con el fin de observar el comportamiento que tiene la mezcla de concreto, con respecto a su resistencia y edad.

Seleccionar la limalla fina proveniente de industrias locales mediante el tamizado para que cumpla con requisitos previamente establecidos, y de esta forma se encuentre en condiciones óptimas para ser utilizada en la elaboración de mezclas de concreto.

Analizar los resultados que se obtienen de los diferentes ensayos realizados a los cilindros testigo, para poder determinar la composición óptima de la mezcla de agregados adicionada con el 3.5, 4.5 y 5.5% de limalla fina que se deberá agregar a las mezclas de concreto.

Realizar pruebas y ensayos a los agregados convencionales y no convencionales, para conocer sus propiedades físico – químicas, las cuales determinan su posterior uso en la elaboración de mezclas de concreto.

Proponer un diseño de mezcla donde se involucre la adición de porcentajes de limalla de hierro gris en la elaboración de especímenes de concreto.

Determinar el módulo de elasticidad estático de muestras de concreto.

2. RELEVANCIA DEL ESTUDIO.

A través de este trabajo de grado se pretende proponer la implementación de la adición de un nuevo material reemplazando el agregado fino de la mezcla de concreto, que es la limalla de hierro gris, con este material se logra aumentar significativamente la resistencia a la compresión de dichas mezclas, además de la reutilización y aprovechamiento de un residuo industrial, el cual contribuye en cierta forma a disminuir la explotación de las canteras o zonas destinadas para la extracción del agregado fino.

La propuesta principalmente se basa en concientizar al gremio de la construcción, que es importante empezar a implementar nuevos materiales en las mezclas de concreto, sabiendo que estas mantienen o en su defecto mejoran las propiedades y características de la mezcla de concreto. Además, esta propuesta trae asociado la mitigación de los efectos desfavorables que se le pueden causar al medio ambiente.

Este trabajo de grado, junto con otros más realizados en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, se socializará con un artículo de investigación o en su defecto en un congreso nacional de ingeniería, con el trabajo de investigación que está desarrollando la Directora del Trabajo de Grado, Ingeniera Claudia Patricia Retamoso Llamas.

3. METODOLOGIA

Teniendo como base, que el presente trabajo tiene como objetivo determinar el porcentaje óptimo de limalla de hierro gris y la mezcla que tenga el mejor comportamiento en cuanto a la distribución en peso de los agregados, los cuales deben trabajar en conjunto, proporcionando y garantizando las exigencias a las cuales van a estar sometidas, se acordó elaborar una serie de procedimientos que conduzcan a alcanzar el objetivo proyectado.

El procedimiento que se siguió para lograr la anterior meta, se encuentra descrito a continuación, en el cual se destacan los ensayos realizados a los materiales, los cuales deben cumplir con las especificaciones establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), la Norma Técnica Colombiana (NTC) y la American Standard Test Material (ASTM), para su posterior uso.

3.1. Tamaño de la Muestra para la Elaboración de Cilindros de Concreto

Se realizó un cálculo preliminar de la cantidad de muestras que se debían desarrollar en el Trabajo de Grado, con el modelo estadístico de cálculo del tamaño de la muestra simple con un nivel de confiabilidad $(1 - \alpha)$ de 95%, un error del 5%, tomando como premuestra el concreto sin adición de limalla trabajado al momento de plantear el Trabajo de Grado y se observaron los resultados mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Número de Muestras Requeridas según Análisis Estadístico para Muestra Estándar

Mezcla	%Agregado Grueso	% Agregado Fino	Promedio	Varianza	No Muestras
1	80	20	14.18	11.1317377	90
2	70	30	16.30	17.2969538	106
3	60	40	12.87	14.0830488	138
4	50	50	8.48	10.0658172	227
5	40	60	6.12	1.3853781	60
6	30	70	3.76	0.08700103	10

Fuente: Propia.

Como se puede observar según la premuestra desarrollada, el número de muestras por cada mezcla para una población infinita, se toma como el mayor valor arrojado por los análisis de datos, esto fue 227 muestras para cada día (7, 14 y 28 días) y para un total de cinco (5) mezclas desarrolladas, se obtendría un resultado definitivo para cada porcentaje de limalla fina de:

$$\text{No Muestras por \% de limalla} = 227 \cdot 3 \text{ días} \cdot 5 \text{ mezclas} = 3405 \text{ muestras}$$

Como se trabajaron tres (3) porcentajes de limalla y una muestra sin adición de limalla fina, se observa que las muestras totales a desarrollar en el trabajo de Grado son:

$$\text{No Muestras Trabajo de Grado} = 3405 \cdot 4 \text{ porcentajes de limalla fina} = 13620 \text{ muestras}$$

Como el presupuesto que se tenía en el proyecto de investigación matriculado en la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana, de donde se obtuvieron estos recursos, no disponía de tanto presupuesto para desarrollar todas las muestras solicitadas. Además el Laboratorio no cuenta con disposición de espacios para realizar el curado de tantos cilindros de concreto.

Por lo anterior, se decidió en acuerdo con la Directora del Trabajo de Grado, realizar 285 cilindros de concreto, los cuales debían ser fallados a la resistencia a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días de su elaboración, lo anterior se observa en la Tabla 2. En el porcentaje de Limalla de 4.5% se decidió elaborar una mayor cantidad de este porcentaje, ya que en la premuestra se obtuvo un aumento de resistencia considerable con un porcentaje cercano al 4%.

Tabla 2. Determinación de la Muestra a Elaborar.

Limalla = 3,5%					
Edad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
7 Días	3	3	3	3	3
14 Días	3	3	3	3	3
28 Días	3	3	3	3	3
Limalla = 4,5%					
Edad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
7 Días	10	10	10	10	10
14 Días	10	10	10	10	10
28 Días	10	10	10	10	10
Limalla = 5,5%					
Edad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
7 Días	3	3	3	3	3
14 Días	3	3	3	3	3
28 Días	3	3	3	3	3
Limalla = 0%					
Edad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
7 Días	3	3	3	3	3
14 Días	3	3	3	3	3
28 Días	3	3	3	3	3

Fuente: Propia.

Como se puede observar cada porcentaje de limalla fina tiene 5 mezclas de concreto diferentes, estas varían según el porcentaje de agregado fino en cada una de las mezclas, pero mantenido constante el porcentaje de limalla de hierro gris y del agregado grueso en cada una de estas. Estas distribuciones se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución de las Mezclas.

Limalla 3.5%	Material	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
	Grueso	70%	65%	60%	55%	50%
	Fino	26,5%	31,5%	36,5%	41,5%	46,5%
	Limalla	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%

Limalla 4.5%	Material	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
	Grueso	70%	65%	60%	55%	50%
	Fino	25,5%	30,5%	35,5%	40,5%	45,5%
	Limalla	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%

Limalla 5.5%	Material	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
	Grueso	70%	65%	60%	55%	50%
	Fino	24,5%	29,5%	34,5%	39,5%	44,5%
	Limalla	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%

Limalla 0%	Material	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
	Grueso	70%	65%	60%	55%	50%
	Fino	30%	35%	40%	45%	50%
	Limalla	0%	0%	0%	0%	0%

Fuente: Propia.

3.2. Materiales

El contacto con la empresa Industrias LAVCO Ltda., se realizó gracias al acercamiento de la Gerente de la empresa en la entrega de los premios innovación 2009, el cual se le otorgó al Trabajo de Grado titulado “Aprovechamiento de Escombros como Agregados no Convencionales en Muestras de Concreto”, realizado por el Ingeniero Juan Sebastián Ferreira Díaz.

El proyecto empezó con la recolección de la limalla de hierro gris, suministrada por la industria local LAVCO Ltda., en una cantidad de 300 Kilogramos (Kg), la cual fue utilizada en la elaboración de especímenes de la pre-muestra y en el trabajo de grado como tal. Esta limalla de hierro gris fue tamizada en una malla No 4, con el fin de dejar su tamaño con las características del agregado fino, de tal modo que pudiera reemplazar cierto porcentaje del mencionado material.

Paralelamente al procedimiento anterior, se consiguieron tanto los agregados pétreos (fino y grueso) como el cemento, que se utilizaron en la elaboración de las mezclas de concreto.

3.3. Premuestra

En la pre-muestra se realizaron 5 mezclas de concreto con porcentajes diferentes de limalla de hierro gris (3, 4, 8, 12 y 20), dando un total de 120 cilindros de concreto. Estos especímenes fueron probados a la compresión a los 7, 14 y 28 días de edad, con el fin de analizar cual porcentaje de limalla de hierro gris tenía mejores resultados.

Al obtener los resultados y analizarlos se pudo deducir que el porcentaje de limalla óptimo se encuentra cerca al 4%.

3.4. Caracterización de los Materiales

Se realizan los ensayos preliminares a los materiales que se van a utilizar en la mezcla de concreto. Al agregado grueso, agregado fino, limalla fina y cemento, de tal manera que se comparan con las especificaciones dadas en las diferentes normas (INVIAS, NTC y ASTM).

3.5. Diseño de Mezcla

Para elaborar el diseño de mezcla se deben seguir los pasos estipulados por el método del American Concrete Institute (ACI), el cual se centra fundamentalmente en el principio de la relación agua/cemento desarrollado por Abrahms. Consiste en seguir en forma ordenada una secuencia de pasos y determinar la cantidad de cada material en peso y en volumen, para un (1) m³ de concreto. Después se procede a realizar el respectivo ajuste según las cantidades necesarias.

3.6. Elaboración de Cilindros de Concreto

Se trabajó durante 3 semanas en la elaboración de cilindros de concreto, en cada semana se realizaban 95 especímenes, para llegar así a un total de 285 cilindros.

Cada cilindro cumplió con las especificaciones requeridas en el INVIAS, realizados con el siguiente proceso, se tomaba un molde (formaleta) que tiene una relación 1:2 (diámetro : altura, respectivamente), se aceita la formaleta con el fin de evitar que el concreto se adhiriera a las paredes de la formaleta, se llena en tres capas iguales, cada capa se vibra con 25 golpes con una varilla metálica y seguido a esto se le proporcionan unos golpes muy leves con un martillo de goma con el fin de sacar el aire que se encuentra en la mezcla para evitar la porosidad.

3.7. Prueba de Resistencia a la Compresión de Mezclas de Concreto

Los 285 especímenes fueron sometidos a la prueba de resistencia a la compresión a la edad de 7, 14 y 28 días, a los cuales se les determinó la carga máxima que soportan, este proceso fue ejecutado por la máquina que mide la resistencia de cilindros de concreto, ubicada en el Laboratorio de Ingeniería Civil del Bloque A de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

3.8. Determinación del Módulo de Elasticidad Estático

Para determinar el módulo de elasticidad estático se tuvieron en cuenta 95 especímenes a una edad de 28 días. De los cuales 40 fueron llevados a la rotura para conocer la carga máxima y así poder hallar el módulo elástico estático a los 55 cilindros restantes, ya que para hallar dicho módulo se aplicó el 40% de esta carga máxima, determinada en los cilindros gemelos.

A continuación se relaciona un resumen de la metodología en la Figura 1.

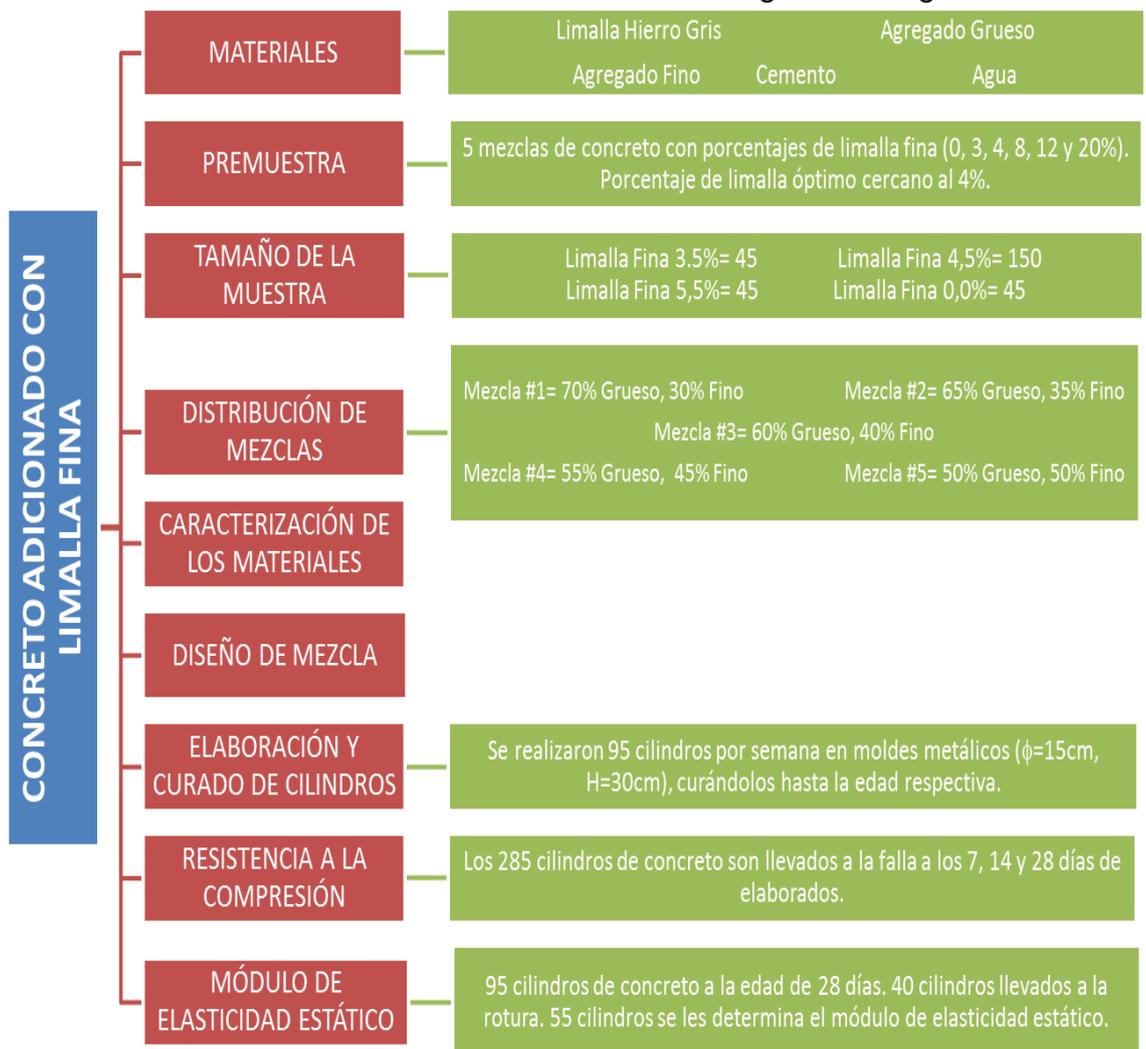


Figura 1. Cuadro Resumen de la Metodología.

Fuente: Propia

4. JUSTIFICACIÓN

El ser humano siempre ha estado en la búsqueda de mejorar los productos o servicios que ofrece a la sociedad, a través de investigaciones que proporcionen elementos, que puedan de una u otra forma optimizar el uso de los recursos destinados para la elaboración de estos, buscando con esto la reducción de gastos de producción y el beneficio de las partes involucradas en éste ciclo.

Por otra parte, es evidente el mal estado en el cual se encuentra nuestro planeta tierra, a raíz de políticas y empresas que no han sabido utilizar los recursos y/o elementos que les ha proporcionado la tierra, y se han dejado llevar por la ambición y las ganas de querer tener cada día más y más poder, sin importar el daño que se le pueda causar a la población y mucho menos al medio ambiente, el cual de una u otra forma a medida que pasa el tiempo hace ver los efectos que han causado sobre él, pues el planeta tierra devuelve con mayor severidad los daños que le han causado.

Por lo anterior se decidió realizar esta investigación, la cual busca conocer el comportamiento del elemento más utilizado en la construcción (concreto¹) con la adición de la limalla fina, la cual es un producto residual de las industrias que trabajan con los metales, a la cual no se le está dando el tratamiento y uso adecuado después de cumplir su ciclo de vida en dicha industria. Por eso es de vital importancia empezar a recolectar y emplear la limalla fina en el concreto.

Se busca determinar los beneficios en cuanto a los costos de producción del concreto con la adición de la limalla fina, al aumento de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto y sobre todo la mitigación de los efectos desfavorables que se le pueden causar al medio ambiente.

¹ http://www.cemexcolombia.com/np/np_co_cp.html, visitado el 12 de Septiembre de 2.010. Es una mezcla de cemento, arena, gravilla, agua y aditivo, que tiene la cualidad de endurecer con el tiempo, adquiriendo características que lo hacen de uso común en la construcción.

5. ALCANCE

El concreto es el principal elemento para la construcción de obras civiles, es por ello que se le han realizado una serie de ensayos y/o experimentos, con el fin de presentar una mejor mezcla a la industria de la construcción; lo cual genera que este producto este adaptado a las necesidades que se presentan a medida que el tiempo transcurre.

El desarrollo de este proyecto, está encaminado a determinar la composición óptima de los agregados que conforman las mezclas de concreto, pero con la particularidad que se estudiará el efecto que cause la adición del 3.5, 4.5 y 5.5% de limalla fina en esta mezcla de agregados, determinándose a través de una serie de ensayos de laboratorio practicados a los cilindros testigos.

La finalidad de este proyecto, es incorporar un producto nuevo en la industria de la construcción, el cual podrá aumentar – o dejar igual - la resistencia a la compresión de mezclas de concreto, trayendo asociado con ésto, la reducción de la explotación de las canteras destinadas para la elaboración de estas mezclas; ya que se incorporará un nuevo material proveniente del reciclado de procesos industrializados, como es el caso de la limalla fina.

6. MARCO TEÓRICO.

El presente estudio está enfocado a determinar tanto el porcentaje de limalla de hierro gris como la mezcla óptima, que proporcionen la mayor resistencia a la compresión en especímenes de concreto probados a los 7, 14 y 28 días de edad de elaboración.

6.1. Materiales para la Elaboración de Muestras de Concreto.

A continuación se presenta una descripción breve de los materiales que conforman el concreto, debido a que la teoría que existe de ellos es bastante considerable, solo se describirán características y funciones de los componentes dentro de las mezclas de concreto.

6.1.1. Cemento.²

El cemento es una de las materias primas de la construcción más populares y hoy en día más indispensables. Prácticamente no hay obra alguna que se pueda emprender sin su participación. Es por excelencia el pegante más barato y más versátil, y sus propiedades físicas y mecánicas son aprovechadas en multitud de usos.

Es un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir minerales entre sí, para formar un conjunto con resistencia y durabilidad adecuadas.

En el medio de la construcción, el cemento está ligado implícitamente a cemento portland, o cemento a base de portland, el cual tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, ya que con ella experimenta una reacción química. A este proceso se le llama hidratación, por lo cual son también llamados cementos hidráulicos.

6.1.1.1 Fabricación del cemento portland³

El proceso de fabricación del cemento portland se puede realizar a través de dos vías, la vía húmeda o la vía seca. Para entender un poco estos procesos, se hará a través de la Figura 2 y la Figura 3.

² Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del Mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 349p. 2001.

³ IDEM

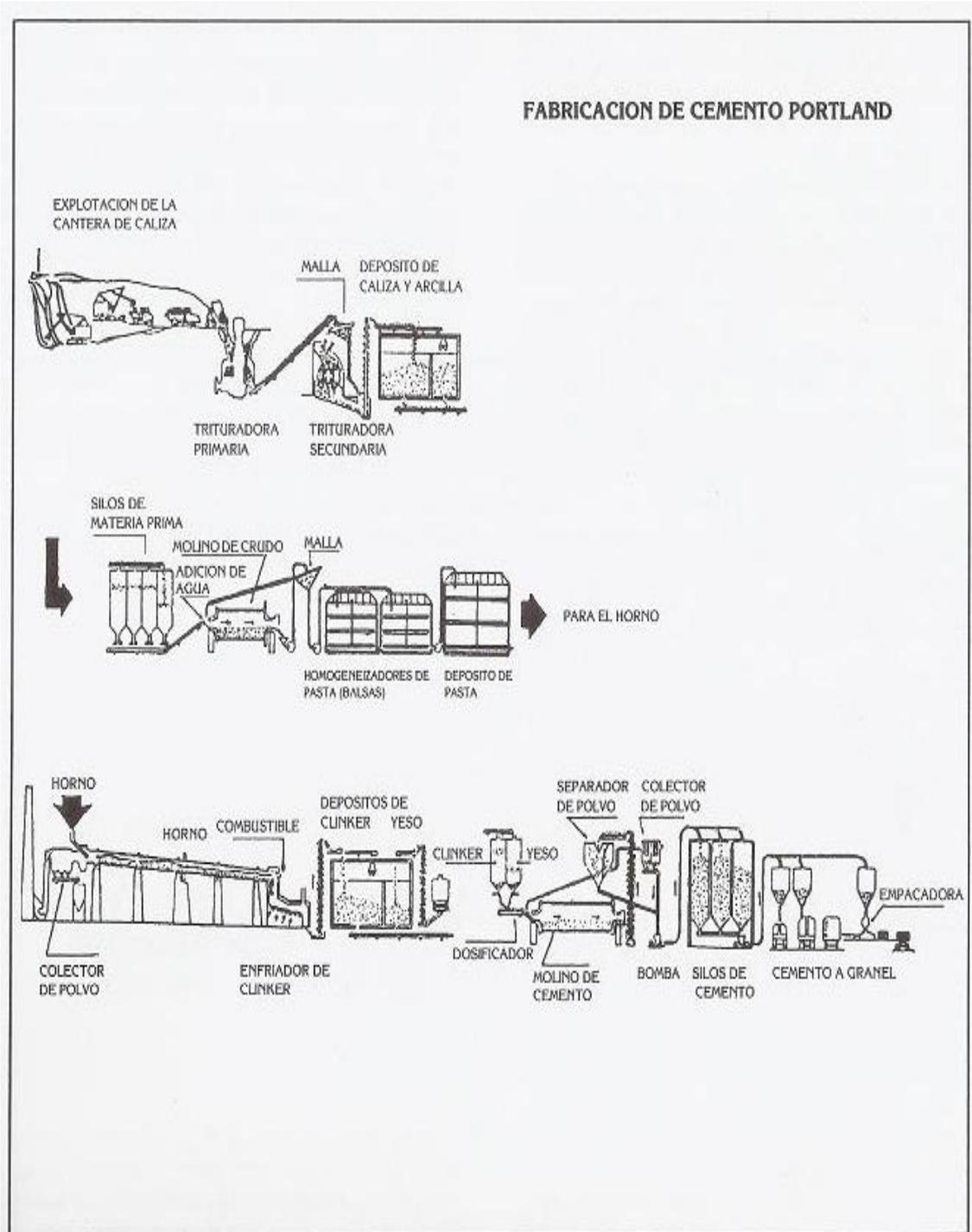


Figura 2. Proceso de fabricación del cemento portland por vía húmeda
 Fuente: Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del Mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 349p. 2001.

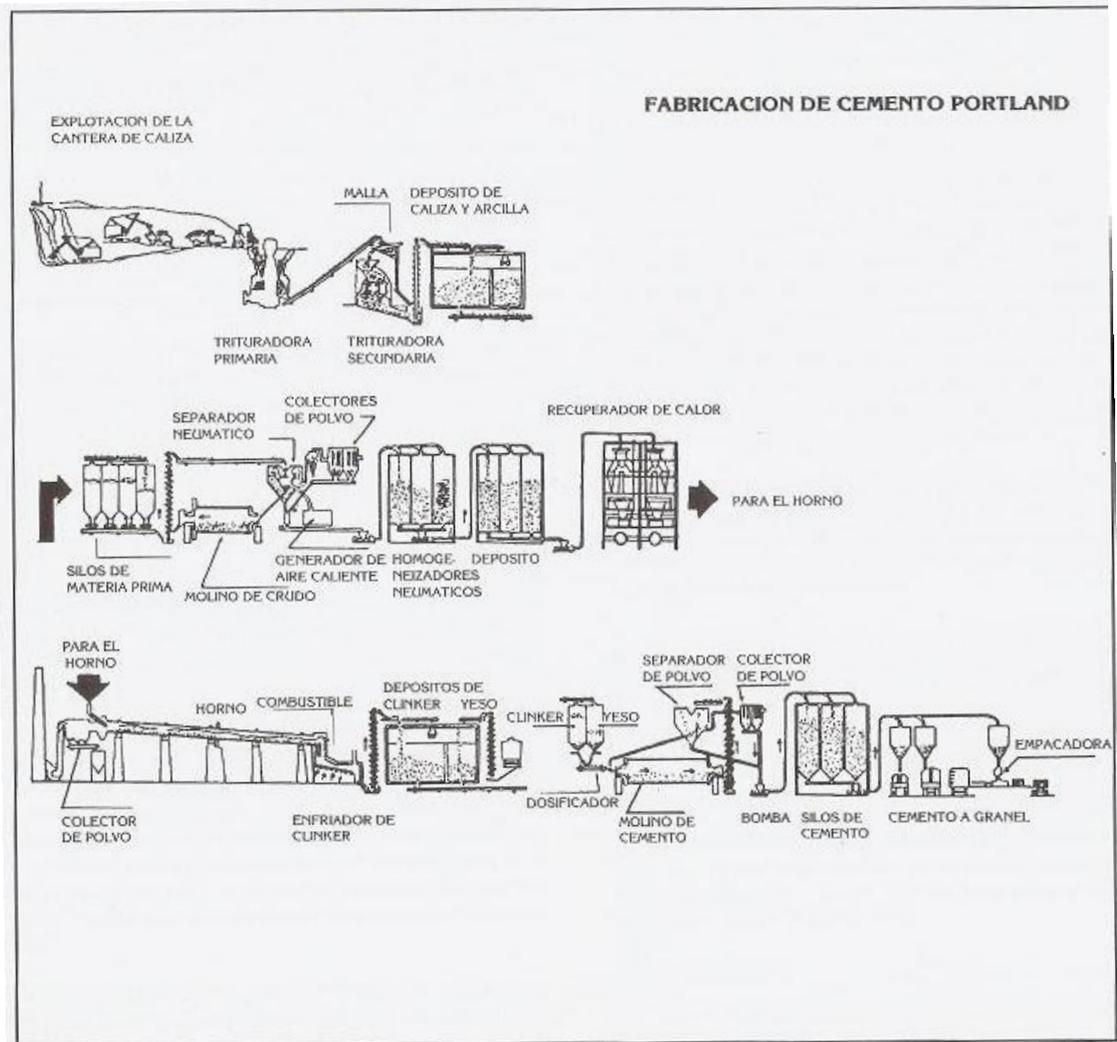


Figura 3. Proceso de fabricación del cemento portland por vía seca.

Fuente: Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del Mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 349p. 2001.

6.1.1.2 Tipos de cemento portland.⁴

Cuando se cambia la composición química y las propiedades físico-mecánicas del cemento portland, se pueden obtener características diferentes cuando éste es hidratado, como consecuencia da lugar a diferentes tipos de cemento.

En Colombia, las normas ICONTEC sobre cemento están basadas en las normas ASTM de los Estados Unidos y en la norma NTC 30, y dan la siguiente clasificación y nomenclatura de los diferentes cementos utilizados para realizar la mezcla de concreto.

⁴ Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del Mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 349p. 2001.

Tabla 4. Tipos de cemento.

Tipo de cemento	Características
Cemento portland tipo 1	Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
Cemento portland tipo 1-M	Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales, pero tiene resistencias superiores a las del tipo 1.
Cemento portland tipo 2	Es el destinado en general a obras de hormigón expuestas a la acción moderada de sulfatos y a obras en donde se requiere moderado calor de hidratación.
Cemento portland tipo 3	Es el que desarrolla altas resistencias iniciales.
Cemento portland tipo 4	Es el que desarrolla bajo calor de hidratación.
Cemento portland tipo 5	Es el que ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
Cemento portland blanco	Es el que se obtiene con materiales debidamente seleccionados que le confieren una coloración blanca.
Cemento portland con incorporadores de aire	Son aquellos a los que se les adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización.
Cemento portland tipo 1-A	Es el cemento portland tipo 1, al cual se le adiciona un material incorporador de aire.
Cemento portland tipo 1-M A	Es el cemento portland 1-M, al cual se le adiciona un material incorporador de aire.
Cemento portland tipo 2-A	Es el cemento portland tipo 2, de moderado calor de hidratación, al que se le adiciona un material incorporador de aire.
Cemento portland tipo 3-A	Es el cemento portland tipo 3, al cual de le agrega un material incorporador de aire.

Fuente: Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del Mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 349p. 2001.

6.1.2. Agua.⁵

Debido a que el agua ocupa un papel fundamental en las reacciones del cemento durante el estado plástico, el proceso de fraguado y el estado endurecido de un concreto.

⁵ Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del Mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 349p. 2001.

De acuerdo con lo anterior, el agua se puede definir como aquel componente del concreto a través del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Para ello, se clasifica en agua de mezclado y agua de curado.

6.1.2.1 Agua de mezclado

Está definida como la cantidad de agua por volumen unitario de concreto que requiere el cemento, para producir una pasta eficientemente hidratada, con una fluidez tal, que permita una lubricación adecuada de los agregados cuando la mezcla se encuentra en estado plástico. En una porción de pasta hidratada, el agua se encuentra en dos formas básicas:

Agua de hidratación. Es aquella parte del agua de mezclado que reacciona químicamente con el cemento para pasar a formar parte de la fase sólida del gel.

Agua evaporable. Es la parte restante que existe en la pasta; ésta puede evaporarse a un mínimo porcentaje de humedad relativa. No se encuentra libre en su totalidad. El agua evaporable puede existir en tres formas distintas, de acuerdo con su proximidad a la superficie del gel.

- **Agua de absorción.** Es aquella capa molecular de agua que se encuentra fuertemente adherida a las superficies del gel debido a la acción de las fuerzas intermoleculares de atracción.
- **Agua capilar.** Es el agua que ocupa los poros capilares de la pasta a distancias mínimas de manera tal que parte de ella está sujeta a la influencia de las fuerzas de la superficie del gel.
- **Agua libre.** Es aquella que se encuentra fuera de la influencia de las fuerzas de la superficie, de tal modo que tiene completa movilidad y puede evaporarse con facilidad.

6.1.2.2 Agua de curado

El curado puede definirse como el conjunto de condiciones necesarias para que la hidratación de la pasta evolucione sin interrupción hasta que todo el cemento se hidrate y el concreto alcance sus propiedades potenciales.

6.1.3. Agregados.⁶

Los agregados son el mayor constituyente del concreto, generalmente componen más del setenta (70) por ciento del material de un metro cúbico de concreto y son los que hacen que éste sea un material económico de

⁶ Díaz Posada, María Claudia. Elaboración del contenido virtual de la asignatura materiales de construcción apoyado en el software learningspace. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga. 2005.

construcción. En la elaboración de concreto, usado en la mayoría de construcciones, los agregados frecuentemente son obtenidos de arenas naturales y depósitos de grava, y para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente una de otra.

Los agregados, también llamados áridos, son materiales inertes ya que normalmente no presentan reacciones químicas durante el proceso de fabricación de un concreto; sin embargo, determinan gran parte de las características finales del concreto, tales como uniformidad, durabilidad y resistencia.

La calidad de los agregados está determinada por el origen, por su distribución granulométrica, densidad, forma y superficie. Se han clasificado en agregado grueso y agregado fino.

6.1.3.1 Agregado Grueso.

Es considerado como agregado grueso aquel material retenido en el tamiz de 4.76 mm (No. 4), este material puede estar compuesto por gravilla, grava, piedra y piedra rajón. El tamaño del agregado grueso para concreto depende del sistema de colocación, del refuerzo que lleve la estructura y de la resistencia para la cual se diseñe, por tal motivo los agregados a ser utilizados en las mezclas de concreto deberán ser de buena densidad, para adquirir mejores resistencias.⁷

6.1.3.2 Agregado fino

El agregado fino es aquel material que pasa por el tamiz de 4.76 mm (No. 4), es denominado arena y su función en el concreto es lubricar para que el agregado grueso pueda rodar sobre estos, para darle una manejabilidad adecuada al concreto. En vista a que el agregado fino, tiene una humedad natural y una absorción específica, se debe tener en cuenta este factor al momento de determinar la cantidad de agua total en la mezcla de concreto.⁸

6.1.4. Limalla de hierro gris⁹

Como este material fue suministrado por INDUSTRIAS LAVCO Ltda., y a través de una visita realizada a la planta de producción se conocieron las siguientes características, procesos y pruebas, que se realizan en la industria anteriormente mencionada a la limalla de hierro gris.

⁷ Instituto del Concreto- Asocreto. Tecnología y Propiedades. Asociación Colombiana de Productores de concreto. Bogotá. 215p. 2000.

⁸ IDEM.

⁹ ENTREVISTA con Rubén Niño, funcionario de INDUSTRIAS LAVCO Ltda., Bucaramanga, 19 de agosto de 2010.

A INDUSTRIAS LAVCO Ltda., llega de diversas partes de la ciudad diferentes tipos de metales, provenientes principalmente de la chatarra de vehículos. Este material que acaba de entrar a ser parte del proceso industrial, se selecciona y se adecua, dependiendo de las características y exigencias de los clientes. Se puede destacar en esta etapa, que el material principal que se selecciona es la chatarra de hierro gris.

Después el material seleccionado (generalmente la chatarra de hierro gris), es llevado a un horno cubilote, el cual es cargado con carbón coque (se produce de la destilación seca del carbón mineral) hasta la altura de un metro, este carbón sirve como material refractario, y es el encargado de fundir la chatarra metálica previamente escogida. La temperatura con la cual se funde la materia prima oscila entre los 1300 °C – 1350 °C.

Luego la materia prima es llevada a diferentes tipos de centrífugas y paralelamente algunas muestras al laboratorio. Es importante anotar que INDUSTRIAS LAVCO Ltda., cuenta con centrífugas de diferentes diámetros, dependiendo de la pieza que se vaya a elaborar. La principal función de las centrífugas es moldear las piezas (camisas para la industria automotriz) que posteriormente serán transformadas a través del mecanizado. Por otra parte, en el laboratorio se realizan ensayos y pruebas para controlar la calidad del material que será entregado a los clientes, allí haciendo uso de un equipo llamado MULTI – LAB, se establece la composición química del material, determinando el porcentaje de carbón, de silicio, la temperatura tanto del estado líquido como del estado sólido – líquido.

En el laboratorio, las muestras son examinadas a través de pruebas metalográficas, a través de una copa que hace circular una descarga eléctrica en la muestra, dando como resultado los porcentajes de carbono y silicio. Esta prueba está descrita en la ASTM – A246, y el porcentaje de carbono debe encontrarse entre 3 – 3,6%, mientras que el porcentaje del silicio debe estar entre 1,8 – 2,6%, los dos anteriores elementos son los principales factores que determinan la calidad del producto que será entregado, también es fundamental que el porcentaje de azufre sea menor a 0,15%.

Es importante anotar, que esta industria elabora muestras en su laboratorio, las cuales son enviadas a FUNDICOM S.A. (empresa que se encuentra situada en la ciudad de Bogotá), para comprobar y corroborar los datos que arroja el equipo con los que INDUSTRIAS LAVCO Ltda. hace su control de calidad. Esta prueba se realiza gracias al uso del espectrómetro.

Luego que el material cumpla con los requisitos previamente establecidos, es llevado a la etapa de mecanizado, en esta se realiza el proceso de torneado por arranque de viruta. En esta etapa el material obtiene las características técnicas que se han establecido con anterioridad, y como producto del desbaste se obtiene la limalla de hierro gris, que es un sub-producto que resulta del proceso de mecanizado de la pieza.

INDUSTRIAS LAVCO Ltda. está produciendo aproximadamente tres toneladas diarias de limalla de hierro gris o viruta, como resultado de la fabricación de camisas, anillos, pistones y otros repuestos para la industria automotriz y partes para el ensamble de maquinaria y equipos industriales, además de otras fabricaciones relacionadas con la industria metalmeccánica.

En la Figura 4, se observa el proceso de obtención de la limalla paso a paso.



Figura 4. Proceso de Obtención de la Limalla.

Fuente: Propia

6.1.5. Aditivos.

Su principal función es modificar las propiedades del concreto y el mortero, mejorando la plasticidad, dureza, resistencia y fraguado de sus materiales. De este modo ofrece: aditivos acelerantes y retardantes, aditivos impermeabilizantes, aditivos adherentes y mejoradores de resistencias, aditivos expansores y plastificantes, aditivos reductores de agua, incorporadores de agua, curadores y desencofrantes¹⁰.

Según el comité ACI-212, un aditivo se puede definir como un material distinto del cemento, agregados y agua, que se utiliza como ingrediente en concretos y se añade antes o durante su mezclado¹¹.

Los aditivos son utilizados para modificar las propiedades del concreto, adecuándolo a las condiciones de trabajo o por economía. La norma para los aditivos es la ASTM C-494 o en su defecto la norma NTC-1299.

¹⁰ <http://www.sika.com.co/>, visitada el 17 de Agosto de 2.010.

¹¹ Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del Mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 349p. 2001.

La siguiente clasificación de aditivos es según su función:

6.1.5.1 Aditivos acelerantes.

Material que se añade al concreto con la finalidad de reducir el tiempo de fraguado y acelerar el desarrollo temprano de resistencia.

Sin embargo, este proceso también se puede observar cuando es utilizado el cemento portland tipo III, por la reducción de la relación agua-cemento incrementando el contenido de cemento.

Una ventaja de utilizar este aditivo es que se reducen los tiempos de desencofrado, permitiendo el uso pronto de estructuras nuevas.

El acelerante más conocido es el de cloruro de calcio, pero también hay otros productos químicos que pueden acelerar la velocidad del fraguado del concreto, tales como carbonatos solubles, silicatos, filosilicatos, hidróxidos alcalinos.

La norma en la que se encuentra las especificaciones es la ASTM C-494.

6.1.5.2 Aditivos superplastificantes.

También llamados aditivos reductores de agua de alto rango, son sustancias químicas que al adicionarse a un concreto le imparten una alta manejabilidad o le proporcionan una reducción de agua mayor aún de lo que pueden generar los aditivos reductores de agua normales.

Su efecto tiene un lapso de tiempo relativamente corto, dura de 30 a 60 minutos, seguido de este lapso se presenta una rápida pérdida de la manejabilidad del concreto.

La norma en la que se encuentra las especificaciones es la ASTM C-494.

6.1.5.3 Aditivos retardantes.

Es un material usado para retardar la velocidad de fraguado del concreto.

Además de retardar el tiempo de fraguado en el concreto reduce al agua y trabaja como plastificante al mismo tiempo. Estos aditivos juegan un papel importante en climas cálidos.

La norma en la que se encuentra las especificaciones es la ASTM C-494.

6.1.5.4 Aditivos inclusores de aire.

Según el ACI es un aditivo que genera aire en el concreto, usualmente en pequeñas cantidades en forma de burbujas diminutas (aproximadamente de 1 mm de diámetro o más diminutas), esto sucede en el instante del mezclado y usualmente para aumentar la manejabilidad y la resistencia al congelamiento.

El ingrediente activo principal utilizado en los inclusores de aire es el alquilbenceno sulfonado o el óxido de polietileno; pero no es el único, pueden utilizarse también detergentes sintéticos, ácidos grasos y resinosos, sales de materiales proteicos entre otros.

La norma en la que se encuentra las especificaciones es la ASTM C-260.

6.1.5.5 Aditivos reductores de agua

Es un material usado para reducir la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia determinada o en debido caso para aumentar el asentamiento de la mezcla.

La composición química de estos aditivos usualmente es a base de ácidos lignosulfónicos, sales de ácidos carboxílicos hidroxilados, melaninas y polímeros hidroxilados.

La norma en la que se encuentra las especificaciones es la ASTM C-494.

6.1.5.6 Aditivos minerales

Son materiales empleados para mejorar la trabajabilidad de mezclas deficientes en partículas de tamaño menor, en particular las que pasan por los tamices No.50 y No.100, debido a que la finalidad de estos aditivos es reducir la exudación y la segregación, también mejora algunas propiedades como la resistencia y la durabilidad. Estos materiales pueden ser inertes químicamente o pueden ser puzolanas.

Las normas en la que se encuentran las especificaciones son: ASTM C-129, ASTM C-618 y ASTM C-311.

6.1.5.7 Otros aditivos

Se pueden ver otra clase de aditivos como lo son: Aditivos generadores de gas, aditivos para la adherencia, aditivos colorantes, fibras.

6.2. Investigaciones en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

En el presente ítem se destacaran algunos trabajos de grado que se han realizado con referencia al uso de agregados no convencionales en el concreto, esto con el fin de conocer y profundizar en temas relacionados con el desarrollo de este trabajo de grado.

6.2.1. Análisis del comportamiento mecánico de un concreto aligerado con la corteza que contiene las semillas del pino cupressun sempervirens.¹²

Este trabajo de grado se centró en la utilización de la corteza que contiene las semillas del pino cupressun sempervirens, el cual abunda en el municipio de San Andrés, Santander. El propósito fue diseñar una mezcla de concreto, con la adición de este material, reemplazando una cantidad de agregado grueso por este. La corteza que contiene las semillas del pino cupressun sempervirens ayudan a que el concreto se comporte como un tipo de concreto ligero, lo cual aligera el peso de cualquier estructura, y conserva las propiedades de resistencia de la mezcla de concreto. Este material tiene características especiales, como son: baja densidad, orgánico, morfología especial y abundante. Por último, este trabajo de grado determino el porcentaje óptimo que se debe adicionar al concreto de este material, para que se comporte como un concreto ligero y garantice las propiedades tanto mecánicas como físicas de este.

6.2.2. Análisis del comportamiento de cenizas volantes de las centrales termoeléctricas de Tasajero y Paipa IV como material cementante en la producción de concreto¹³

El objetivo principal de la implementación de este trabajo de grado, fue reemplazar el cemento por las cenizas volantes de dos centrales termoeléctricas del país para la elaboración de muestras de concreto. Además, se le adicionó a esta mezcla un aditivo conocido como Plastiment TM5 de sika, que es un plastificante retardante, y tiene como función reducir la cantidad de agua, y como efecto asociado la reducción de las cenizas volantes. El estudio arrojó que gracias a la implementación de las cenizas volantes en mezclas de concreto, aumenta su resistencia a la compresión en especímenes tanto de concreto como de mortero. Por último, este trabajo de grado determinó el porcentaje óptimo que se debe agregar a la mezclas de concreto y de mortero de cenizas volantes, para que conserve las propiedades físico – mecánicas, en su posterior utilización.

¹² DELGADO CAMPOS, Harol Fernando., y SANCHEZ QUIÑONEZ, Hector Mauricio. Análisis del comportamiento mecánico de un concreto aligerado con la corteza que contiene las semillas del pino cupressus sempervirens. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2005. 111h.

¹³ SÁENZ TORRES, Vladimir., y VILLAMIZAR SIERRA, Paola Andrea. Análisis del comportamiento de cenizas volantes de las centrales termoeléctricas de Tasajero y Paipa Iv como material cementante en la producción de concreto. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2005. 139h.

6.2.3. Análisis del comportamiento mecánico y económico de vigas de concreto con adiciones de PET reciclado¹⁴

Este trabajo de grado se enfocó en reemplazar una parte del agregado fino por PET (polietilenotereftalato) reciclado, el cual resulta del reciclado, trituración, limpieza y desinfección de botellas de gaseosa no retornables. Se hizo un diseño de mezcla para vigas de concreto, y se obtuvo que por la implementación de las fibras de PET reciclado, aumentando la resistencia a la flexión de las vigas y los costos de elaboración se reducían. Además se determinó el porcentaje óptimo que se debe adicionar en las mezclas de concreto para garantizar las propiedades de este mismo.

6.2.4. Análisis del comportamiento mecánico del concreto hidráulico para pavimentos utilizando las fibras de las hojas caulinares del Bambú o Guadua¹⁵.

En este trabajo de grado se realizaron pruebas y ensayos necesarios para analizar y valorar el comportamiento físico-mecánico del concreto cuando se le adiciona fibras de las hojas caulinares del bambú, con lo cual se ofrece una nueva herramienta en tecnología de concretos para el gremio de la construcción, mediante la cual se quiere beneficiar a los habitantes con escasos recursos y poblaciones rurales donde se encuentra fácilmente y con abundancia el bambú.

6.2.5. Aprovechamiento de Escombros como Agregados no Convencionales en Mezcla de Concreto¹⁶.

Este trabajo de grado consistió en desarrollar una metodología para el aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto. Se trabajó con diferentes proporciones tanto de agregado fino como de agregado grueso, estos fueron clasificados como escombros grueso, escombros fino y muestras de ladrillo trituradas manualmente en tamaños finos y gruesos. Con estos agregados se prepararon 4 tipos de mezclas y una mezcla considerada como testigo. La prueba de resistencia a la compresión mostró un aumento de la mezcla óptima elaborada con escombros cercano al 11% frente a la mezcla de concreto convencional. Por último, este trabajo de grado determinó la composición óptima de los agregados no convencionales en mezclas de concreto, para que conserve las propiedades físico – mecánicas, en su posterior utilización.

¹⁴ CAPACHO JAIMES, Hernán Darío. Análisis del comportamiento mecánico y económico de vigas de concreto con adiciones de PET reciclado. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2006. 97h.

¹⁵ PÉREZ CARRASCAL, Andrés Felipe. Análisis del comportamiento mecánico del concreto hidráulico para pavimentos utilizando las fibras de las hojas caulinares del bambú o guadua. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2004. 84h.

¹⁶ FERREIRA DÍAZ, Juan Sebastián. Aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2009. 117h.

6.2.6. Evaluación técnico-económica del uso del concreto reciclado en la construcción de obras civiles¹⁷.

Este trabajo de grado plantea utilizar concreto de desecho triturado como agregado reciclado. Se realizó ensayos y pruebas para conocer las características de los agregados reciclados. Se trabajó con tres diferentes tipos de mezcla que variaban en su composición de agregados así, (40% fino y 60% de grueso – 50% de fino y 50% de grueso – 60% de fino y 40% de grueso), estos concretos fueron sometidos a los esfuerzos de compresión, flexión y se les halló el módulo de elasticidad, con la particularidad que los dos últimos mencionados se encontró la dosificación óptima.

6.3. Investigaciones en otros lugares

Haciendo uso de la base de datos, a la cual tiene acceso los integrantes de la comunidad bolivariana, se realizó una detallada búsqueda de las investigaciones que se han hecho en otras ciudades del mundo, y se obtuvieron los siguientes artículos.

6.3.1. Study on the Strength Characteristics of SCC with GGBS and RHA as Mineral Admixtures¹⁸

Según el estudio realizado por los ingenieros civiles de la India, M. Swaroopa Rani, K. Jaganna Rao y M. V. Seshagiri Rao; el cual se basó en analizar las características del concreto autocompactante tanto en el estado fresco como en el estado endurecido, adicionado con minerales (ceniza de la escoria granulada de alto horno y la ceniza de la cáscara de arroz). Cabe anotar que el concreto autocompactante, es aquel que puede ser colocado y compactado en virtud de su propio peso, sin necesidad de aplicar vibración.

El estudio se basó en reemplazar el cemento por la ceniza de escoria granulada de alto horno, y se encontró que esto ayuda al aumento de la resistencia a la compresión, que el módulo de elasticidad es mayor, que prolonga el tiempo de fraguado, que su implementación en cuanto a costos es menor, y se determinó los porcentajes óptimos que se deben adicionar para cumplir con las anteriores propiedades de las mezclas de concreto.

6.3.2. Experimental Evaluation of Corrosion Rate of Rebars in M25 Concrete with Water Proofing Admixture¹⁹

¹⁷ MUÑOZ URIBE, Jaime., y SARMIENTO COLMENARES, León Rodolfo. Evaluación técnico-económica del uso del concreto reciclado en la construcción de obras civiles. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2005. 98h.

¹⁸ JAGANNA RAO, K., SESHAGIRI RAO, M. V., y SWAROOPA RANI, M. Study on the Strength Characteristics of SCC with GGBS and RHA as Mineral Admixtures. Bases de datos de artículos de investigación. [base de datos en línea]. The IUP Journal of Structural Engineering, Vol. III, No. 3, 2010. [consultado 19 ago. 2010]. Disponible en <<http://search.ebscohost.com/>>

¹⁹ JAYABALAN, P., MANOHARAN, R., y PALANISAMY, K. Experimental Evaluation of Corrosion Rate of Rebars in M25 Concrete with Water Proofing Admixture. Bases de datos de artículos de investigación. [base de datos en línea]. International Journal of Applied Engineering Research. Vol. IV, No. 6, 2009. [consultado 19 ago. 2010]. Disponible en <<http://search.ebscohost.com/>>

Según las pruebas realizadas por los ingenieros civiles de la India, R. Manoharan, P. Jayabalan y K. Palanisamy; estudiaron el comportamiento de la corrosión de la barras de refuerzo a través de la adición de sustancias en el proceso de mezclado del concreto, con el fin de dar durabilidad a las barras de refuerzo, que son indispensables en la construcción de cualquier obra civil.

El estudio se enfocó en hacer diferentes pruebas para el control de la corrosión, entre las cuales se encuentran, tratamiento superficial del acero a través de pinturas epóxicas, revestimiento de la superficie de hormigón, mejoramiento de las propiedades del agua y la protección catódica. Entre los métodos anteriores, el que mejor arrojó resultados fue el mejoramiento de las propiedades del agua con la adición de una sustancia denominada Conplast X421 IC, la cual se adiciona a la hora del mezclado del concreto. Este aditivo tiene como finalidad reducir la velocidad de corrosión en las varilla de refuerzo, gracias a que se agrega en el proceso de elaboración de mezclas de concreto.

6.3.3. Durability of Fly Ash Concrete to Chloride Ingress²⁰

Esta investigación fue realizada por los ingenieros civiles de la India, Thilgavathi S., Dhinakaran G. y Venkataramana J.; los cuales se centraron en mejorar las condiciones de permeabilidad del concreto, cuando se encuentra expuesto al agua y ambientes marinos, pues el mantenimiento de estas estructuras tiene en muchos casos un valor mayor a los iniciales.

Para lograr esto, le agregaron al concreto aditivos puzolánicos (humo de sílice, metacaolín, cenizas volantes), y adecuaron la relación agua cemento de la mezcla de concreto. Con este estudio, se concluyó que el uso de aditivos puzolánicos mejoran las propiedades de permeabilidad del concreto, además mantiene la resistencia a la compresión a la cual fue diseñada la mezcla y se determinó el porcentaje óptimo que se debe adicionar a las mezclas de concreto, para controlar los agentes externos a los cuales está expuesta.

6.4. Concreto.

El concreto es una masa heterogénea constituida básicamente por agregados, cemento portland, agua, aire y en algunas ocasiones aditivos que una vez endurecida tiene características de soportar grandes esfuerzos de compresión.²¹

6.4.1. Propiedades del Concreto Fresco²²

Las propiedades en estado fresco del concreto deben permitir que se llenen adecuadamente las formaletas y los espacios alrededor del acero de refuerzo,

20 THILGAVATHI, S., DHINAKARAN, G., y VENKATARAMANA, J. Durability of Fly Ash Concrete to Chloride Ingress. Bases de datos de artículos de investigación. [base de datos en línea]. The IUP Journal of Structural Engineering, Vol. III, No. 3, 2010. [consultado 19 ago. 2010]. Disponible en <<http://search.ebscohost.com/>>

21 Díaz Posada, María Claudia. Elaboración del contenido virtual de la asignatura materiales de construcción apoyado en el software learningspace. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga. 2005.

22 IDEM

así como obtener una masa homogénea sin grandes burbujas de aire o agua atrapada.

Las siguientes son las principales propiedades del concreto en estado fresco.

6.4.1.1 Trabajabilidad o Manejabilidad

Es la capacidad que tiene el concreto para ser colocado y compactado apropiadamente sin que se produzca segregación alguna. La trabajabilidad está representada por:

La compacidad. Es la facilidad que tiene el concreto o mortero fresco, para reducir el volumen de vacíos y por lo tanto el aire atrapado.

La cohesividad. Es la aptitud que tiene el concreto o mortero fresco para mantenerse como una masa estable y sin segregación.

La plasticidad. Es la condición del concreto fresco que le permite deformarse continuamente sin romperse.

La Consistencia o movilidad. Es la habilidad del mortero y concreto fresco para fluir, es decir, la capacidad de adquirir la forma de los encofrados que lo contienen.

6.4.1.2 Segregación o vaciado del concreto

Es la tendencia de separación de las partículas gruesas, esto por su falta de cohesividad, con lo cual su distribución y comportamiento deja de ser uniforme y homogéneo.

Las principales causas de segregación que se presentan son: la diferencia de densidades entre sus componentes, el tamaño y forma de las partículas y la distribución granulométrica, pueden influir otros factores como: un mal mezclado, un inadecuado sistema de transporte, una colocación deficiente y un exceso de vibración en la compactación.

6.4.1.3 Exudación o Sangrado

Es una forma de segregación o sedimentación, en la cual parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie de una mezcla de concreto recién colocado. Esto obedece a que los constituyentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua cuando se asientan durante el proceso de fraguado.

La exudación del concreto está influenciada por las proporciones de la mezcla y las características de los materiales, el contenido de aire, el uso de aditivos convencionales o minerales y particularmente por la angularidad y gradación del agregado fino.

6.4.1.4 Contenido de aire

Este elemento está presente en todos los tipos de concreto, localizado en los poros no saturables de los agregados y formando burbujas entre los componentes del concreto, bien sea porque es atrapado durante el mezclado o al ser intencionalmente incorporado por medio del uso de agentes inclusores, tales como cementos o aditivos incorporadores de aire.

6.4.1.5 Contenido de agua

El contenido de agua es un factor determinante para el desempeño del concreto. Para determinar si las variaciones de las propiedades son debidas a cambios en el contenido de agua, es importante asegurar que la cantidad real de agua es la estipulada en el diseño.

6.4.1.6 Proceso de Fraguado

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla.

Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.²³

6.4.1.7 Contracción Plástica

Los cambios volumétricos producidos durante el fraguado, se manifiestan por la aparición de fisuras y son debidas a una reducción en el volumen del sistema (cemento más agua), causado tanto por el inicio del proceso de hidratación como por la pérdida de agua de mezclado por evaporación.

Este proceso ocurre con más frecuencia en superficies horizontales en donde la relación volumen/área es baja, también en condiciones climáticas no favorables (alta velocidad del viento, alta temperatura y baja humedad del medio ambiente), al igual que por exceso en la manipulación del concreto durante la colocación, compactación y acabados.

²³ <http://www.arqhys.com/construccion/concreto-fraguado.html>

6.4.2. Propiedades del Concreto Endurecido

6.4.2.1 Resistencia a la Compresión²⁴

Es la principal característica mecánica del concreto, se puede definir como la máxima resistencia hallada de un modelo de concreto a carga axial. Por lo general se expresa en Mega Pascales (MPa) a una edad de 28 días, se le identifica con el símbolo f_c . Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas en modelos de concreto, pueden ser cilindros, cubos y prismas, a este tipo de pruebas se les denominan pruebas destructivas.

Ensayo de Cilindros de Concreto: Es el ensayo más utilizado para realizar las pruebas a compresión del concreto, consiste en realizar unas muestras testigos (forma cilíndrica) con una relación diámetro - altura 1:2, respectivamente. Las especificaciones de este ensayo se encuentran en las normas NTC 550 y 673, en estas se habla de la fabricación de los especímenes y del ensayo de resistencia a la compresión, respectivamente.

En el ensayo de resistencia a la compresión, se deriva también la determinación del módulo de elasticidad del concreto, el cual se rige por la norma NTC 4025. En este ensayo se busca obtener el valor del módulo en el rango elástico del concreto, de tal manera que para el análisis de estructuras es la propiedad, que además de la resistencia a la compresión, proporciona un valor de alta importancia en estos procedimientos.

6.4.2.2 Resistencia a la Flexión²⁵

Se denomina Módulo de ruptura (f_R), se puede evaluar por medio del ensayo a flexión de viguetas de concreto simple de 50 cm de longitud y sección cuadrada de 15 cm de lado, con cargas aplicadas en los tercios de la luz. Elaboradas y curadas con las especificaciones que se encuentran en la norma ASTM C-192 y C-31.

La resistencia a la flexión es utilizada por lo general para diseñar pavimentos, pero también es importante para los demás tipos de estructuras.

²⁴ Características del Concreto. En: Resistencia. [en línea]. [consultado 25 agosto 2010]. Disponible en <<http://www.construaprende.com/t/02/T2Pag8.php>>

²⁵ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Sede Manizales. Dirección Nacional de Servicios Académicos Virtuales. Concreto estructural. En: Composición del Concreto Simple. [en línea]. [consultado 25 agosto 2010]. Disponible en <<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%203/COMPOSICION%20DEL%20CONCRETO%20SIMPLE.htm>>

6.4.2.3 Resistencia a la Tracción²⁶

El concreto es bastante débil a esfuerzos de tracción, esta propiedad por lo general no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras normales. La tracción hace referencia a todo lo relacionado con el agrietamiento del concreto, a causa de la contracción inducida por el fraguado o por los cambios de temperatura, ya que estos factores generan esfuerzos internos de tensión.

²⁶ Características del Concreto. En: Resistencia. [en línea]. [consultado 25 agosto 2010]. Disponible en <<http://www.construaprende.com/t/02/T2Pag8.php>>

7. ENSAYOS DE LABORATORIO.

En este capítulo se describen los ensayos y pruebas que se realizaron a los agregados convencionales, a la limalla de hierro gris, al concreto en estado fresco y endurecido; con el fin de obtener valores que serán utilizados en la selección de los porcentajes de limalla de hierro gris, en el diseño de mezcla, en la determinación del módulo de elasticidad estático de muestras de concreto y en la resistencia a la compresión de dichas muestras.

7.1. Pruebas Preliminares

La Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, a través de la Ingeniera Claudia Patricia Retamoso Llamas, en el transcurso de los últimos años ha buscado mejorar la resistencia a la compresión de muestras de concreto, por medio de convenios establecidos con diferentes industrias de la región (PREVESA Ltda., DANA TRANSEJES S.A.)

Para el desarrollo del presente trabajo de grado se realizó un acuerdo con INDUSTRIAS LAVCO Ltda., para que está suministrara la limalla de hierro gris con la cual se iba a realizar las muestras que se habían establecido, por consiguiente se desconocía en ese momento cual iba sería el porcentaje de limalla que se debía adicionar a las mezclas de concreto, para obtener la mayor resistencia a la compresión en dichas muestras, por lo anterior se decidió elaborar una serie de muestras, para determinar el porcentaje de limalla que mejorara las propiedades de las mezclas de concreto.

Se elaboraron 120 muestras de concreto diseñadas para que resistan un esfuerzo de 21 MPa, distribuidas en 6 tipos de mezclas. En esta primera fase, estas mezclas iban variando su porcentaje de agregado grueso y agregado fino en cada una ellas, pero manteniendo su porcentaje de limalla de hierro gris constante.

Se trabajó con 5 porcentajes de limalla de hierro gris diferentes (3, 4, 8, 12 y 20), además de esto, se elaboró una serie de mezclas de concreto convencionales, es decir, sin limalla de hierro gris, para realizar la respectiva comparación con respecto al esfuerzo al cual fueron sometidas cada una de las mezclas de concreto tanto convencionales como con porcentaje de limalla de hierro gris, en las distintas edades (7, 14 y 28 días) en la que se realizó este procedimiento.

De esta primera fase se determinó, que el porcentaje de limalla de hierro gris que arrojó los mejores resultados en comparación a las mezclas convencionales fue el 4%, además esta etapa sirvió también para conocer que entre más cantidad de agregado grueso tenga la mezcla de concreto, mejor se comporta esta, aunque cabe anotar que es hasta un cierto porcentaje, pues según los resultados que se obtuvieron este porcentaje se encuentra entre el 70 – 80% de agregado grueso.

7.2. Caracterización de los Agregados Convencionales y no Convencionales

Para la elaboración de las muestras de concreto adicionadas con limalla de hierro gris, el material a caracterizar estaba conformado por agregado fino o arena proveniente de Bocas; agregado grueso o triturado proveniente del río Pescadero; cemento Holcim Boyacá Tipo 1; y limalla de hierro gris suministrada por la INDUSTRIAS LAVCO Ltda.

Para la realizar la respectiva caracterización de los materiales que se van a utilizar para elaborar muestras de concreto adicionadas con limalla de hierro gris, se siguieron las normas INVIAS del año 2007 y las Normas Técnicas Colombianas (NTC), las cuales establecen los procedimientos a seguir para la elaboración de los ensayos que se deben hacer a los agregados que van a ser utilizados en mezclas de concreto.

Es importante anotar que en las normas anteriormente mencionadas no existen procedimientos para la caracterización de la limalla de hierro gris, debido a que este no es un agregado convencional. A continuación, se describe brevemente el procedimiento que se llevo a cabo en la realización de la caracterización de los agregados tanto convencionales como no convencionales, es importante anotar que cada ensayo se hizo tres veces, con el fin de obtener datos y resultados representativos de las muestras trabajadas.

7.2.1. Densidad del Cemento

El cemento Holcim Boyacá Portland tipo I fue el utilizado para realizar este ensayo, que se encuentra descrito en la norma INVIAS E – 307 – 07 y la NTC - 221. Para poder realizar este procedimiento es indispensable contar con el frasco patrón de Le Chatelier y con kerosene (ACPM) libre de agua.

El ensayo comienza con la adición del ACPM hasta un volumen comprendido entre 0 y 1 ml, luego se sumerge el frasco de Le Chatelier en un baño de agua, a una temperatura determinada, y se deja reposar el frasco dentro del baño de agua por un tiempo, para que la temperatura del conjunto se unifique. Seguido a esto, se debe agregar el cemento Holcim Boyacá Portland tipo I, en pequeñas cantidades, evitando que este se adhiera a las paredes del frasco. Después se coloca el tapón al frasco, con el fin de sacar el aire que se encuentra atrapado dentro de la mezcla cemento – ACPM.

Por último, se realizan las lecturas correspondientes y se procede a calcular la densidad del cemento, con la siguiente fórmula:

$$Densidad = \frac{MasadelCemento(gr)}{VolumenDesplazado(cm^3)} \text{ Ecuación 7.1.}$$

7.2.2. Análisis Granulométrico de los Agregados

Este ensayo se realiza tanto a los agregados finos como a los gruesos, y se necesita contar como herramienta fundamental una serie de tamices, la norma que describe este procedimiento es la INVIAS E – 213 – 07 y la NTC – 77.

Como primera medida para la realización de este ensayo, se deben tomar muestras representativas de los agregados finos y gruesos, a través del cuarteo manual con el fin de obtener una cantidad considerable de material, la cual se utilizará en los posteriores ensayos que se deben realizar para poder caracterizar los agregados.

Las muestras se secan al horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, y se determina su masa.

Se lavan las muestras sobre el tamiz No. 200, y se vuelven a ingresar al horno para que se sequen, y se determina otra vez su masa.

El procedimiento anterior se realiza con el objetivo de conocer la cantidad de material fino que pasa a través del tamiz No. 200. A continuación, se procede a pasar las muestras por una serie de tamices dependiendo del agregado con el que se está trabajando, y por último se pesa la masa de agregado que queda retenida en cada uno de los tamices con los que se realizó el ensayo.

7.2.3. Determinación de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables en los Agregados.

Este ensayo se realiza tanto a los agregados finos como a los gruesos, y se necesita contar con una serie de tamices. La norma que describe este procedimiento es la INVIAS E – 211 – 07 y la NTC – 589.

Se determina la masa de la muestra teniendo como base los parámetros establecidos en la norma que se citó anteriormente. Seguido a esto, se deja la muestra en agua durante un periodo de 24 ± 4 horas. Después de este periodo de inmersión, se procede a rodar y apretar individualmente las partículas entre el dedo pulgar y el índice tratando de romperlas en tamaños más pequeños. Luego, a través del tamizado en húmedo se separan las partículas de menor tamaño de la parte restante.

Por último, se remueven las partículas retenidas en los tamices y se introducen en el horno, para su respectivo secado.

7.2.4. Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas Usadas en la Preparación de Morteros o Concretos.

Para poder realizar este ensayo, es indispensable tener una solución de hidróxido de sodio al 3% y la carta colorimétrica de Gardner o también

conocida como los vidrios de colores de referencia; la norma que describe este procedimiento es la INVIAS E – 212 – 07 y la NTC – 127.

El ensayo empieza colocando una muestra de arena con un volumen de aproximadamente 130 ml dentro de un frasco de vidrio. Después de esto, se añade la solución de hidróxido de sodio al 3% hasta completar un volumen después de agitado el frasco de aproximadamente 200 ml. Luego se tapa el frasco, se agita y se deja en reposo durante un periodo de 24 horas. Por último, se compara el color de la solución que sobrenada con la carta colorimétrica de Gardner, como se observa en la Figura 5.



Figura 5. Comparación con la carta colorimétrica de Gardner

Fuente: propia

7.2.5. Gravedad Específica y Absorción de Agregados Gruesos.

Este ensayo requiere como herramienta fundamental para su desarrollo una canastilla metálica; la norma que describe el procedimiento de este ensayo es la INVIAS E – 223 – 07 y la NTC – 176.

El ensayo empieza con el tamizado de la muestra retenida sobre la malla No. 4, seguido a esto, se sumerge la muestra en agua por un periodo de 24 horas. Luego de la inmersión, se secan las partículas rodándolas sobre una toalla hasta que su superficie este eliminada de agua, en este momento se registra el peso de la muestra, la cual se encuentra saturada con superficie seca. Después se sumerge la muestra en el interior de la canastilla metálica, y se procede a registrar este peso, acá la muestra se encuentra en condición saturada. Por último, se seca la muestra en el horno y se determina su masa, acá la muestra se encuentra totalmente seca.

7.2.6. Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos.

Este ensayo requiere como herramienta fundamental para su desarrollo un picnómetro y un molde cónico con su respectivo pisón; la norma que describe el procedimiento de este ensayo es la INVIAS E – 222 – 07 y la NTC – 237.

El ensayo empieza con el tamizado de la muestra que pasa sobre la malla No. 4, seguido a esto, se sumerge la muestra en agua por un periodo de 24 horas. Luego de la inmersión, la muestra se debe dejar secar sobre una superficie no absorbente por medio de una corriente de aire. Posterior a este proceso, se debe comprobar que la muestra se encuentre en condición saturada y superficialmente seca, a través del uso del molde cónico con su pisón, este procedimiento se realiza llenado el molde cónico con la muestra en estudio y compactándolo con 25 golpes por medio del pisón, si al levantar el molde el material fino se desmoronaba parcialmente el material se encuentra en esta condición.

Después se llena la tercera parte del volumen del picnómetro con agua, observar Figura 6, y se introduce en él 500 ± 10 gr de la muestra trabajada. Luego, se llena el picnómetro con agua, y se procede a eliminar las burbujas atrapadas en este conjunto, seguido a esto, se registra el peso del picnómetro, la muestra y el agua contenida. Por último, se remueve todo el agregado fino del picnómetro y se seca al horno, después se registra el peso de la muestra luego del secado, y se procede a realizar los correspondientes cálculos.



Figura 6. Picnómetro con la muestra de arena

Fuente: propia

7.2.7. Resistencia al Desgaste de los Agregados por Medio de la Máquina de los Ángeles

Para el desarrollo de este ensayo es indispensable contar con la máquina de los ángeles, ya que en gran parte esta se encarga del desarrollo del ensayo; la norma que describe este proceso es la INVIAS E – 218 – 07 y la NTC – 98.

Luego de tener la granulometría del agregado grueso, se determina la gradación más cercana a la que establece la norma, la cual nos determina la carga abrasiva y las cantidades de material que se deben incorporar en la máquina de los ángeles. Después de esta determinación, se coloca tanto la muestra como la carga abrasiva en la máquina de los ángeles, la cual debe girar hasta completar 500 giros con una revolución de 30 a 33 r.p.m. Una vez cumplido esto, se separa el material haciendo uso del tamiz No. 12, y se procede a realizar los cálculos correspondientes.



Figura 7. Máquina de los Ángeles

Fuente: Propia



Figura 8. Esferas de Carga Abrasiva

Fuente: Propia

En las Figura 7 y Figura 8, se observa la máquina de los ángeles y las esferas que aportan la carga abrasiva, respectivamente. En este equipo se realiza el ensayo especificado en esta sección.

7.2.8. Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos de los Agregados

Para el desarrollo de este ensayo es indispensable contar con un molde metálico y su respectiva varilla compactadora. Es importante anotar que este ensayo cuenta con dos modalidades, que son la masa unitaria suelta y la masa unitaria compacta, y se realiza tanto para el agregado grueso como para el fino; la norma que describe este proceso es la INVIAS E – 405 – 07 y la NTC – 92.

Para las dos modalidades el ensayo comienza determinando el peso y el volumen del molde metálico. Para hallar la masa unitaria suelta, la muestra se debe dejar caer desde una misma altura hasta que llene el molde, y seguido a esto se pesa este conjunto. Para hallar la masa unitaria compacta, el molde se debe llenar en tres capas iguales, y cada capa se compacta por medio de 25 golpes; por último se determina el peso de este conjunto, y se procede a realizar los respectivos cálculos.



Figura 9. Masa Unitaria Agregado Fino.

Fuente: Propia



Figura 10. Masa Unitaria Agregado Grueso

Fuente: Propia

7.2.9. Humedad Natural de los Agregados.

Con este ensayo se determina la humedad natural de los agregados tanto convencionales como no convencionales, y la norma que rige el procedimiento de este ensayo es la INVIAS E – 135 – 07.

Este ensayo comienza con la selección de las muestras de los agregados tanto convencionales o no en su estado natural, y se registra la masa de estos. Luego, se coloca a secar los agregados en el horno a una temperatura comprendida entre $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Después se retiran las muestras del horno y se dejan enfriar para posteriormente determinar su masa. La humedad natural se determina con la siguiente fórmula:

$$\text{Humedad}(\%) = \frac{\text{Masa del Agua}(\text{gr})}{\text{Masa del Suelo Seco}} \quad \text{Ecuación 7.2.}$$

En la Figura 11 se observa el horno y la recolección de las muestras para obtener el resultado de la humedad de los agregados.



Figura 11. Horno y Muestra para Humedad.

Fuente: Propia.

7.2.10. Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos.

Una solución tipo Stock y un tubo irrigador son las herramientas indispensables para poder desarrollar con éxito este ensayo; la norma que describe este procedimiento es la INVIAS E – 133 – 07.

El ensayo de equivalente de arena comienza con la preparación de la muestra, la cual debe pasar por el tamiz No. 4, y se selecciona un volumen aproximado de 85 ml. Luego a esto, se vierte la solución tipo Stock (cloruro de calcio) en una probeta. Después, con la ayuda de un embudo se agrega la muestra a esta solución, se golpea suavemente el fondo de la probeta, con el fin de liberar las burbujas de agua que se encuentran atrapadas, y se deja reposar la muestra durante 10 ± 1 minuto.

Después del proceso de reposo, se tapa la probeta con un tapón y se procede a aflojar el material que se encuentra en el fondo, invirtiendo parcialmente la probeta y agitándolo simultáneamente. Seguido a esto, se coloca la probeta en el agitador mecánico, como se observa en la Figura 12 alrededor de 45 ± 1 segundo. Después, se debe colocar el cilindro graduado en una mesa en posición vertical y se retira el tapón. Por último se realiza el proceso de irrigación, el cual consiste en insertar el tubo irrigador dentro de la probeta, se afloja la pinza de la manguera y se lava el material que está en las paredes de la probeta, y a medida que se baja el tubo irrigador se aplica suavemente una presión y se va girando hasta alcanzar el fondo del material. Se deja en reposo la probeta alrededor de 20 minutos, y se procede a realizar las respectivas lecturas de arcilla y arena.

Para obtener el equivalente de arena, se hace uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Equivalente de Arena}(\%) = \frac{\text{Lectura Arena}(ml)}{\text{Lectura Arcilla}(ml)} \quad \text{Ecuación 7.3.}$$



Figura 12. Agitador mecánico para el ensayo de equivalente de arena.
Fuente: propia

7.2.11. Densidad de la Limalla Fina.

El ensayo que se describe a continuación fue uno de los pocos que se le practicó a la limalla fina, debido a que no es un agregado convencional, entonces no existen Normas o Guías que permitan realizar una sobresaliente caracterización. Aunque la limalla fina se catalogó en este trabajo de grado como agregado fino, no se le pueden realizar los mismos ensayos que se practicaron a la arena, debido a que no se encuentran procedimientos que expliquen cómo obtener determinada característica.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, a la limalla fina se le hizo el ensayo de densidad, utilizando el principio de Arquímedes, el cual se basa en

conocer una determinada masa de material y observar el volumen desplazado por el efecto de introducir esta masa en un recipiente adecuado para realizar esta prueba, como se observa en la Figura 13. La densidad de la limalla fina, se determina haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad Limalla Fina} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{\text{Masa Limalla Fina}(\text{gr})}{\text{Volumen Desplazado}(\text{cm}^3)} \quad \text{Ecuación 7.4.}$$



Figura 13. Probeta con limalla de hierro gris

Fuente: propia

7.2.12. Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados

Para poder realizar este ensayo, la muestra con la que se trabaja debe estar en las condiciones que se indican en el ensayo de análisis granulométrico, y la norma que rige el procedimiento que se emplea es la INVIAS E – 227 – 07.

El ensayo de porcentaje de caras fracturadas empieza seleccionando las muestras que requiere la norma, dependiendo de las características obtenidas en el ensayo de análisis granulométrico, y se determina la masa de cada una de estas muestras. Seguido a esto, las muestras se extienden sobre una superficie, y se empieza a examinar cuales partículas están trituradas (quebradas, ásperas, angulares) por efecto de medios artificiales, y se determina su masa.

7.2.13. Índice de Aplanamiento y Alargamiento de los Agregados

Para poder realizar este ensayo, la muestra con la que se trabaja debe estar en las condiciones que se indican en el ensayo de análisis granulométrico; además de esto, se debe contar con dos calibradores metálicos (uno de ranuras para espesores, y el otro de barras para longitudes); la norma que rige el procedimiento que se emplea es la INVIAS E – 230 – 07.

El ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento empieza seleccionando las muestras que requiere la norma, dependiendo de las características obtenidas en el ensayo de análisis granulométrico, y se determina la masa de cada una de estas muestras. Seguido a esto, las muestras se extienden sobre una superficie, y se hacen pasar por los diferentes calibradores metálicos, dependiendo del ensayo que se quiera realizar, ya sea el índice de alargamiento ó el índice de aplanamiento. Después, se registra el valor de la masa de las partículas que pasaron por cada uno de los calibradores y se procede a realizar los cálculos respectivos.



Figura 14. Calibradores Metálicos de índices de alargamiento y aplastamiento.

Fuente: Propia

7.3. Ensayos al Concreto en Estado Fresco

7.3.1. Asentamiento del Concreto (Slump)

El ensayo de asentamiento del concreto debe tener como herramienta fundamental el cono de Abrams con su respectiva varilla compactadora, la norma que describe este procedimiento es la INVIAS E – 404 – 07 y la NTC – 396.

El ensayo inicia humedeciendo el cono de Abrams y se coloca sobre una superficie plana. Luego, se sujeta el cono por medio de los pies y se llena con la muestra de concreto en tres capas iguales, compactando cada capa con 25 golpes haciendo uso de la varilla compactadora; en la última capa se llena el cono por encima de su capacidad. Después, se procede a enraizar el cono de Abrams, y seguido a esto, se remueve el concreto que rodea la base del cono, y se retira este, alzándolo cuidadosamente en dirección vertical. Por último, se determina la diferencia de altura entre el borde superior del cono y el centro original de la parte superior del espécimen.

Esta prueba se realizó 60 veces, debido a que cada día de elaboración de los cilindros se tuvo que comprobar el respectivo asentamiento para poder utilizar la mezcla de concreto. Como se elaboraron cilindros para ser fallados a los 7,14 y 28 días de diferentes mezclas, entonces se requiere utilizar este ensayo.



Figura 15. Ensayo de asentamiento a través del cono de Abrams

Fuente: propia

7.3.2. Elaboración y Curado de Muestras de Concreto

El ensayo de elaboración de muestras de concreto debe tener como equipo fundamental moldes cilíndricos reutilizables con su respectiva varilla compactadora, la norma que describe este procedimiento es la INVIAS E – 402 – 07 y la NTC – 550.

El ensayo empieza con la adecuación de los moldes cilíndricos o formaletas, las cuales se deben encontrar limpias, apretadas y aceitadas, para evitar que el concreto se adhiera al molde. Después de preparar la mezcla de concreto adicionada o no con limalla fina, se procede a llenar el molde cilíndrico en tres capas iguales, compactando cada capa por medio de 25 golpes con la varilla compactadora, y suministrándole a cada capa golpes con un martillo de goma alrededor de la formaleta. Cuando se está elaborando la última capa, es necesario agregar una cantidad mayor de mezcla a esta, por cuanto en el proceso de compactación y los golpes del martillo de goma, pueden ocasionar que la mezcla se asiente.

Posteriormente se procede a enrazar el molde cilíndrico, retirando la mezcla que sobresale de los bordes del molde. Luego, se empareja el espécimen que se elaboró a través de un palustre. Después, se ubica la muestra en una superficie plana, donde no vaya a estar expuesta a los rayos del sol, a vibraciones, a la lluvia y a todas aquellas situaciones que puedan alterar el normal desarrollo de la resistencia de la muestra, la cual debe permanecer en este estado durante un periodo de 24 horas.

Por último, se procede a desencofrar las muestras y se depositan en la pileta de curado, como se observa en la Figura 16, la cual debe estar saturada con hidróxido de calcio (cal) para garantizar las propiedades químicas del concreto.

Es importante aclarar que se elaboraron 285 cilindros de concreto, los cuales se dividieron en 3 grupos para realizar la respectiva fundida, cada grupo representa la edad a la cual se deben someter los especímenes a la máquina de resistencia.

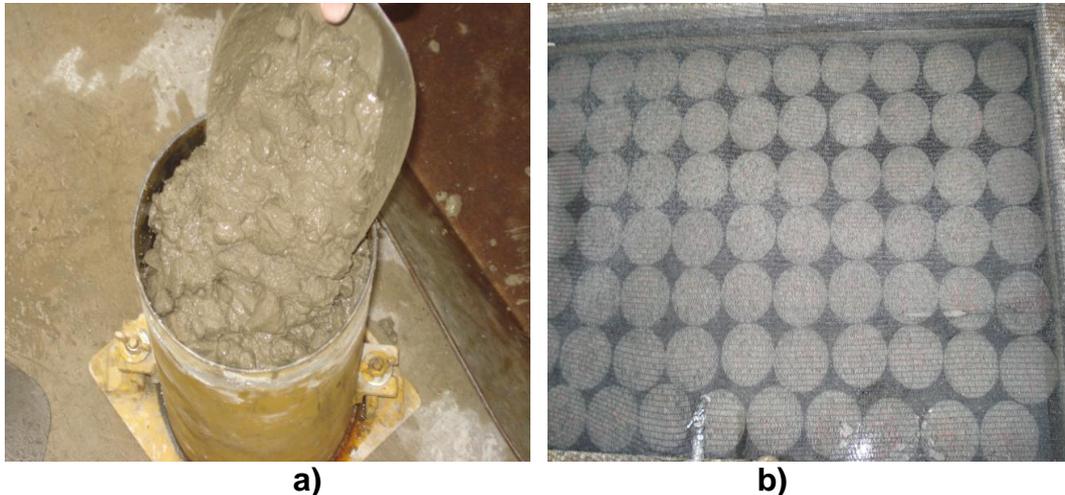


Figura 16. Procedimiento para la elaboración y curado de los cilindros de concreto, a) curado de las muestras, b) elaboración de especímenes

Fuente: propia

7.4. Ensayos al Concreto en Estado Endurecido

7.4.1. Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto

Para la realización de este ensayo es indispensable contar con la máquina que mide la resistencia de cilindros de concreto, y la norma que explica este procedimiento es la INVIAS E – 410 – 07 y la NTC – 673.

Para realizar este ensayo, se debe preparar inicialmente los cilindros de concreto, los cuales deben ser retirados de la pileta de curado, y dejar secar a la temperatura ambiente alrededor de 1 hora. Luego, se registra el diámetro de cada espécimen, midiendo tres veces en diferente posición, como también se registra la altura del cilindro, midiendo cuatro veces en posiciones diferentes; además se registra su peso haciendo uso de la balanza.

Después se coloca el cilindro de concreto con casquetes de neopreno en la cara inferior y superior en la máquina, que se observa en la Figura 17, que mide la resistencia, y se aplica carga a este, teniendo en cuenta los parámetros exigidos por la norma, y por último se registra el valor de la carga que fue aplicada al espécimen.

Esta prueba mecánica se realizó 285 veces, pues esa fue la cantidad de cilindros de concreto que se elaboraron para este trabajo de grado.



Figura 17. Ensayo de Compresión

Fuente: propia

7.4.2. Determinación del módulo de elasticidad estático

Para determinar el módulo de elasticidad estático de cilindros de concreto es necesario tener un compresómetro y deformímetros. La norma que describe este procedimiento es la norma técnica colombiana NTC – 4025.

Los cilindros se deben encontrar con sus dimensiones (diámetro y altura) ya establecidas, como también su peso. Luego de esto, se coloca el compresómetro en el espécimen, como se muestra en la Figura 18, y se lleva a la máquina de resistencia. Previamente a este paso, se debe conocer cuál fue la carga máxima que resistió o que resistieron los cilindros testigos de las mismas características en cuanto a la mezcla, debido a que los cilindros de concreto que se le realiza este procedimiento deben ser sometidos hasta el 40% de su resistencia máxima, y esto se hace a través de una carga uniforme y constante que se aplica, y se va registrando la deformación que presenta el espécimen cada 20 KN de fuerza aplicada por la máquina de resistencia.

Este ensayo se realizó a 55 cilindros de concreto, es importante aclarar que esta prueba se le aplicó a los especímenes de 28 días solamente.



Figura 18. Cilindro de concreto con el compresómetro

Fuente: propia

8. DISEÑO DE MEZCLA

El método utilizado en el presente diseño tiene como base los procedimientos del American Concrete Institute elaborado por el Comité ACI 211 y el de la Road Note Laboratory (RNL).

El método americano ACI es el más conocido y ampliamente usado. Se centra fundamentalmente en el principio de la relación agua/cemento desarrollado por Abrams. Consiste en seguir en forma ordenada una secuencia de pasos y determinar la cantidad de cada material en peso y en volumen, para un (1) m³ de concreto.

El objetivo que se quiere alcanzar en el diseño de mezclas de concreto es determinar la combinación más práctica y económica de materiales disponibles para producir un concreto que satisfaga sus requerimientos bajo condiciones particulares de uso.

Una mezcla se debe diseñar tanto para estado fresco como para estado endurecido. Cabe resaltar que las propiedades que se deben cumplir para lograr la dosificación en el estado fresco son la maleabilidad y economía, y para el estado endurecido son la resistencia, durabilidad y acabado.

El diseño de mezcla se elaboró para tres porcentajes de limalla de hierro gris diferentes, y para cada porcentaje se diseñaron cinco mezclas distintas, además se realizó el diseño de cinco mezclas diferentes para los especímenes de concreto convencionales (sin adición de limalla de hierro gris).

En el diseño de mezcla propuesto por la Road Note Laboratory (RNL) que utiliza un método gráfico para determinar el porcentaje de agregado grueso y fino a utilizar dependiendo de las propiedades permitidas por la normativa, es importante aclarar que en este trabajo como se realizaron diferentes mezclas con masas unitarias específicas dependiendo de la mezcla desarrollada, no se utilizó el método gráfico, solamente se determinó la cantidad de agua y de cemento a utilizar en la mezcla, así como se desarrolla la del RNL.

Es importante anotar que el procedimiento que se siguió para el desarrollo del diseño de mezcla es el que se encuentra expuesto en el comité ACI 211.

En la Figura 19, se observan los pasos a desarrollar en el diseño de mezcla, con las modificaciones realizadas al Road Note Laboratory (RNL), con el procedimiento que se siguió en el Trabajo de Grado. En este capítulo, se muestran todas las normas que se siguen para este diseño particular, el cual se explica paso a paso.

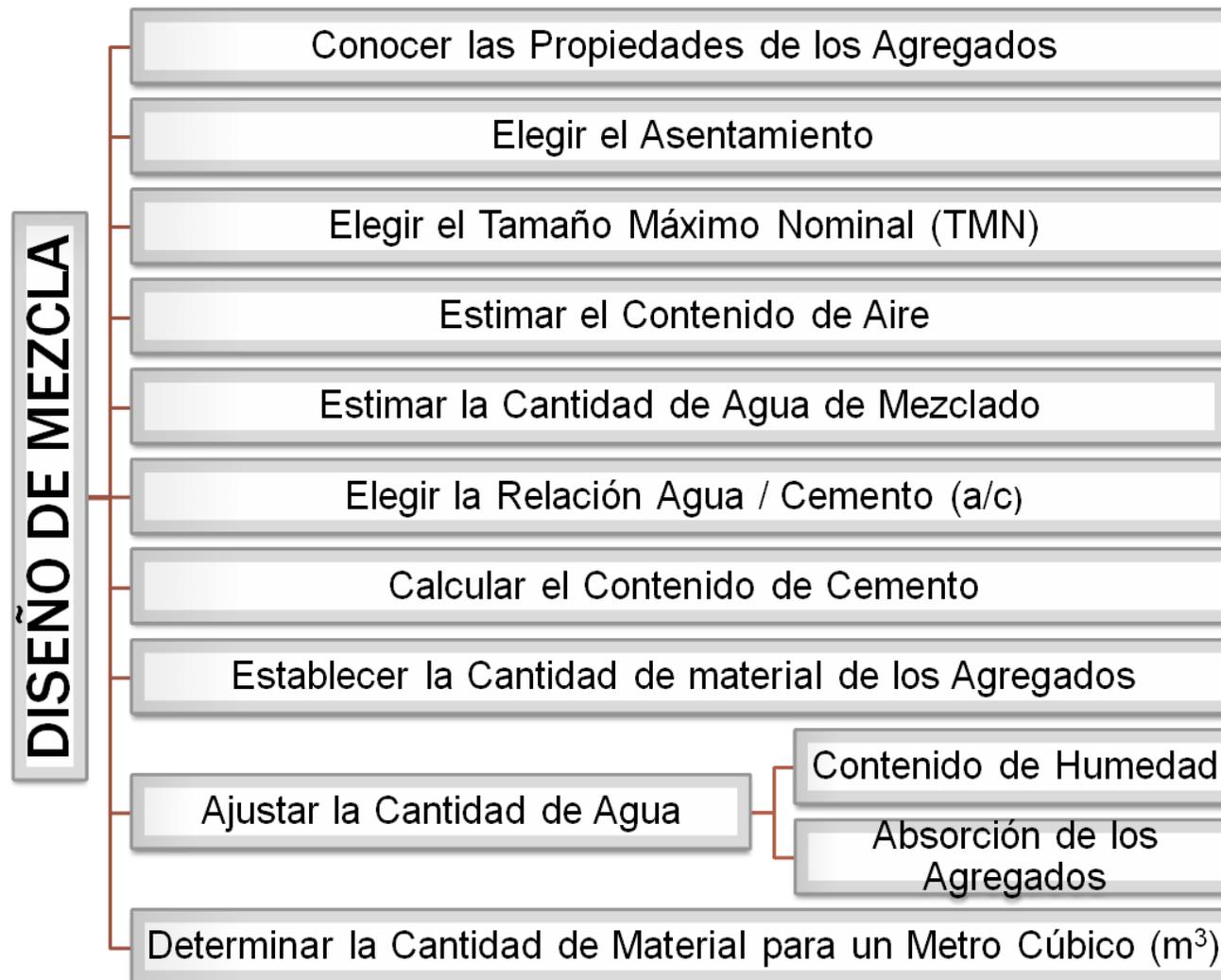


Figura 19. Pasos para el diseño de mezcla

Fuente: Propia

8.1.1. Datos previos

Este es uno de los pasos fundamentales para obtener un diseño de mezcla exitoso, debido a que en esta parte, se describen las características necesarias de los agregados para poder seleccionar los parámetros que establecen las diferentes normas.

Tabla 5. Propiedades de los agregados

Propiedades	Agregado Grueso	Agregado Fino	Limalla Fina
Peso Específico (Kg/m ³)	2570	2460	5920
Humedad (%)	0,94	6,32	0,68
Absorción (%)	0,83	2,94	-
Masa Unitaria Suelta (Kg/m ³)	1470	1540	
Masa Unitaria Compacta (Kg/m ³)	1510	1660	
Tamaño Máximo (mm)	25,4		
Tamaño Máximo Nominal (mm)	19,05		

Fuente: propia

8.1.2. Elección del Asentamiento

Para determinar el asentamiento de la mezcla, se realizó teniendo presente las características de la Tabla 6. Además se tuvo en cuenta: la consistencia (media), el grado de Trabajabilidad (medio) y el tipo de estructura (losas, columnas, vigas, fundaciones y muros). Para este diseño de mezcla se trabajó con un asentamiento de 5 - 10cm, según los criterios anteriormente expuestos.

Tabla 6. Criterios para la Elección del Asentamiento.

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de Trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
0 – 2.0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibradores de formaleta.
2.0 – 3.5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con máquina mecánica
3.5 – 5.0	Semi-seca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones de concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.

Continuación Tabla 6. Criterios para la Elección del Asentamiento.

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de Trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
5.0 – 10.0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10.0 – 15.0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete. ACI- 211.1-91. Reapproved 2009. Farmington Hills, USA: ACI, 1991. p. 1-38.

8.1.3. Elección del Tamaño Máximo Nominal (TMN)

El TMN para el diseño de esta mezcla, se obtuvo a través del ensayo granulométrico que se realizó al agregado grueso. Se obtuvo que el TMN es de 25,4mm (1")

8.1.4. Estimación del Contenido de Aire

Este paso está ligado al tamaño máximo nominal y al ambiente donde se realice la mezcla, para este caso en particular, se considera que la mezcla estará expuesta a un ambiente donde el aire es natural, lo que indica que la mezcla atrapa aire normalmente y además no estará expuesto a ninguna clase de ataque químico en el ambiente.

Para un TMN de una pulgada (1"), el aire atrapado es de 1,5%, teniendo en cuenta los criterios que se encuentran en la Tabla 7.

De la determinación anterior, se puede calcular el volumen de aire atrapado en un (1) m³ de concreto, de la siguiente forma:

$$Vol\ Aire = 1m^3 \cdot \frac{1.5}{100} = 0.015m^3 \text{ Ecuación 8.1.}$$

Tabla 7. Porcentaje de aire atrapado

Agregado grueso TMN		Porcentaje de aire atrapado (%)	Porcentaje promedio total de aire incluido recomendado para los grados de exposición mostrados		
Pulgadas	mm		Suave	Mediano	Severo
3/8	9.51	3.0	4.5	6.0	7.5
1/2	12.50	2.5	4.0	5.5	7.0
3/4	19.10	2.0	3.5	5.0	6.0
1	25.40	1.5	3.0	4.5	6.0
1 1/2	38.10	1.0	2.5	4.5	5.5
2	50.8	0.5	2.0	4.0	5.0
3	76.1	0.3	1.5	3.5	4.5
6	152.4	0.2	1.0	3.0	4.0

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete. ACI- 211.1-91. Reapproved 2009. Farmington Hills, USA: ACI, 1991. p. 1-38.

8.1.5. Estimación del Agua de Mezclado

Este paso está relacionado con el TMN del agregado grueso, el respectivo asentamiento que se eligió y de las condiciones del aire. Para determinar el agua de mezclado se debe tener en cuenta los criterios de la Tabla 8.

El valor del agua de mezclado seleccionado para un TMN de 1" y un asentamiento comprendido entre 8 -10 cm, fue de 194,6 Kg de agua.

Pero como se necesita conocer el volumen que ocupa esta cantidad de agua de mezclado en un metro cúbico (m³) de concreto, se determina de la siguiente forma.

$$Vol\ Agua = \frac{Cantidad\ de\ Agua}{Densidad\ de\ Agua} \quad \text{Ecuación 8.2.}$$

$$Vol\ Agua = \frac{194.6kg}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 0.1946m^3$$

Tabla 8. Estimación agua de mezclado

Agregado grueso TMN		Asentamiento 3 - 5 cm		Asentamiento 8 - 10 cm	
		Sin aire incluido	Con Aire incluido	Sin aire incluido	Con aire incluido
Pulgadas	mm	Masa Agua (Kg)	Masa Agua (Kg)	Masa Agua (Kg)	Masa Agua (Kg)
3/8	9,525	205,95	180,95	226,90	201,90
1/2	12,7	199,60	174,73	214,60	189,73
3/4	19,05	186,90	166,27	201,90	181,27
1	25,4	179,60	159,60	194,60	174,60
1 1/2	38,1	162,53	146,90	177,53	161,90
2	50,8	154,60	139,80	169,60	154,80
3	76,2	143,45	133,84	158,45	148,84
6	152,4	124,40	119,55	139,40	134,55

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete. ACI- 211.1-91. Reapproved 2009. Farmington Hills, USA: ACI, 1991. p. 1-38.

8.1.6. Relación Agua/Cemento

Para poder determinar la relación agua/cemento, es necesario conocer la resistencia a la compresión a la cual se quiere diseñar la mezcla de concreto. Los criterios de selección se encuentran en la Tabla 9.

Para una mezcla de concreto con una resistencia a la compresión de 21 MPa, la relación agua/cemento es 0,58.

Tabla 9. Relación agua/cemento

Resistencia a la compresión (MPa)	Concreto sin incluir de aire	Concreto con incluir de aire
	Relación absoluta por peso	Relación absoluta por peso
17,5	0,65	0,56
21	0,58	0,5
24,5	0,52	0,46
28	0,47	0,42
31,5	0,43	0,38
35	0,4	0,35

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete. ACI- 211.1-91. Reapproved 2009. Farmington Hills, USA: ACI, 1991. p. 1-38.

8.1.7. Cantidad de Cemento

Para conocer la cantidad de cemento, es necesario tener la relación agua/cemento y el contenido de agua de mezclado, dividiendo el contenido de agua entre la relación agua/cemento, se obtiene la cantidad de cemento por metro cúbico (m³) de concreto, como se ilustra a continuación.

$$\text{Cantidad de Cemento} = \frac{\text{Cantidad de Agua}}{\text{Agua} / \text{Cemento}} \quad \text{Ecuación 8.3.}$$

$$\text{Cantidad de Cemento} = \frac{194.6kg}{0.58} = 335.52kg$$

Conociendo de antemano la densidad del cemento con el que se va a elaborar la mezcla de concreto, el cual se determinó a través del ensayo de laboratorio correspondiente para tal fin, se obtuvo que el cemento tiene una densidad de 3060 Kg/m³. Obtenido este dato, se procede a calcular el volumen de cemento por metro cúbico (m³) de concreto, como se ilustra en seguida.

$$\text{Vol de Cemento} = \frac{\text{Cantidad de Cemento}}{\text{Densidad de Cemento}} \quad \text{Ecuación 8.4.}$$

$$\text{Vol de Cemento} = \frac{335.52 \text{kg}}{3060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.11 \text{m}^3$$

8.1.8. Estimación del Volumen de Agregados

Después de conocido el volumen que ocupa el cemento, el agua y el aire dentro de la mezcla de concreto, se suman estos valores, y como se están realizando los cálculos para un metro cúbico (m^3) de concreto, se resta a este volumen unitario la suma de los demás componentes. Quedando de la siguiente forma:

$$\text{Vol Agregados} = 1 - \text{Vol Aire} - \text{Vol Agua} - \text{Vol Cemento} \quad \text{Ecuación 8.5.}$$

$$\text{Vol Agregados} = 1 - 0.015 - 0.1946 - 0.11 = 0.68 \text{m}^3$$

Hay que tener en cuenta que el diseño de mezcla se elaborara para cinco mezclas diferentes para cada uno de los porcentajes de limalla de hierro gris, a continuación se muestra la distribución de dichas mezclas. En la Tabla 10, se muestran las tablas de estos porcentajes de limalla.

Tabla 10. Distribución en porcentaje de los agregados.

Mezcla	Agregados		
	Grueso	Fino	Limalla
1	70%	26,5%	3,5%
2	65%	31,5%	
3	60%	36,5%	
4	55%	41,5%	
5	50%	46,5%	
1	70%	25,5%	4,5%
2	65%	30,5%	
3	60%	35,5%	
4	55%	40,5%	
5	50%	45,5%	
1	70%	24,5%	5,5%
2	65%	29,5%	
3	60%	34,5%	
4	55%	39,5%	
5	50%	44,5%	
1	70%	30%	0%
2	65%	35%	
3	60%	40%	
4	55%	45%	
5	50%	50%	

Fuente: Propia

Ahora es necesario determinar el volumen de agregados a que cantidad en peso equivale dentro de la mezcla de concreto. Este procedimiento se ilustra para una sola mezcla.

$$Peso\ Mezcla = \frac{Vol\ Agregados}{\left(\frac{\%Grueso}{Peso\ Específico\ Grueso} + \frac{\%Fino}{Peso\ Específico\ Fino} + \frac{\%Limalla}{Peso\ Específico\ Limalla} \right)}$$

Ecuación 8.6.

$$Peso\ Mezcla = \frac{0.68m^3}{\left(\frac{0.7}{2570\ kg/m^3} + \frac{0.265}{2460\ kg/m^3} + \frac{0.035}{5920\ kg/m^3} \right)} = 1763.57kg$$

Se necesita conocer los valores que representa el peso anterior, en el agregado grueso, fino y limalla de hierro gris, ya que ese valor representa el conjunto de los agregados. También se realizará para una sola mezcla.

$$Peso\ Agregado = \%Agregado \cdot Peso\ Mezcla \quad \text{Ecuación 8.7.}$$

$$Peso\ Agregado\ Grueso = 0.7 \cdot 1763.57kg = 1234.5kg$$

$$Peso\ Agregado\ Fino = 0.265 \cdot 1763.57kg = 467.35kg$$

$$Peso\ Agregado\ Grueso = 0.035 \cdot 1763.57kg = 61.72kg$$

También es necesario saber que volumen representa cada uno de los agregados dentro de la mezcla, y conociendo su peso, a través del uso de la relación de peso específico, se puede hallar estos valores. También se calcula para una sola mezcla.

$$Volumen\ Agregado = \frac{Peso\ Agregado}{Peso\ Específico\ Agregado} \quad \text{Ecuación 8.8.}$$

$$Volumen\ Agregado\ Grueso = \frac{1234.50kg}{2570\ kg/m^3} = 0.48m^3$$

$$Volumen\ Agregado\ Fino = \frac{467.35kg}{2460\ kg/m^3} = 0.19m^3$$

$$Volumen\ Limalla\ Fina = \frac{61.72kg}{5920\ kg/m^3} = 0.01m^3$$

A continuación se muestran en la Tabla 11 y la Tabla 12 el resumen con los pesos y el volumen, respectivamente, de los agregados en las diferentes mezclas de concreto adicionadas con limalla de hierro gris.

Tabla 11. Mezclas en peso de los agregados.

Mezcla	Limalla	Agregados		
		Peso Grueso (kg)	Peso Fino (kg)	Peso Limalla (kg)
1	3.5%	1234,50	467,35	61,72
2		1143,74	554,27	61,59
3		1053,39	640,81	61,45
4		963,45	726,97	61,31
5		873,91	812,73	61,17
1	4.5%	1242,14	452,50	79,85
2		1150,81	540,00	79,67
3		1059,89	627,10	79,49
4		969,38	713,81	79,31
5		879,27	800,14	79,13
1	5.5%	1249,88	437,46	98,21
2		1157,96	525,54	97,98
3		1066,46	613,22	97,76
4		975,37	700,50	97,54
5		884,70	787,38	97,32
1	0.0%	1208,47	517,91	0,00
2		1119,68	602,90	0,00
3		1031,28	687,52	0,00
4		943,27	771,76	0,00
5		855,64	855,64	0,00

Fuente: Propia

Tabla 12. Mezclas en volumen de los agregados.

Mezcla	Limalla	Agregados		
		Vol Grueso (m ³)	Vol Fino (m ³)	Vol Limalla (m ³)
1	3.5%	0,4803	0,1900	0,0104
2		0,4450	0,2253	0,0104
3		0,4099	0,2605	0,0104
4		0,3749	0,2955	0,0104
5		0,3400	0,3304	0,0104
1	4.5%	0,4833	0,1839	0,0134
2		0,4478	0,2195	0,0134
3		0,4124	0,2549	0,0134
4		0,3772	0,2902	0,0134
5		0,3421	0,3253	0,0134
1	5.5%	0,4863	0,1778	0,0165
2		0,4506	0,2136	0,0165
3		0,4150	0,2493	0,0165
4		0,3795	0,2848	0,0165
5		0,3442	0,3201	0,0165
1	0.0%	0,4702	0,2105	0,0000
2		0,4357	0,2451	0,0000
3		0,4013	0,2795	0,0000
4		0,3670	0,3137	0,0000
5		0,3329	0,3478	0,0000

Fuente: Propia

8.1.9. Ajuste de Agua de la Mezcla

En esta parte se debe tener en cuenta el agua que tiene incluida los agregados, ya sea para adicionar o para disminuir en la ya calculada, en el numeral 8.1.5.

Para esto se debe conocer la humedad y la absorción que tienen los agregados al momento de realizar la mezcla. El procedimiento se describe a continuación, y se calcula para una sola mezcla.

$$\text{Ajuste Agua Agregado} = \text{Humedad} - \text{Absorción} \quad \text{Ecuación 8.9.}$$

$$\text{Ajuste Agua Agregado} = 6,32\% - 2,94\%$$

$$\text{Ajuste Agua Agregado} = 3,38\%$$

Conociendo que a los agregados se le deben adicionar o disminuir la cantidad de agua de mezclado, se realiza este ajuste con respecto al peso.

$$\text{Ajuste Agua Mezcla} = \frac{\text{Ajuste Agua Agregado} \cdot \text{Peso Agregado}}{100\%} \quad \text{Ecuación 8.10.}$$

$$\text{Ajuste Agua Mezcla 1 (Fino)} = \frac{3,38\% * 467,35\text{Kg}}{100\%}$$

$$\text{Ajuste Agua Mezcla 1 (Fino)} = 15,80\text{Kg}$$

A continuación se presentan una serie de tablas resumen con el respectivo ajuste de agua de la mezcla. Es importante anotar, que la última columna de las tablas, es la diferencia que existe entre el contenido de agua de mezclado y la suma de los ajustes de agua en los agregados.

Tabla 13. Mezclas con Ajuste de Agua.

Mezcla	Limalla	Agregados				
		Masa Agua Grueso	Masa Agua Fina	Masa Agua Limalla	Masa Agua Agregados	Masa Agua Ajustada
1	3.5%	1,358	15,796	0,377	17,531	177,069
2		1,258	18,734	0,376	20,368	174,232
3		1,159	21,660	0,375	23,193	171,407
4		1,060	24,571	0,374	26,005	168,595
5		0,961	27,470	0,373	28,805	165,795
1	4.5%	1,366	15,294	0,487	17,148	177,452
2		1,266	18,252	0,486	20,004	174,596
3		1,166	21,196	0,485	22,847	171,753
4		1,066	24,127	0,484	25,677	168,923
5		0,967	27,045	0,483	28,494	166,106

Continuación Tabla 13. Mezclas con Ajuste de Agua.

Mezcla	Limalla	Agregados				
		Masa Agua Grueso	Masa Agua Fina	Masa Agua Limalla	Masa Agua Agregados	Masa Agua Ajustada
1	5.5%	1,375	14,786	0,599	16,760	177,840
2		1,274	17,763	0,598	19,635	174,965
3		1,173	20,727	0,596	22,496	172,104
4		1,073	23,677	0,595	25,345	167,255
5		0,973	26,614	0,594	28,180	166,420
1	0.0%	1,329	17,505	0,000	18,835	175,765
2		1,232	20,378	0,000	21,610	172,990
3		1,134	23,238	0,000	24,373	170,227
4		1,038	26,086	0,000	27,123	167,477
5		0,941	28,921	0,000	29,862	164,738

Fuente: Propia

8.1.10. Determinación de las Cantidades de Material con Ajuste de Agua para un Metro Cúbico (m³)

En esta parte se muestra las diferentes mezclas para cada tipo de porcentaje de limalla de hierro gris, se debe tener en cuenta como se calcula la cantidad de los agregados con respecto a la humedad natural de cada uno de ellos. Además se debe realizar un pequeño cálculo para la cantidad de cemento, haciendo uso de la relación de densidad. Estos procedimientos se obtienen de la siguiente forma.

$$\text{Masa Cemento} = \text{Densidad Cemento} \cdot \text{Volumen Cemento} \quad \text{Ecuación 8.11.}$$

$$\text{Masa Cemento} = 3060 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0,11 \text{m}^3 = 335,52 \text{ Kg}$$

$$\text{Cantidad Agreg} = \text{Peso Específico Agreg} \cdot \text{Vol Agreg} \cdot \left(1 + \frac{\text{Humedad Agreg}}{100\%} \right)$$

Ecuación 8.12.

$$\text{Cantidad Agregado Fino} = 2460 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0,19 \text{m}^3 \cdot \left(1 + \frac{6,32\%}{100\%} \right)$$

$$\text{Cantidad Agregado Fino} = 496,88 \text{ Kg}$$

En la Tabla 14, se muestran las cantidades de material para cada una de las mezclas usadas en este trabajo de grado.

Tabla 14. Cantidades de Material para las Diferentes Mezclas.

Material	Limalla	Masa (kg)				
		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
Aire	3.5%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua		177,07	174,23	171,41	168,59	166,11
Cemento		335,52	335,52	335,52	335,52	335,52
Agreg. Grueso		1246,10	1154,49	1063,29	972,51	882,12
Agreg. Fino		496,88	589,31	681,31	772,91	864,10
Limalla		62,10	61,96	61,82	61,68	61,55
Total		2317,67	2315,51	2313,36	2311,21	2309,39
Aire		4.5%	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua	177,45		174,60	171,75	168,92	166,11
Cemento	335,52		335,52	335,52	335,52	335,52
Agreg. Grueso	1253,82		1161,63	1069,85	978,49	887,53
Agreg. Fino	481,09		574,12	666,73	758,93	850,70
Limalla	80,34		80,16	79,98	79,80	79,62
Total	2328,22		2326,02	2323,83	2321,65	2319,48
Aire	5.5%		0,00	0,00	0,00	0,00
Agua		177,84	174,97	172,10	169,26	166,42
Cemento		335,52	335,52	335,52	335,52	335,52
Agreg. Grueso		1261,63	1168,85	1076,49	984,54	893,02
Agreg. Fino		465,11	558,75	651,97	744,77	837,15
Limalla		98,80	98,58	98,36	98,13	97,91
Total		2338,90	2336,66	2334,43	2332,22	2330,01
Aire		0.0%	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua	175,77		172,99	170,23	167,48	167,48
Cemento	335,52		335,52	335,52	335,52	335,52
Agreg. Grueso	1219,82		1130,20	1040,97	952,13	863,68
Agreg. Fino	550,65		641,01	730,97	820,54	909,71
Limalla	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Total	2281,75		2279,71	2277,68	2275,66	2276,39

Fuente: Propia

8.1.11. Ajuste de las Cantidades de Material

Este paso consiste en ajustar las cantidades de material a las necesidades que se tengan, para este caso en particular, se necesita conocer la cantidad de material que ocupa un molde metálico, que tiene de diámetro 15 cm y de altura 30 cm.

Como las cantidades se determinaron para un metro cúbico (m^3) de concreto, se halla el volumen del molde metálico y se realiza su respectiva proporción.

$$\text{Volumen Molde Metálico} = \frac{\pi}{4} * (0,15m)^2 * (0,30m)$$

$$\text{Volumen Molde Metálico} = 0,0053m^3$$

Ahora se muestran las cantidades definitivas con las que se trabajaron en este trabajo de grado, cabe anotar que las cantidades indicada a continuación son para elaborar solo un molde metálico de las características anteriormente mencionadas.

Tabla 15. Cantidades de Material para un molde metálico (Diámetro= 15cm, Altura= 30cm).

Material	Limalla	Masa (kg)				
		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
Aire	3.5%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua		0,94	0,92	0,91	0,89	0,88
Cemento		1,78	1,78	1,78	1,78	1,78
Agreg. Grueso		6,61	6,12	5,64	5,16	4,68
Agreg. Fino		2,63	3,12	3,61	4,10	4,58
Limalla		0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Total		12,287	12,276	12,264	12,253	12,243
Aire	4.5%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua		0,94	0,93	0,91	0,90	0,88
Cemento		1,78	1,78	1,78	1,78	1,78
Agreg. Grueso		6,65	6,16	5,67	5,19	4,71
Agreg. Fino		2,55	3,04	3,53	4,02	4,51
Limalla		0,43	0,42	0,42	0,42	0,42
Total		12,343	12,331	12,320	12,308	12,297
Aire	5.5%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua		0,94	0,93	0,91	0,90	0,88
Cemento		1,78	1,78	1,78	1,78	1,78
Agreg. Grueso		6,69	6,20	5,71	5,22	4,73
Agreg. Fino		2,47	2,96	3,46	3,95	4,44
Limalla		0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Total		12,400	12,388	12,376	12,364	12,352
Aire	0.0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua		0,93	0,92	0,90	0,89	0,89
Cemento		1,78	1,78	1,78	1,78	1,78
Agreg. Grueso		6,47	5,99	5,52	5,05	4,58
Agreg. Fino		2,92	3,40	3,88	4,35	4,82
Limalla		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		12,097	12,086	12,075	12,064	12,068

Fuente: Propia

9. RESULTADOS.

Durante el transcurso de este trabajo de grado, se realizaron una serie de pruebas y ensayos, con el fin de conocer la resistencia a la compresión de mezclas de concreto adicionadas con limalla de hierro gris. Los resultados obtenidos se muestran a continuación, en los cuales se encuentran la caracterización de los materiales, el módulo de elasticidad del concreto y la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto adicionadas con limalla fina.

9.1. Resultados de la Caracterización de los Materiales

Los agregados pétreos provenientes de Pescadero fueron los utilizados para el desarrollo de una serie de ensayos, los cuales arrojaron los datos necesarios para elaborar el diseño de mezcla, elemento fundamental para evaluar la resistencia a la compresión de mezclas de concreto.

A continuación se muestra en la Tabla 16, el resumen de los ensayos realizados a los agregados convencionales, y los no convencionales. Es importante anotar que cada ensayo se hizo tres (3) veces, con el objetivo de tener datos significativos.

Tabla 16. Caracterización de los Agregados

PROPIEDAD FÍSICO- MECÁNICA	AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO
Equivalente de Arena (%)	---	88,43
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%)	34,67	---
Contenido de Materia Orgánica	---	2
Gravedad Específica Bulk 23/23°C (gr/cm ³)	2,57	2,46
Gravedad Específica Aparente 23/23°C (gr/cm ³)	2,62	2,67
Gravedad Específica Bulk S.S.S. 23/23°C (gr/cm ³)	2,59	2,54
Porcentaje de Absorción (%)	0,83	2,94
Masa Unitaria Suelta (gr/cm ³)	1,47	1,54
Masa Unitaria Compacta (gr/cm ³)	1,51	1,66
Porcentaje de Vacíos (%)	39,70	37,70
Humedad Natural (%)	0,94	6,32
Índice de Alargamiento (%)	22,19	---
Índice de Aplanamiento (%)	14,61	---
Terrones de Arcilla y Partículas Deleznable (%)	0,18	2,87
Caras Fracturadas (%)	72,45	---

Fuente: propia

9.1.1. Análisis Granulométrico

A través del ensayo de análisis granulométrico, se obtiene la clasificación del agregado tanto grueso como fino, de acuerdo al tamaño de las partículas que pasan a través de los diferentes tamices, además en el agregado grueso se determina el tamaño máximo nominal (TMN).

El tamaño máximo nominal (TMN), es la menor abertura de la serie de tamices, por la que pasa todo el material. El TMN del análisis granulométrico que se obtuvo del agregado grueso fue de 25.4mm (1").

El análisis granulométrico del agregado grueso se puede observar en la Figura 20, Mientras que el análisis granulométrico del agregado fino se encuentra en la Figura 21.

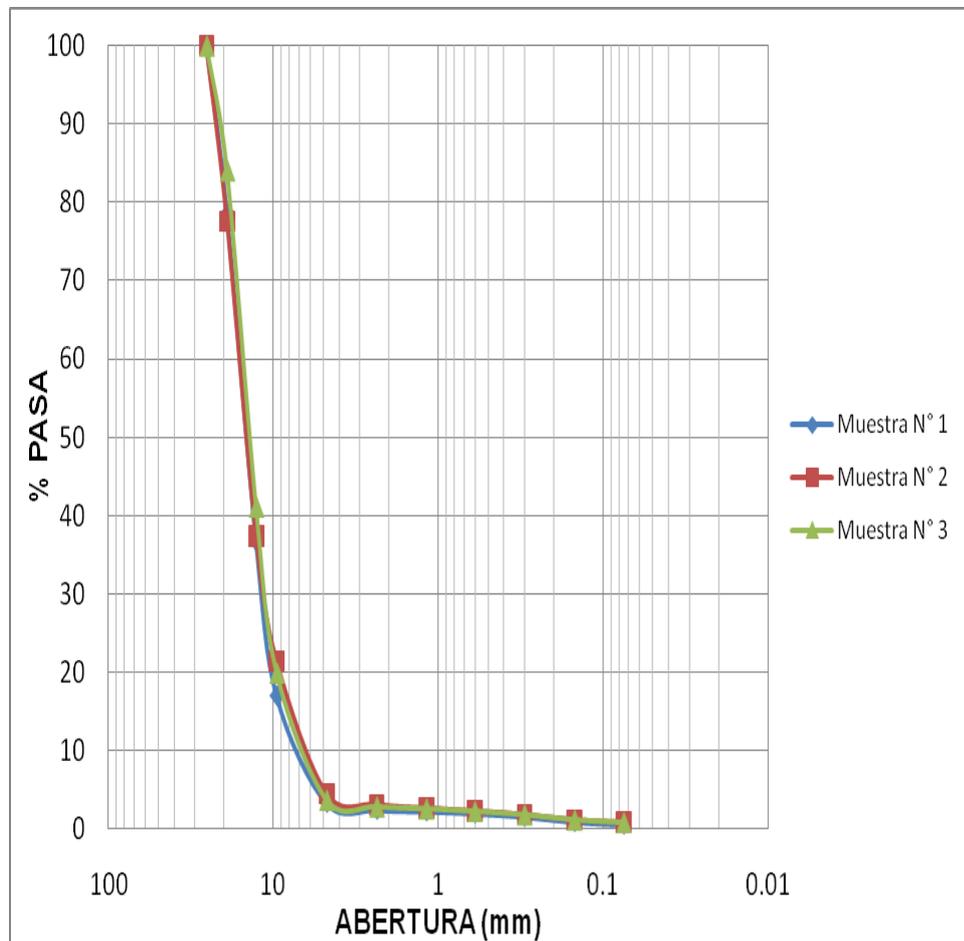


Figura 20. Análisis Granulométrico del Agregado Grueso

Fuente: propia

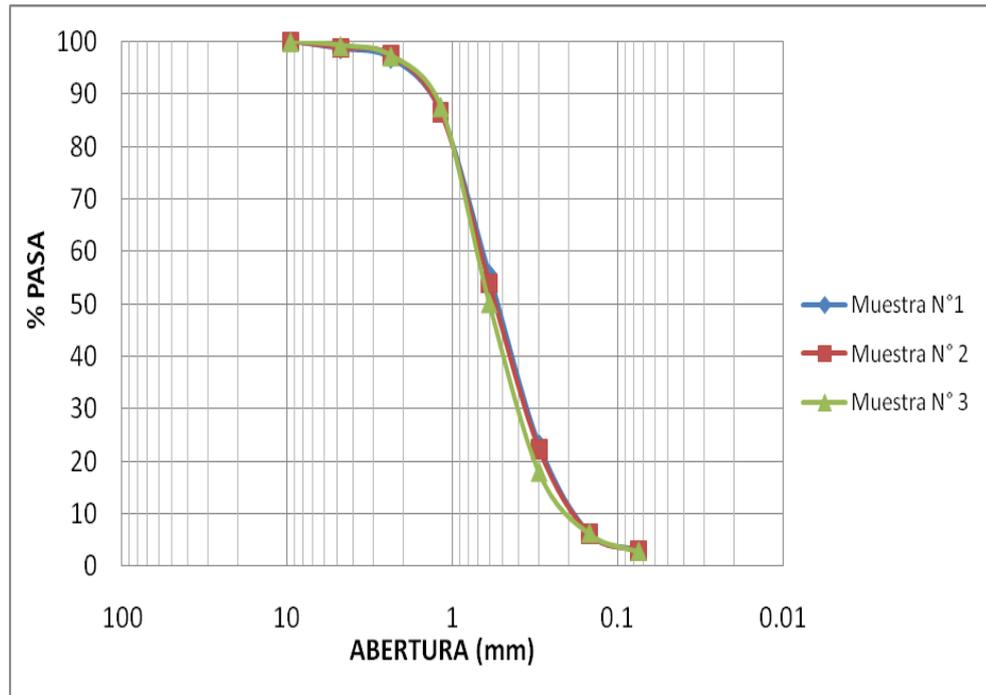


Figura 21. Análisis Granulométrico del Agregado Fino.

Fuente: propia

9.1.2. Densidad del Cemento

El cemento que se utilizó en este trabajo de grado fue el cemento Holcim Boyacá Portland tipo I, del cual se necesita conocer la densidad, para poder realizar el diseño de mezcla. La densidad del cemento Holcim Boyacá Portland tipo I que se obtuvo a través del uso del frasco patrón de Le Chatelier fue de $3,06 \text{ gr/cm}^3$. Es importante anotar que el anterior ensayo se realizó tres (3) veces, para tener un dato representativo a la hora de usarse.

9.1.3. Densidad de la Limalla de Hierro Gris

La limalla de hierro gris que se utilizó fue proporcionada por la empresa INDUSTRIAS LAVCO Ltda., a través de un acuerdo realizado con la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, a la cual se le determinó su densidad haciendo uso del principio de Arquímedes, debido a que no existe una norma que reglamente el procedimiento que se debe hacer, para conocer tal dato.

Teniendo como base el anterior argumento, la densidad de la limalla de hierro gris que se obtuvo en el laboratorio tiene un valor de $5,92 \text{ gr/cm}^3$. Es importante anotar que el anterior ensayo se realizó tres (3) veces, para tener un dato representativo a la hora de usarse.

9.2. Resultados del Concreto en Estado Endurecido

La mezcla de concreto se diseñó para resistir 21 MPa (3000 PSI) a una edad de 28 días, con cuatro (4) porcentajes diferentes de limalla de hierro gris, y

para cada porcentaje cinco (5) mezclas diferentes. Estas mezclas fueron probadas a los 7, 14 y 28 días de su elaboración, a las cuales se les realizó la prueba de resistencia a la compresión y se determinó a la edad de 28 días el módulo de elasticidad estático.

9.2.1. Resistencia a la Compresión de Muestras de Concreto

A continuación se presentan una serie de tablas, en las que se encuentran los datos de cada uno de los porcentajes de limalla de hierro gris, destacándose la resistencia a la compresión en cada una de las edades a las que se probaron.

Cabe anotar que la resistencia a la compresión de muestras de concreto a los 7 días está alrededor de 13,65 MPa, el cual equivale al 65% de la resistencia total. Por otra parte, la resistencia a la compresión de muestras de concreto a los 14 días debe encontrarse cerca de 16,8 MPa, valor que representa el 80% de la resistencia total. Es importante recordar que el diseño de la mezcla se realizó para 21 MPa.

9.2.1.1 Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 3,5%

En las Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 que se encuentran a continuación, se puede observar los resultados de las distintas mezclas que fueron probadas a los 7, 14 y 28 días de elaboradas, destacándose aspectos como la carga que fue aplicada y el área de cada uno de los especímenes de concreto, elementos fundamentales para poder determinar la resistencia a la compresión en las diferentes edades.

Se realizó 15 veces la prueba de resistencia a la compresión en cada una de las edades, los resultados son los siguientes:

Tabla 17. Resultados Resistencia Compresión Limalla 3,5% a 7 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
3,5	1	15,03	17742,22	324,8	18,31	17,98
		15,60	19113,45	314,6	16,46	
		14,25	15948,49	306,0	19,19	
	2	15,45	18747,65	318,1	16,97	19,19
		14,81	17226,62	404,4	23,48	
		14,82	17249,89	295,7	17,14	
	3	15,50	18869,19	282,0	14,94	15,25
		15,30	18385,39	294,1	16,00	
		14,61	16764,49	248,5	14,82	
	4	15,20	18145,84	193,6	10,67	11,46
		15,72	19408,63	240,1	12,37	
		15,55	18991,12	215,2	11,33	
	5	14,90	17436,62	181,1	10,39	10,00
		14,55	16627,08	155,5	9,35	
		15,30	18385,39	188,6	10,26	

Fuente: propia

Tabla 18. Resultados Resistencia Compresión Limalla 3,5% a 14 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
3,5	1	15,20	18145,84	513,0	28,27	26,67
		15,20	18145,84	437,1	24,09	
		15,36	18529,87	512,2	27,64	
	2	15,33	18457,56	393,3	21,31	20,15
		15,20	18145,84	360,6	19,87	
		15,26	18289,38	352,6	19,28	
	3	15,06	17813,11	422,3	23,71	21,18
		15,66	19260,76	411,9	21,39	
		15,20	18145,84	334,9	18,46	
	4	15,63	19187,03	339,2	17,68	18,74
		15,60	19113,45	377,4	19,75	
		15,23	18217,54	342,4	18,80	
	5	15,23	18217,54	245,7	13,49	13,81
		15,33	18457,56	288,5	15,63	
		15,23	18217,54	224,2	12,31	

Fuente: propia

Tabla 19. Resultados Resistencia Compresión Limalla 3,5% a 28 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
3,5	1	15,30	18385,39	401,4	21,83	28,17
		15,27	18313,36	580,1	31,68	
		15,60	19113,45	592,8	31,01	
	2	15,30	18385,39	613,4	33,36	34,35
		15,33	18457,56	607,4	32,91	
		14,67	16902,47	621,7	36,78	
	3	14,56	16649,94	460,3	27,65	28,35
		14,60	16741,55	517,4	30,91	
		15,63	19187,03	508,2	26,49	
	4	14,37	16218,23	539,9	33,29	27,57
		14,93	17506,91	478,9	27,35	
		15,50	18869,19	416,1	22,05	
	5	14,57	16672,82	336,3	20,17	24,73
		15,00	17671,46	475,6	26,91	
		14,90	17436,62	472,8	27,12	

Fuente: propia

9.2.1.2 Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 4,5%

En las Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22 que se encuentran a continuación, se puede observar los resultados de las distintas mezclas que fueron probadas a los 7, 14 y 28 días de elaboradas, destacándose aspectos como la carga que fue aplicada y el área de cada uno de los especímenes de concreto, elementos fundamentales para poder determinar la resistencia a la compresión en las diferentes edades.

Se realizó 50 veces la prueba de resistencia a la compresión en cada una de las edades, los resultados son los siguientes:

Tabla 20. Resultados Resistencia Compresión Limalla 4,5% a 7 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
4,5	1	15,25	18265,42	400,0	21,90	18,63
	1	15,00	17671,46	364,8	20,64	
	1	15,55	18991,12	439,5	23,14	
	1	14,95	17553,85	426,9	24,32	
	1	14,90	17436,62	391,0	22,42	
	1	15,75	19482,78	274,5	14,09	
	1	15,30	18385,39	224,1	12,19	
	1	15,65	19236,17	313,3	16,29	
	1	15,55	18991,12	313,3	16,50	
	1	15,55	18991,12	281,1	14,80	
4,5	2	14,40	16286,02	278,1	17,08	15,66
	2	15,30	18385,39	271,3	14,76	
	2	15,35	18505,75	317,5	17,16	
	2	15,30	18385,39	221,0	12,02	
	2	15,70	19359,28	381,2	19,69	
	2	14,85	17319,80	245,0	14,15	
	2	14,80	17203,36	249,3	14,49	
	2	14,95	17553,85	277,5	15,81	
	2	14,70	16971,67	242,8	14,31	
	2	14,55	16627,08	285,7	17,18	
4,5	3	15,35	18505,75	260,7	14,09	13,94
	3	15,35	18505,75	264,9	14,31	
	3	15,25	18265,42	244,1	13,36	
	3	15,35	18505,75	226,2	12,22	
	3	15,40	18626,50	252,9	13,58	
	3	15,30	18385,39	300,7	16,36	
	3	15,30	18385,39	286,5	15,58	
	3	15,25	18265,42	236,3	12,94	
	3	15,55	18991,12	256,9	13,53	
	3	15,15	18026,65	241,3	13,39	
4,5	4	15,60	19113,45	188,3	9,85	9,38
	4	15,20	18145,84	149,3	8,23	
	4	15,20	18145,84	194,9	10,74	
	4	15,55	18991,12	184,8	9,73	
	4	15,25	18265,42	134,6	7,37	
	4	15,30	18385,39	167,2	9,09	
	4	15,30	18385,39	186,3	10,13	
	4	15,20	18145,84	183,0	10,08	
	4	15,20	18145,84	165,0	9,09	
	4	15,25	18265,42	172,5	9,44	

Continuación Tabla 20. Resultados Resistencia Compresión Limalla 4,5% a 7 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
4,5	5	15,60	19113,45	164,0	8,58	8,89
	5	15,30	18385,39	174,4	9,49	
	5	14,95	17553,85	197,5	11,25	
	5	15,20	18145,84	201,2	11,09	
	5	15,30	18385,39	158,5	8,62	
	5	14,80	17203,36	156,6	9,10	
	5	15,40	18626,50	119,7	6,43	
	5	15,25	18265,42	126,2	6,91	
	5	15,50	18869,19	155,3	8,23	
	5	15,05	17789,46	164,6	9,25	

Fuente: propia

Tabla 21. Resultados Resistencia Compresión Limalla 4,5% a 14 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
4,5	1	15,20	18145,84	464,0	25,57	24,61
	1	14,63	16810,42	410,6	24,43	
	1	15,43	18699,14	466,9	24,97	
	1	15,33	18457,56	482,4	26,14	
	1	15,43	18699,14	495,6	26,50	
	1	15,66	19260,76	452,4	23,49	
	1	15,30	18385,39	420,5	22,87	
	1	15,30	18385,39	470,8	25,61	
	1	15,33	18457,56	440,6	23,87	
	1	15,30	18385,39	416,4	22,65	
4,5	2	15,40	18626,50	440,8	23,67	24,43
	2	15,30	18385,39	480,3	26,12	
	2	15,30	18385,39	449,3	24,44	
	2	15,00	17671,46	411,9	23,31	
	2	15,03	17742,22	376,1	21,20	
	2	15,20	18145,84	477,4	26,31	
	2	15,66	19260,76	470,2	24,41	
	2	15,16	18050,46	383,5	21,25	
	2	15,20	18145,84	463,8	25,56	
	2	15,23	18217,54	510,3	28,01	
4,5	3	15,23	18217,54	406,8	22,33	20,70
	3	14,96	17577,34	390,6	22,22	
	3	15,00	17671,46	402,2	22,76	
	3	15,23	18217,54	408,6	22,43	
	3	15,23	18217,54	397,2	21,80	
	3	15,33	18457,56	338,4	18,33	
	3	15,60	19113,45	283,8	14,85	
	3	14,70	16971,67	316,2	18,63	
	3	14,60	16741,55	333,0	19,89	
	3	15,20	18145,84	430,5	23,72	

Continuación Tabla 21. Resultados Resistencia Compresión Limalla 4,5% a 14 Días.

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
4,5	4	15,23	18217,54	341,7	18,76	20,65
	4	14,67	16902,47	359,7	21,28	
	4	15,00	17671,46	358,9	20,31	
	4	15,23	18217,54	325,5	17,87	
	4	15,23	18217,54	385,8	21,18	
	4	15,17	18074,28	462,9	25,61	
	4	15,17	18074,28	438,6	24,27	
	4	15,23	18217,54	402,1	22,07	
	4	15,70	19359,28	318,4	16,45	
	4	15,77	19532,29	366,3	18,75	
4,5	5	15,27	18313,36	323,1	17,64	17,00
	5	15,73	19433,33	241,7	12,44	
	5	15,27	18313,36	225,7	12,32	
	5	15,50	18869,19	224,9	11,92	
	5	14,93	17506,91	230,1	13,14	
	5	15,20	18145,84	316,4	17,44	
	5	15,17	18074,28	363,8	20,13	
	5	14,77	17133,69	381,2	22,25	
	5	14,63	16810,42	363,3	21,61	
	5	14,87	17366,48	366,0	21,08	

Fuente: propia

Tabla 22. Resultados Resistencia Compresión Limalla 4,5% a 28 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
4,5	1	15,50	18869,19	456,5	24,19	26,22
	1	15,57	19040,01	500,1	26,27	
	1	15,57	19040,01	477,2	25,06	
	1	15,43	18699,14	466,7	24,96	
	1	15,30	18385,39	506,2	27,53	
	1	15,00	17671,46	512,8	29,02	
	1	15,23	18217,54	514,3	28,23	
	1	14,87	17366,48	465,1	26,78	
	1	15,20	18145,84	490,0	27,00	
	1	15,40	18626,50	431,8	23,18	
4,5	2	14,97	17600,84	499,2	28,36	31,59
	2	14,67	16902,47	597,2	35,33	
	2	14,67	16902,47	541,7	32,05	
	2	14,80	17203,36	582,2	33,84	
	2	15,00	17671,46	552,9	31,29	
	2	15,67	19285,37	484,8	25,14	
	2	15,53	18942,30	564,1	29,78	
	2	14,30	16060,61	550,4	34,27	
	2	14,57	16672,82	595,7	35,73	
	2	14,43	16353,95	492,0	30,08	

Continuación Tabla 22. Resultados Resistencia Compresión Limalla 4,5% a 28 Días.

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
4,5	3	15,17	18074,28	439,8	24,33	27,71
	3	14,67	16902,47	406,1	24,03	
	3	15,20	18145,84	504,3	27,79	
	3	15,00	17671,46	531,1	30,05	
	3	15,13	17979,09	550,8	30,64	
	3	15,67	19285,37	504,6	26,16	
	3	15,17	18074,28	490,0	27,11	
	3	14,87	17366,48	528,4	30,43	
	3	15,23	18217,54	551,3	30,26	
	3	15,37	18554,00	487,4	26,27	
4,5	4	15,27	18313,36	483,8	26,42	27,23
	4	15,03	17742,22	514,8	29,02	
	4	15,27	18313,36	529,2	28,90	
	4	15,17	18074,28	481,8	26,66	
	4	15,03	17742,22	480,9	27,10	
	4	15,23	18217,54	501,9	27,55	
	4	15,20	18145,84	507,6	27,97	
	4	15,23	18217,54	479,2	26,30	
	4	15,10	17907,86	486,9	27,19	
	4	15,13	17979,09	453,5	25,22	
4,5	5	15,13	17979,09	507,1	28,20	26,58
	5	15,07	17836,78	443,4	24,86	
	5	15,17	18074,28	507,6	28,08	
	5	15,17	18074,28	489,0	27,06	
	5	15,30	18385,39	492,2	26,77	
	5	14,93	17506,91	413,9	23,64	
	5	15,10	17907,86	515,9	28,81	
	5	15,03	17742,22	414,8	23,38	
	5	15,13	17979,09	483,1	26,87	
	5	15,20	18145,84	510,0	28,11	

Fuente: propia

9.2.1.3 Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 5,5%

En las Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25 que se encuentran a continuación, se puede observar los resultados de las distintas mezclas que fueron probadas a los 7, 14 y 28 días de elaboradas, destacándose aspectos como la carga que fue aplicada y el área de cada uno de los especímenes de concreto, elementos fundamentales para poder determinar la resistencia a la compresión en las diferentes edades.

Se realizó 15 veces la prueba de resistencia a la compresión en cada una de las edades, los resultados son los siguientes:

Tabla 23. Resultados Resistencia Compresión Limalla 5,5% a 7 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
5,5	1	15,41	18650,70	349,5	18,74	18,98
		15,35	18505,75	355,1	19,19	
		14,93	17506,91	332,6	19,00	
	2	15,15	18026,65	369,4	20,49	20,89
		15,30	18385,39	393,8	21,42	
		14,65	16856,41	349,8	20,75	
	3	15,00	17671,46	303,4	17,17	17,23
		15,26	18289,38	337,5	18,45	
		15,71	19383,95	311,3	16,06	
	4	15,15	18026,65	287,7	15,96	16,16
		15,27	18313,36	289,4	15,80	
		15,30	18385,39	307,2	16,71	
	5	15,25	18265,42	240,1	13,15	12,90
		15,20	18145,84	225,7	12,44	
		15,25	18265,42	239,6	13,12	

Fuente: propia

Tabla 24. Resultados Resistencia Compresión Limalla 5,5% a 14 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
5,5	1	15,26	18289,38	411,6	22,50	20,87
		15,26	18289,38	345,1	18,87	
		14,43	16353,95	347,1	21,22	
	2	15,30	18385,39	416,8	22,67	22,77
		14,96	17577,34	365,2	20,78	
		15,20	18145,84	451,0	24,85	
	3	15,20	18145,84	357,6	19,71	18,64
		15,33	18457,56	310,7	16,83	
		14,46	16422,02	318,2	19,38	
	4	15,30	18385,39	316,6	17,22	16,53
		14,86	17343,13	271,1	15,63	
		15,16	18050,46	302,0	16,73	
	5	15,30	18385,39	350,0	19,04	18,33
		15,26	18289,38	353,7	19,34	
		15,16	18050,46	300,1	16,63	

Fuente: propia

Tabla 25. Resultados Resistencia Compresión Limalla 5,5% a 28 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
5,5	1	15,27	18313,36	548,5	29,95	27,10
		14,93	17506,91	492,9	28,15	
		15,56	19015,56	440,8	23,18	
	2	15,17	18074,28	538,6	29,80	30,30
		14,97	17600,84	552,9	31,41	
		15,20	18145,84	538,7	29,69	
	3	15,13	17979,09	457,7	25,46	26,61
		15,00	17671,46	494,2	27,97	
		15,13	17979,09	474,5	26,39	
	4	15,17	18074,28	483,4	26,75	25,64
		15,20	18145,84	399,6	22,02	
		15,10	17907,86	504,3	28,16	
	5	15,33	18457,56	390,5	21,16	21,51
		15,13	17979,09	363,2	20,20	
		14,97	17600,84	408,1	23,19	

Fuente: propia

9.2.1.4 Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 0%

En las Tabla 26, Tabla 27 y Tabla 28 que se encuentran a continuación, se puede observar los resultados de las distintas mezclas que fueron probadas a los 7, 14 y 28 días de elaboradas, destacándose aspectos como la carga que fue aplicada y el área de cada uno de los especímenes de concreto, elementos fundamentales para poder determinar la resistencia a la compresión en las diferentes edades. Se realizó 15 veces la prueba de resistencia a la compresión en cada una de las edades, los resultados son los siguientes:

Tabla 26. Resultados Resistencia Compresión Limalla 0% a 7 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
0	1	15,27	18313,36	282,1	15,40	15,02
		15,35	18505,75	265,6	14,35	
		15,26	18289,38	280,0	15,31	
	2	15,60	19113,45	306,4	16,03	15,93
		15,75	19482,78	291,5	14,96	
		15,37	18554,00	311,8	16,80	
	3	15,40	18626,50	266,3	14,30	13,29
		15,31	18409,43	206,6	11,22	
		15,25	18265,42	261,9	14,34	
	4	15,05	17789,46	219,7	12,35	12,62
		15,30	18385,39	227,5	12,37	
		15,65	19236,17	252,5	13,13	
	5	15,15	18026,65	195,8	10,86	11,62
		15,30	18385,39	229,4	12,48	
		15,27	18313,36	211,2	11,53	

Fuente: propia

Tabla 27. Resultados Resistencia Compresión Limalla 0% a 14 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
0	1	15,26	18289,38	336,9	18,42	17,22
		15,23	18217,54	340,1	18,67	
		15,20	18145,84	264,3	14,57	
	2	15,00	17671,46	305,2	17,27	18,08
		14,90	17436,62	335,8	19,26	
		14,66	16879,43	299,2	17,73	
	3	15,30	18385,39	315,4	17,15	16,54
		15,53	18942,30	300,3	15,85	
		15,00	17671,46	293,4	16,60	
	4	15,26	18289,38	278,2	15,21	13,86
		15,26	18289,38	226,7	12,40	
		15,26	18289,38	255,4	13,96	
	5	14,73	17041,01	240,4	14,11	13,47
		14,90	17436,62	239,9	13,76	
		14,63	16810,42	210,7	12,53	

Fuente: propia

Tabla 28. Resultados Resistencia Compresión Limalla 0% a 28 Días

% Limalla	Mezcla N°	ϕ (cm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	σ (MPa)	σ_{prom} (MPa)
0	1	15,23	18217,54	400,4	21,98	21,07
		15,57	19040,01	382,3	20,08	
		15,37	18554,00	392,5	21,15	
	2	15,27	18313,36	420,5	22,96	23,56
		15,20	18145,84	456,7	25,17	
		15,37	18554,00	418,2	22,54	
	3	15,17	18074,28	367,2	20,32	20,73
		15,20	18145,84	375,1	20,67	
		15,17	18074,28	383,2	21,20	
	4	15,17	18074,28	350,4	19,39	18,79
		15,20	18145,84	325,6	17,94	
		15,20	18145,84	345,6	19,05	
	5	15,23	18217,54	312,4	17,15	17,95
		15,13	17979,09	322,8	17,95	
		15,10	17907,86	335,6	18,74	

Fuente: propia

9.3. Módulo de Elasticidad Estático

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la determinación del módulo de elasticidad estático de mezclas de concreto, en el cual se puede observar el procedimiento para calcularlo. Es importante anotar que este ensayo se hizo a una edad de 28 días de elaboración de los especímenes de concreto, y este procedimiento fue realizado 55 veces. Además se destacan aspectos importantes como la carga máxima aplicada y la máxima deformación.

9.3.1. Cálculo Tipo para Determinar el Módulo de Elasticidad Estático

Para poder determinar el módulo de elasticidad estático del concreto, gracias a la colaboración de la Ingeniera Claudia Patricia Retamoso Llamas se elaboró conjuntamente una hoja de cálculo para tal fin.

Primero se necesita conocer los valores de excentricidad del espécimen del concreto y su diámetro, con el cual se calcula el área, como se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29. Valores de Excentricidad y Diámetro de la muestra

Propiedades Módulo Elasticidad	
ε_r (cm)	4,60
ε_g (cm)	5,10
ϕ (mm)	155,7
Área (mm ²)	19040,01

Fuente: Propia

Es importante anotar que para poder determinar este módulo de elasticidad estático se decidió hallarlo a través del uso de métodos numéricos, ya que proporcionan un mayor grado de confiabilidad comparado con las líneas de tendencias que agrega el programa Excel, sus ecuaciones son las que se encuentran a continuación.

$$a_1 = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \text{ Ecuación 9.1.}$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \cdot \bar{x} \text{ Ecuación 9.2.}$$

Las anteriores ecuaciones representan el comportamiento de la regresión lineal, donde a_0 representa el corte con el eje Y, a_1 representa la pendiente de la recta, n representa la cantidad de datos, x_i representa la deformación longitudinal, y_i representan la carga aplicada.

En la Tabla 30, se muestra una parte del procedimiento para determinar el módulo de elasticidad estático de muestras de concreto, es importante aclarar cómo se calculan la columna de deformación longitudinal total (d) del espécimen de concreto y la conversión que se hace para hallar las deformaciones longitudinales ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) en milímetros.

$$d = \frac{\varepsilon_{promedio} \cdot e_r}{(e_r + e_g)} \text{ Ecuación 9.3.}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot (0.01mm) \cdot 0.01}{100} \text{ Ecuación 9.4.}$$

Tabla 30. Procedimiento para determinar el Módulo de Elasticidad Estático

No	Carga (KN)	ε_1 (0.01 mm)	ε_1 (mm)	ε_2 (0.01mm)	ε_2 (mm)	ε promedio
1	0	0	0	0	0	0
2	20	1	0,0001	1	0,0001	0,0001
3	40	2,5	0,00025	3	0,0003	0,000275
4	60	4	0,0004	4,5	0,00045	0,000425
5	80	5,5	0,00055	7	0,0007	0,000625
6	100	7	0,0007	8,5	0,00085	0,000775
7	120	9	0,0009	10,5	0,00105	0,000975
8	140	11	0,0011	12	0,0012	0,00115
9	160,56	12,5	0,00125	14	0,0014	0,001325

No	d (mm)	σ (MPa)	d σ	d ²
1	0	0	0	0
2	4,7423E-05	1,05041978	4,9814E-05	2,2489E-09
3	0,00013041	2,10083955	0,00027398	1,7007E-08
4	0,00020155	3,15125933	0,00063512	4,0621E-08
5	0,00029639	4,2016791	0,00124534	8,7848E-08
6	0,00036753	5,25209888	0,00193028	1,3508E-07
7	0,00046237	6,30251865	0,0029141	2,1379E-07
8	0,00054536	7,35293843	0,00401	2,9742E-07
9	0,00062835	8,43276995	0,00529874	3,9482E-07
	0,00267938	37,8445237	0,01635738	1,1888E-06

Fuente: propia

Para tener una mejor visualización de los datos involucrados para determinar el módulo de elasticidad estático, es aconsejable representarlos a través de una gráfica como la siguiente.

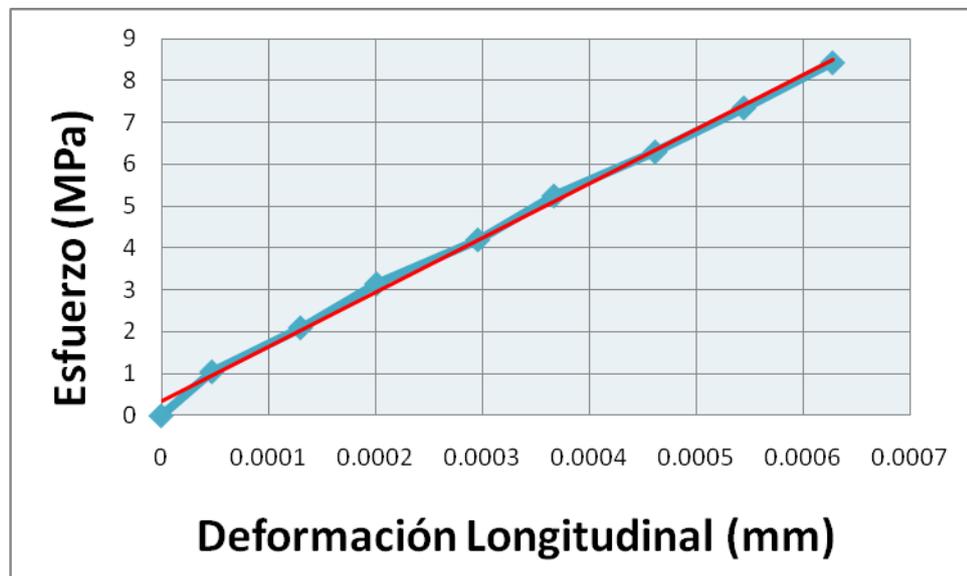


Figura 22. Módulo de Elasticidad Estático de Mezclas de Concreto.
Fuente: Propia.

Ahora es necesario determinar la ecuación de la recta haciendo uso de las ecuaciones 9.1. y 9.2., para esto se debe conocer inicialmente la cantidad de

datos (n), el promedio de la deformación longitudinal (d) y el promedio del esfuerzo (σ). como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
 n &= 9 \\
 d \text{ promedio} &= 0.00020611 \text{ mm} \\
 \sigma \text{ promedio} &= 2.9111172 \text{ MPa} \\
 a_1 &= 13014.6202 \\
 a_0 &= 0.22872244
 \end{aligned}$$

Seguido a este proceso, es necesario conocer tanto el esfuerzo máximo ejercido (ε_2), como también el esfuerzo producido por la 50 millonésima parte de la deformación longitudinal.

$$\varepsilon_1 = a_1 \cdot 0.00005 + a_0 \text{ Ecuación 9.5.}$$

$$\varepsilon_1 = 13014.6202 \cdot 0.00005 + 0.22872244 = 0.879 \text{ MPa}$$

Por último se procede a calcular el módulo de elasticidad estático del concreto, de la siguiente forma.

$$E = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{(d_{\text{máx}} - 0.00005)} \text{ Ecuación 9.6.}$$

$$E = \frac{(8.433 - 0.879)}{(0.00062835 - 0.00005)} = 13060.1016 \text{ MPa}$$

El anterior procedimiento se realizó para las demás muestras, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 31.

Tabla 31. Resultados del Módulo de Elasticidad Estático

% Limalla Fina	Mezcla N°	Carga Máxima (KN)	Deformación Longitudinal Máxima (mm)	Módulo Elasticidad Estático (MPa)	Módulo Elasticidad Estático Promedio (MPa)
3,5	1	160,56	0,0006437	13502,53	12881,39
	1	160,56	0,0006697	12260,25	
	2	245,36	0,0009760	13770,36	14111,84
	2	245,36	0,0010224	14453,31	
	3	184,12	0,0008837	12174,69	12150,82
	3	184,12	0,0007746	12126,95	
	4	215,96	0,0013734	8320,61	9487,18
	4	215,96	0,0010453	10653,75	
	5	134,52	0,0006429	11648,87	11563,85
	5	134,52	0,0006693	11478,83	

Continuación Tabla 31. Resultados del Módulo de Elasticidad Estático.

4,5	1	182,60	0,0007232	12884,70	11976,52
	1	190,88	0,0008701	11262,94	
	1	202,48	0,0009906	11471,64	
	1	205,72	0,0008813	13162,59	
	1	196,00	0,0009198	11100,74	
4,5	2	165,56	0,0008611	10429,78	12745,33
	2	216,68	0,0008944	13598,63	
	2	221,16	0,0008571	13044,97	
	2	225,64	0,0010750	12707,05	
	2	196,80	0,0008465	13946,25	
4,5	3	175,92	0,0008420	12154,14	11714,97
	3	212,44	0,0010600	11058,99	
	3	220,32	0,0009898	11306,17	
	3	196,00	0,0009291	11873,77	
	3	220,52	0,0009258	12181,76	
4,5	4	193,52	0,0009262	11552,21	10856,96
	4	211,68	0,0009583	11749,95	
	4	192,36	0,0010034	10042,72	
	4	203,04	0,0010476	10221,04	
	4	194,76	0,0009683	10718,90	
4,5	5	202,84	0,0010313	10553,51	10825,40
	5	203,04	0,0009873	11343,64	
	5	196,88	0,0008272	13463,72	
	5	206,36	0,0011818	9594,92	
	5	193,24	0,0011125	9171,23	
5,5	1	219,40	0,0012576	10070,26	11293,26
	1	219,40	0,0008959	12516,25	
	2	215,44	0,0009463	12539,76	12362,01
	2	215,44	0,0009333	12184,27	
	3	183,08	0,0008490	11695,20	13294,82
	3	183,08	0,0006722	14894,45	
	4	193,36	0,0008128	12814,47	12613,49
	4	193,36	0,0008578	12412,51	
	5	156,20	0,0007107	11920,62	11946,34
5	156,20	0,0007200	11972,06		
0	1	160,16	0,0007121	11392,25	11190,18
	1	160,16	0,0007643	10988,11	
	2	168,20	0,0006490	14167,35	13293,45
	2	168,20	0,0007176	12419,54	
	3	146,88	0,0010782	7362,93	9080,92
	3	146,88	0,0007112	10798,91	
	4	140,16	0,0005818	13234,25	12598,63
	4	140,16	0,0006310	11963,01	
	5	124,96	0,0006204	11058,19	12149,64
5	124,96	0,0005296	13241,09		

Fuente: Propia.

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo, se realizará el análisis de los datos que se obtuvieron a lo largo de este trabajo de grado, para ello se utilizarán las especificaciones estipuladas por el INVIAS, por la NTC y por la ASTM, para poder determinar el grado de aceptación de los materiales que fueron utilizados en el desarrollo de esta tesis. Además, se realizará el análisis de los datos obtenidos en la determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de muestras de concreto.

10.1. Con Respecto a la Caracterización de los Materiales.

Para realizar un análisis detallado de los materiales que se utilizaron en las mezclas de concreto, es necesario conocer los requisitos que establecen las especificaciones de las distintas normas encargadas para tal fin. Es por esto, que a continuación se presenta una tabla con los valores exigidos por las especificaciones, los valores obtenidos en el laboratorio y su grado de aceptación, lo cual proporciona argumentos para decidir o no el uso de estos materiales en las mezclas de concreto, lo cual depende en gran parte del estado en que se encuentren los mencionados materiales

Tabla 32. Requisitos de los agregados

PROPIEDAD FÍSICO-MECÁNICA	VALORES ²⁷	AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO	CONDICIÓN
Equivalente de Arena (%)	≥ 30	---	88,43	OK
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%)	≤ 40	34,67	---	OK
Contenido de Materia Orgánica	≤ 3	---	2	OK
Índice de Alargamiento (%)	≤ 35	22,19	---	OK
Índice de Aplanamiento (%)	≤ 35	14,61	---	OK
Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables (%)	≤ 3	0,18	2,87	OK
Caras Fracturadas (%)	≥ 50	72,45	---	OK

Fuente: propia

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se observa que las propiedades físico – químicas de los materiales utilizados en las mezclas de concreto, se encuentran entre los rangos establecidos por las especificaciones, lo cual es un elemento fundamental que brinda confianza y seguridad para poder utilizar los materiales en la elaboración de especímenes de concreto.

Además es importante anotar, que dentro de las especificaciones no existen valores o rangos para todos los ensayos que se realizaron en este trabajo de grado, debido a que no hay un patrón estándar con el cual se puedan comparar los resultados obtenidos.

²⁷ Especificaciones del INVIAS (Artículo 300), ASTM-C33 y NTC 174.

10.1.1. Análisis Granulométrico.

Para poder determinar si las curvas granulométricas obtenidas en los ensayos realizados en el laboratorio son aceptadas por los valores que estipulan las especificaciones de la ASTM C – 144, es necesario graficar la curva ideal para cada uno de los agregados trabajados y compararlas con las obtenidas.

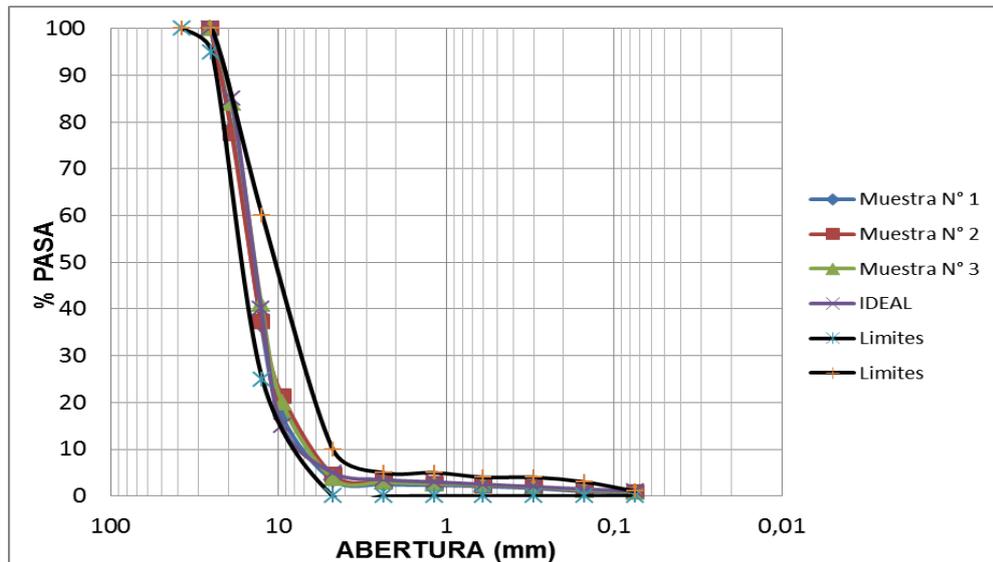


Figura 23. Curvas Granulométricas Agregado Grueso Respecto Curva Ideal.

Fuente: propia

La Figura 23 representa el comportamiento del agregado grueso con respecto a la curva ideal, en la cual se evidencia que las muestras trabajadas se encuentran cerca de los requisitos establecidos por la ASTM, lo cual brinda seguridad y confianza en el uso del agregado grueso para elaborar muestras de concreto.

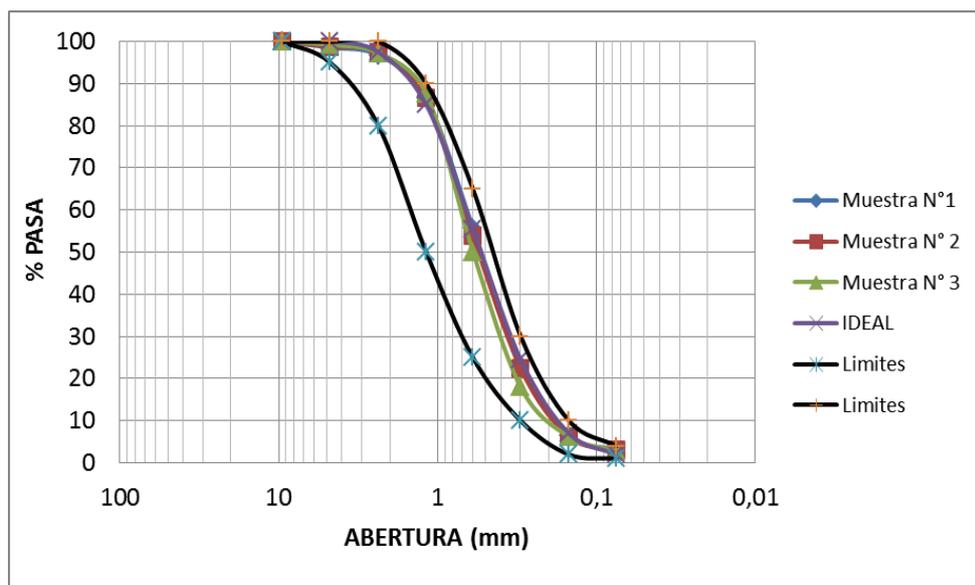


Figura 24. Curvas Granulométricas Agregado Fino Respecto Curva Ideal.

Fuente: propia

La Figura 24 representa el comportamiento del agregado fino comparado con los requisitos que establece la ASTM en cuanto a la gradación del material. En ésta se observa que la tendencia de las curvas de los agregados finos trabajados en el laboratorio, tienen un comportamiento similar al de la curva ideal, lo cual indica que el agregado fino se encuentra en buenas condiciones para su posterior uso.

Tomando como referencia los anteriores resultados obtenidos, se puede concluir que estas curvas granulométricas tendidas corresponden a un agregado con una gran variedad de tamaños de partículas, lo que quiere decir, que es bien gradada.

10.1.2. Densidad del Cemento.

Teniendo en cuenta el rango de valores de la densidad del cemento Portland tipo I, los cuales se encuentran entre 2,85 y 3,15 gr/cm³; y teniendo en cuenta el valor que se obtuvo en el ensayo de laboratorio realizado, el cual fue de 3,06 gr/cm³, se evidencia claramente que el anterior valor se encuentra dentro del rango estipulado por las especificaciones, lo cual proporciona confianza y seguridad en su posterior uso.

10.1.3. Densidad de la Limalla de Hierro Gris.

Para empezar es importante aclarar que no existe hasta el momento una norma que rija el ensayo para determinar la densidad de la limalla de hierro gris, que será utilizada en mezclas de concreto, debido a que es un agregado no convencional. Por lo anterior, no hay un rango de valores para poder conocer y determinar el grado de aceptabilidad de este material en su posterior uso en mezclas de concreto, aunque es preciso anotar que el valor de la densidad de la limalla de hierro gris fue de 5,92 gr/cm³.

10.2. Con Respecto al Concreto en Estado Endurecido.

Es de gran importancia realizar un análisis tanto de la resistencia a la compresión como del módulo de elasticidad estático del concreto, para esto, se realizará a través de gráficas, las cuales permiten una mejor visualización y comprensión de los resultados.

10.2.1. Resistencia a la Compresión de Muestras de Concreto.

Para entender mejor el comportamiento de las distintas mezclas de concreto adicionadas con limalla de hierro gris, se procederá a analizar cada una de estas teniendo en cuenta la resistencia a la compresión para cada una de las edades trabajadas (7, 14 y 28 días de elaboración). También se realizará un análisis teniendo como referencia la edad de elaboración, observando el comportamiento de las mezclas de concreto para cada uno de los porcentajes de limalla de hierro gris utilizados en este trabajo de grado.

Es importante recordar que la mezcla de concreto se diseñó para que resista 21 Mega Pascales (MPa) a una edad de 28 días, como también es necesario nombrar que la resistencia del concreto a una edad de 7 días se debe encontrar alrededor de 14 Mega Pascales (MPa), y a los 14 días alrededor de 17 Mega Pascales (MPa).

10.2.1.1 Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 3,5%.

El comportamiento y tendencia de la limalla fina del 3,5% en cada una de las edades difiere para las distintas mezclas, aunque a los 28 días de elaborados los especímenes de concreto se observa cierta similitud entre ellos. Se nota que todas las mezclas a la edad de 28 días superaron la resistencia a la cual estaban diseñadas; también se observa que la mezcla N°4 y N°5 a la edad de 7 días no cumple con la resistencia mínima establecida por la norma, como también se evidencia que la mezcla N°5 tampoco cumple con este requisito en la edad de 14 días. Por último, se observa que el aumento de resistencia a las diferentes edades estudiadas fueron muy similares.

En la Figura 25 se puede observar que la mezcla N°2 con limalla de hierro gris del 3,5%, tiene el mejor comportamiento con respecto a la resistencia a la compresión a los 28 días, aunque en las primeras dos edades no se evidencia un aumento significativo del esfuerzo.

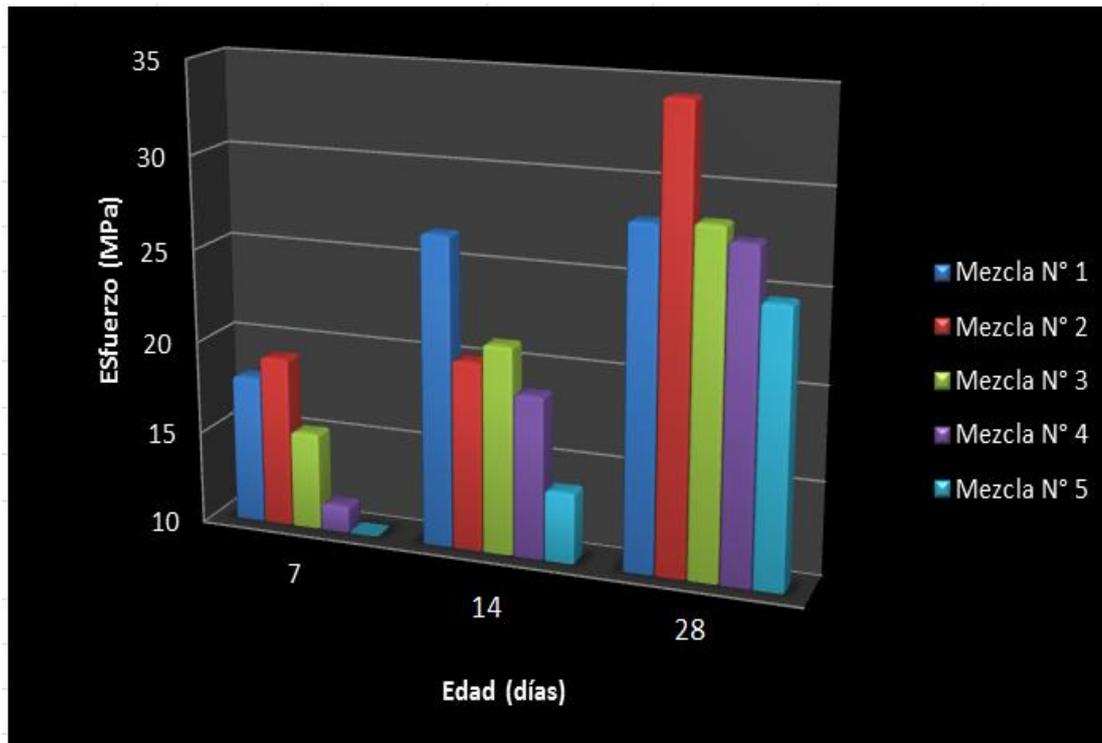


Figura 25. Resistencia a la Compresión Limalla Fina 3,5%

Fuente: propia

10.2.1.2 Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 4,5%.

Según los resultados que se encuentran en la Figura 26, se observa que el comportamiento de las mezclas de concreto adicionadas con el 4,5% de limalla fina tienen una tendencia similar, aunque cabe anotar que tanto la mezcla N°4 y N°5 a la edad de 7 días no alcanzaron la resistencia mínima; mientras que la mezcla N° 5 a una edad de 14 días tampoco alcanzo el requisito de resistencia. Por otra parte se evidencia que todas las mezclas sobrepasaron la resistencia mínima que debían soportar a la edad de 28 días, en esta misma edad se observa que todas las mezclas menos la N°2 alcanzan a tener una resistencia cercana. Se puede observar en la gráfica que las tendencias de los esfuerzos con respecto a la edad, tienen un comportamiento similar.

Teniendo como base la Figura 26 se puede evidenciar que la mezcla que mejor se comportó fue la mezcla N°2, y se observa un aumento significativo en cada una de las edades, aunque no fue el mayor valor en cada una de estas. El comportamiento atípico de la mezcla No 1, puede indicar que aunque tenga mayor cantidad de agregado grueso, esto no indica que a la edad de 28 días, seguirá aumentando con pendiente como se muestra en la Figura 26, ya que el agregado grueso presenta en la mezcla mucha porosidad, lo que no le da tanta resistencia al concreto con el tiempo.

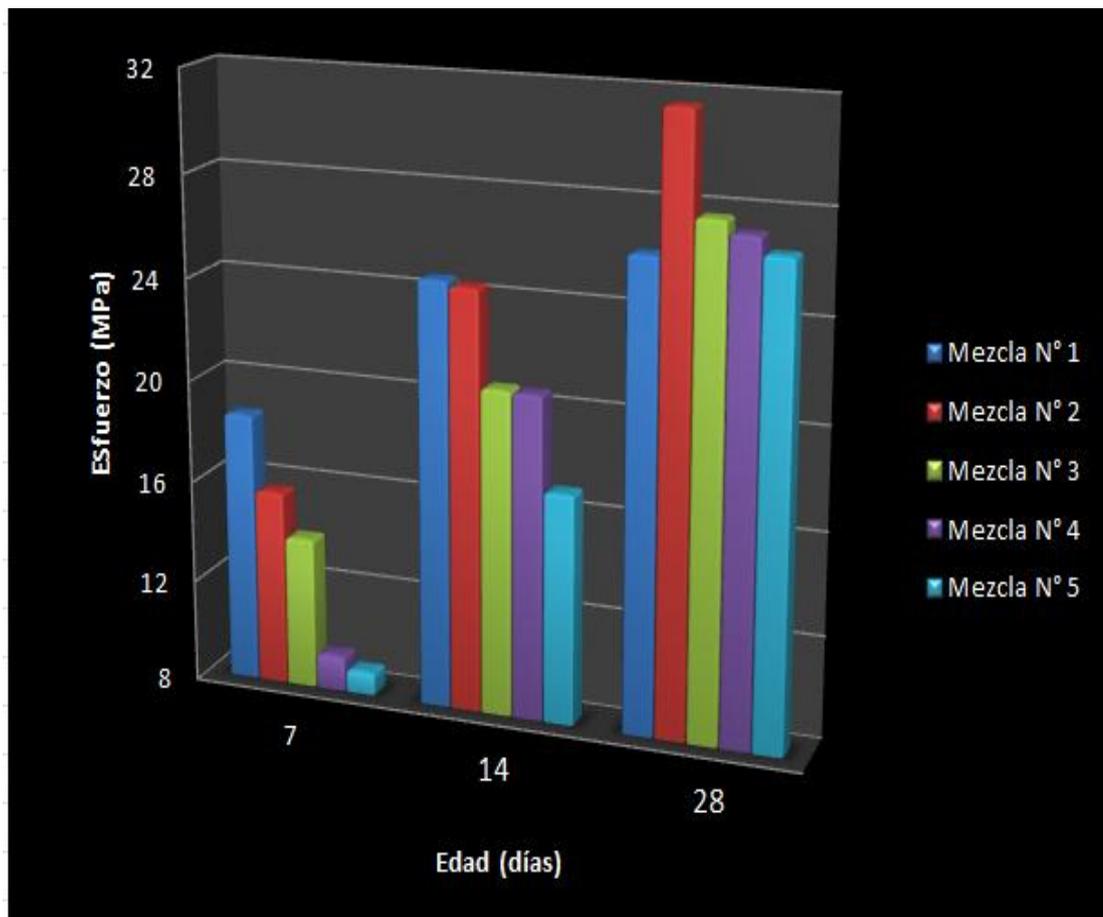


Figura 26. Resistencia a la Compresión Limalla Fina 4,5%

Fuente: propia

10.2.1.3 Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 5,5%.

La Figura 27 muestra el análisis de la limalla fina del 5,5%, muestra un comportamiento similar en la mayoría de las mezclas, aunque se evidencia que la mezcla N°5 a la edad de 7 días no alcanza la resistencia mínima establecida, como también a la edad de 14 días la mezcla N°4 tampoco la alcanza. Por otra parte, todas las mezclas sobre pasan la resistencia a la cual fueron diseñadas a una edad de 28 días. Se puede observar que el aumento de la resistencia a la compresión no fue significativo en la edad de 7 días hasta la edad de 14 días en todas las mezclas menos la N°5. Por último, se evidencia que la mezcla N°2 tiene una resistencia superior a todas las edades ensayadas.

Como se puede observar en la Figura 27, la mezcla N°2 obtuvo el mejor resultado con respecto a la resistencia a la compresión en todas las edades, aunque a la edad de 14 días su incremento no fue muy significativo.

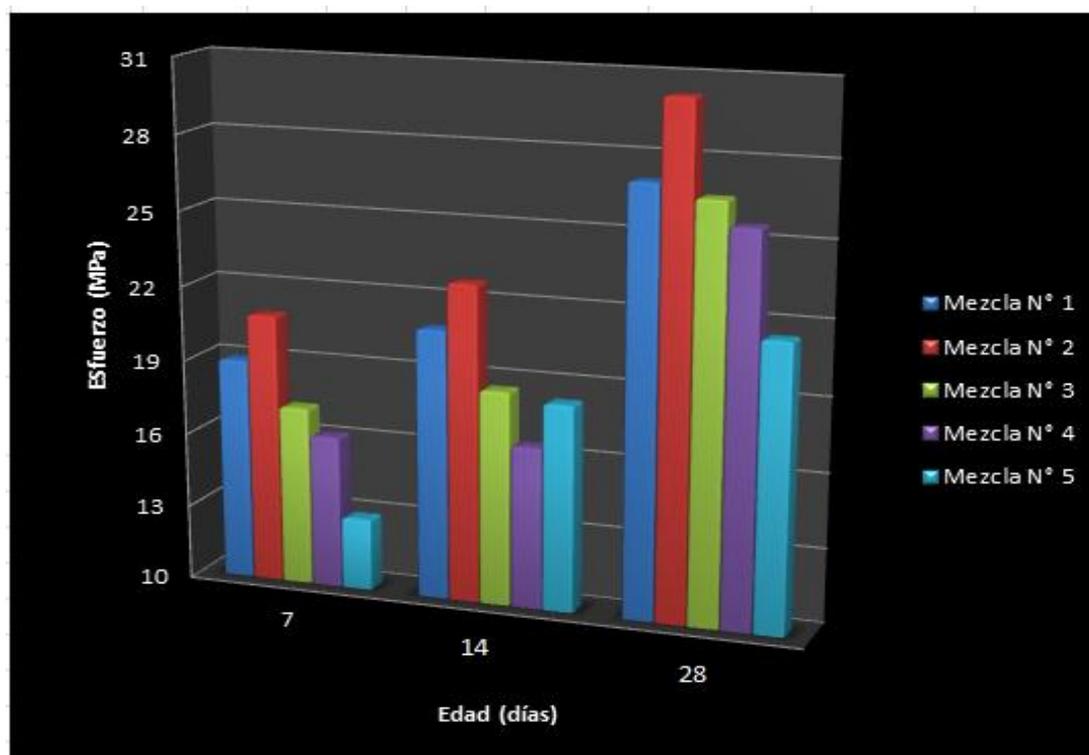


Figura 27. Resistencia a la Compresión Limalla Fina 5,5%

Fuente: propia

10.2.1.4 Resistencia a la Compresión Limalla de Hierro Gris 0%.

Según el comportamiento de la Figura 28, se observa que la tendencia en las diferentes mezclas es similar, aunque a la edad de 7 días tanto la mezcla N°3, N°4 y N°5 no alcanzaron la resistencia mínima. Además a la edad de 14 y 28 días tanto la mezcla N°4 y N°5 no alcanzaron la resistencia mínima a la cual

estaban diseñadas. Por último, se evidencia que la mezcla N°2 predominó en cada una de las edades a las que fueron probadas.

En la Figura 28, se evidencia que la mezcla que arrojó la mayor resistencia a la compresión fue la mezcla N°2, además ésta siempre obtuvo el mejor resultado en cuanto al esfuerzo en cada una de las edades a las que fue probada.

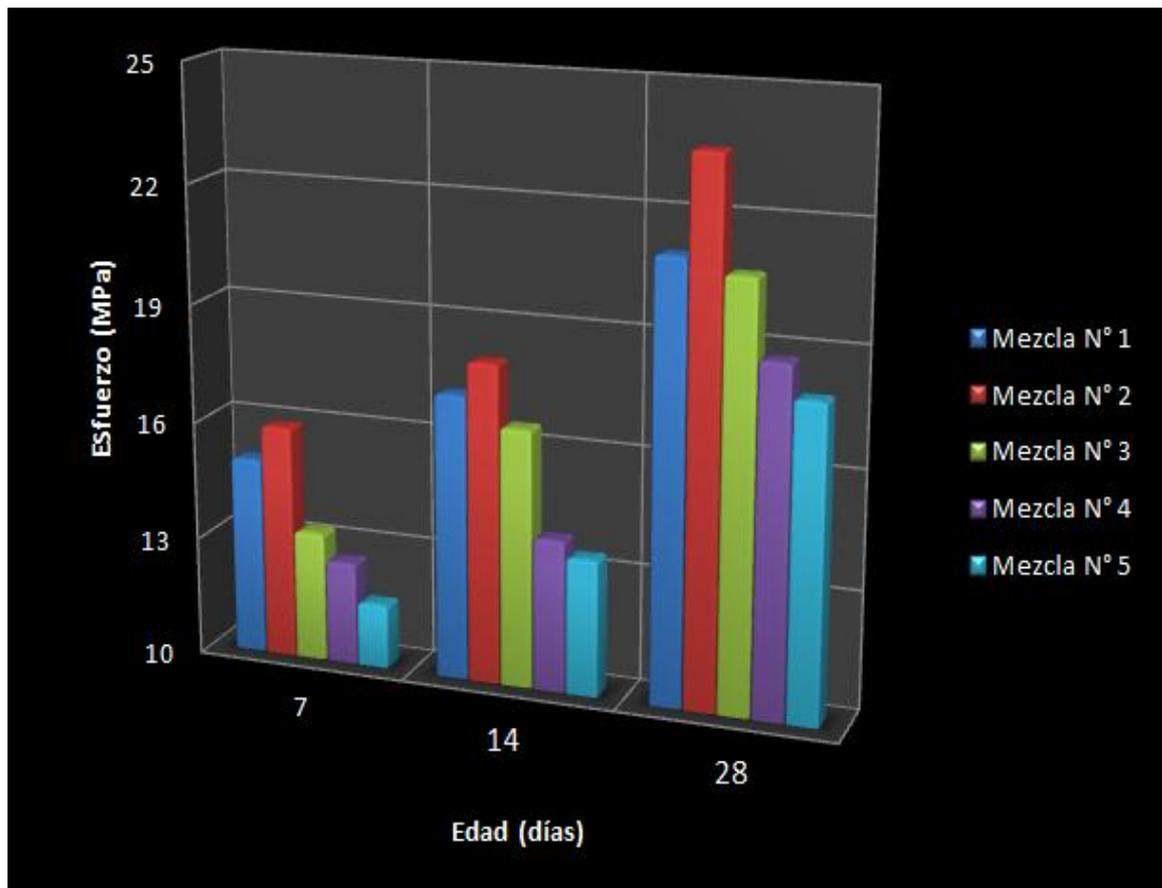


Figura 28. Resistencia a la Compresión Limalla Fina 0%

Fuente: propia

10.2.2. Comparación de los valores de resistencia máxima a los 7, 14 y 28 días para las distintas mezclas de concreto.

Para analizar y comprender de una mejor forma el comportamiento de los porcentajes de limalla de hierro gris en las mezclas de concreto, es necesario representarlo a través de las edades en las que fueron probadas.

10.2.2.1 Resistencia a la Compresión de la Limalla Fina a los 7 días.

En la Figura 29, se evidencia que la mezcla N°2 perteneciente al porcentaje de limalla de hierro gris del 5,5% fue la que mejor se comportó, ya que adquirió una resistencia cercana a los 21 MPa.

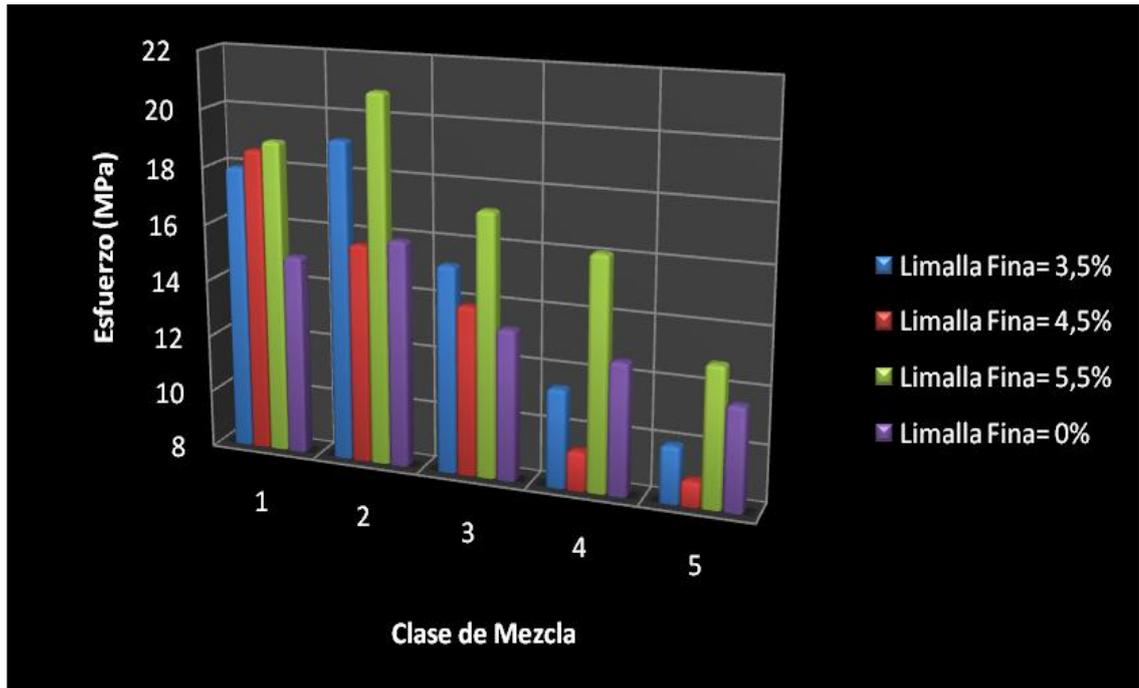


Figura 29. Resistencia a la Compresión Limalla Fina 7 días

Fuente: propia

10.2.2.2 Resistencia a la Compresión de la Limalla Fina a los 14 días.

Según la Figura 30, se observa que la mezcla N°1 perteneciente a la limalla de hierro gris del 3,5% arrojó la mayor resistencia a la compresión en esta edad, debido a que su valor se encuentra alrededor de los 27 MPa.

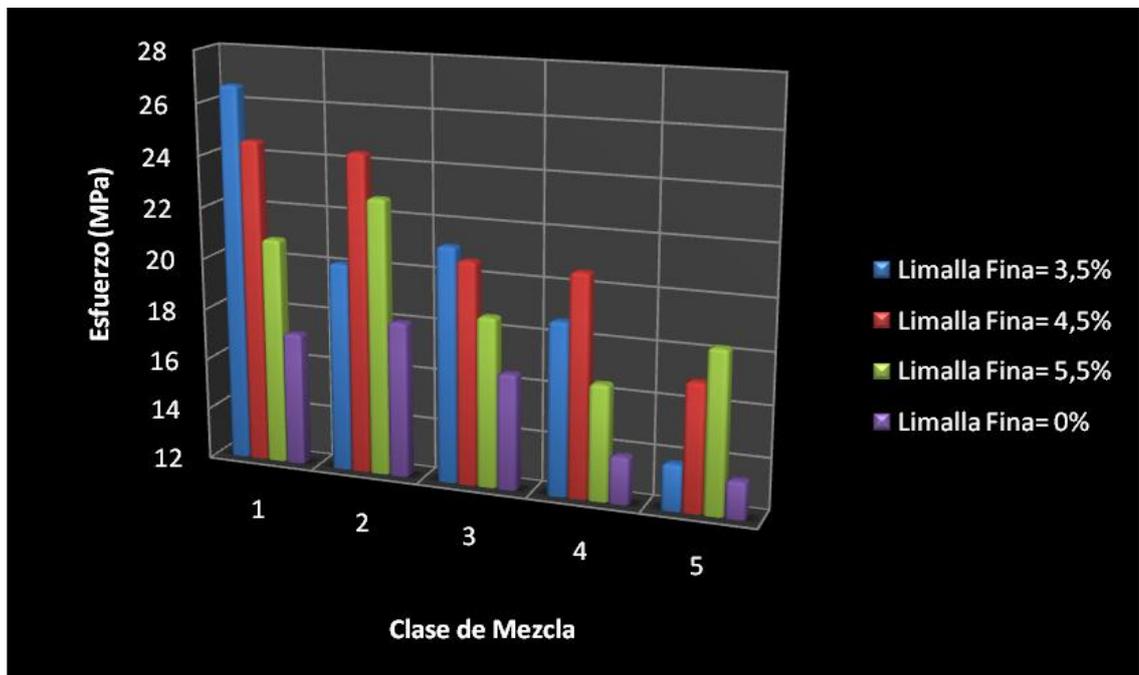


Figura 30. Resistencia a la Compresión Limalla Fina 14 días

Fuente: propia

10.2.2.3 Resistencia a la Compresión de la Limalla Fina a los 28 días.

En la Figura 31, se evidencia que la mezcla N°2 perteneciente al porcentaje de limalla de hierro gris del 3,5% fue la que mejor se comportó, ya que adquirió una resistencia cercana a los 35 MPa.

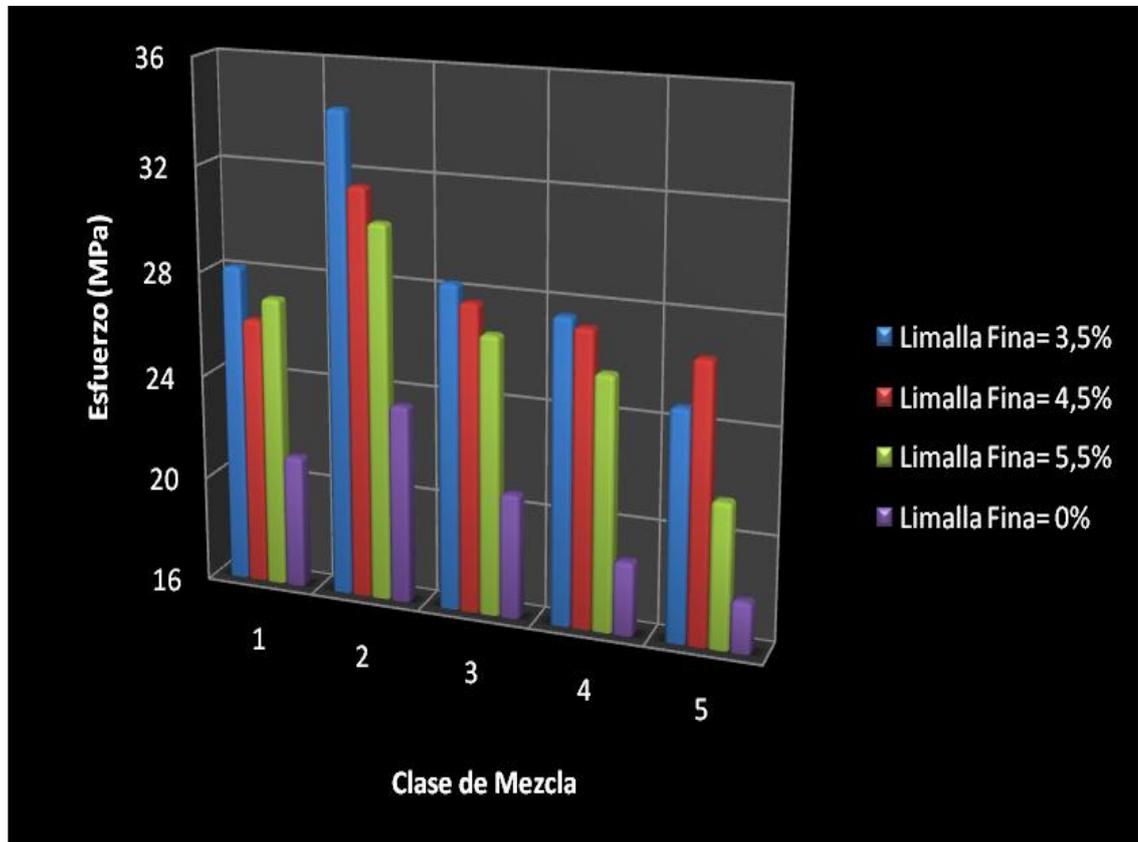


Figura 31. Resistencia a la Compresión Limalla Fina 28 días

Fuente: propia

10.2.3. Resumen de los Resultados de la Resistencia a la Compresión de Mezclas de Concreto Adicionadas con Limalla Fina.

En la Tabla 33, se hace un resumen de todos los resultados que se obtuvieron de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto adicionadas con limalla de hierro gris.

También se puede observar cual es la mezcla que aporta mayor resistencia a la compresión en cada una de las edades trabajadas, como también se evidencia cual es la mayor resistencia en cada una de las mezclas.

Por otra parte se encuentra una sección de la tabla correspondiente al porcentaje de aumento de mezclas de concreto adicionadas con limalla fina con respecto a las mezclas de concreto convencionales. El procedimiento para calcular este porcentaje se realiza de la siguiente forma.

$$\% \text{ Aumento} = \frac{(\text{Esfuerzo Limalla Fina} - \text{Esfuerzo Mezcla Convencional})}{\text{Esfuerzo Mezcla Convencional}(\text{Limalla } 0\%)} \cdot 100\%$$

Ecuación 10.1.

En este punto, se realiza una comparación con respecto al aumento que presentó cada muestra con respecto al esfuerzo que se determinó en las mezclas sin adición de limalla fina.

Por lo anterior, se observa que en la mayoría de muestras de la mezcla 2, se presenta aumento de la resistencia a la compresión respecto a la muestra base.

Tabla 33. Resumen de los Resultados de la Resistencia a la Compresión de Mezclas de Concreto

% Limalla	Mezcla N°	Esfuerzo (MPa)			% Aumento		
		7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días
3,5	1	17,98	26,67	28,17	19,72%	54,88%	33,71%
	2	19,19	20,15	34,35	20,45%	11,44%	45,82%
	3	15,25	21,18	28,35	14,82%	28,09%	36,74%
	4	11,46	18,74	27,57	-9,19%	35,24%	46,69%
	5	10,00	13,81	24,73	-13,98%	2,54%	37,81%
4,5	1	18,63	24,61	26,22	24,01%	42,92%	24,45%
	2	15,66	24,43	31,59	-1,69%	35,07%	34,09%
	3	13,94	20,70	27,71	4,89%	25,16%	33,66%
	4	9,38	20,65	27,23	-25,68%	49,05%	44,90%
	5	8,89	17,00	26,58	-23,48%	26,21%	48,09%
5,5	1	18,98	20,87	27,10	26,32%	21,19%	28,59%
	2	20,89	22,77	30,30	31,10%	25,89%	28,63%
	3	17,23	18,64	26,61	29,67%	12,71%	28,34%
	4	16,16	16,53	25,64	28,06%	19,27%	36,45%
	5	12,90	18,33	21,51	10,98%	36,14%	19,88%
0	1	15,02	17,22	21,07			
	2	15,93	18,08	23,56			
	3	13,29	16,54	20,73			
	4	12,62	13,86	18,79			
	5	11,62	13,47	17,95			

Fuente: propia

Teniendo en cuenta, los resultados de la Tabla 33, se puede llegar a concluir que la mejor mezcla y porcentaje de limalla fina que sobresalieron por sus resultados fue la limalla de hierro gris de 3,5% con la mezcla N° 2.

A los 28 días, se presenta a continuación un análisis detallado del comportamiento de la Mezcla 2, la que presentó mayor aumento de resistencia respecto a la Mezcla 2, sin adición de limalla fina.

En la Figura 32, se observa que la mezcla de limalla de 3.5% de adición respecto al peso del agregado fino, a los 28 días, es la que presenta mayor

aumento de resistencia, por tal motivo, se puede sugerir a partir de estos resultados, que el porcentaje a adicionar de limalla fina en las mezclas de concreto puede estar entre los valores de 3.0% – 3.5%, o de 3.5% – 4.0%, por cuanto no se cuenta con valores específicos de esos porcentajes, los cuales fueron analizados en otro trabajo de grado, por lo cual no se puede concluir claramente respecto a este comportamiento. El análisis de estos resultados, se desarrollaran en la investigación general titulada “Mejoramiento de las Propiedades del Concreto Adicionado con Viruta de Acero”, desarrollada por la Ing. Claudia Patricia Retamoso Llamas, investigación matriculada en la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

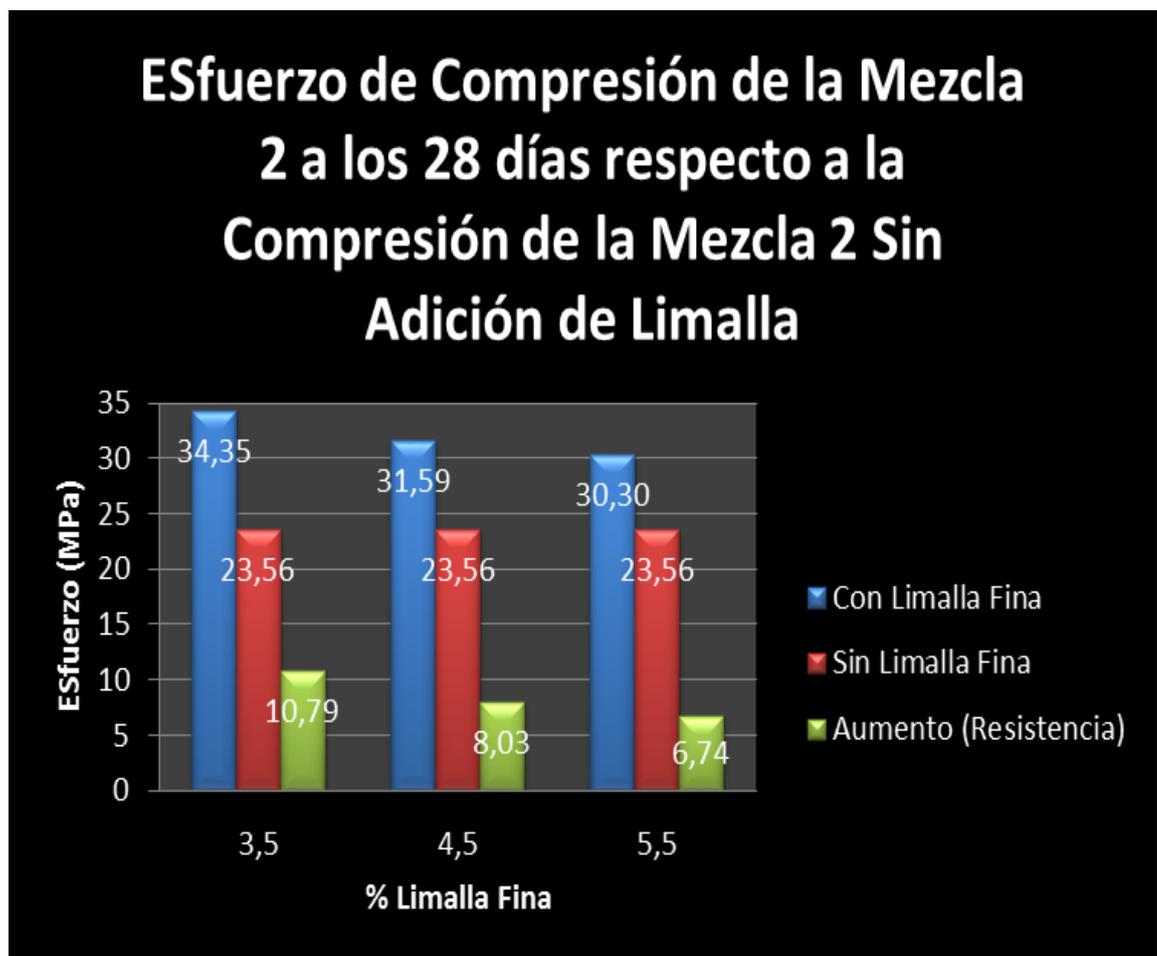


Figura 32. Análisis del Aumento de Resistencia a Compresión en la Mezcla 2 a los 28 días de edad del Concreto con respecto a la Mezcla Convencional
Fuente: Propia

10.2.4. Módulo de Elasticidad Estático de Muestras de Concreto.

Para poder analizar y comprender mejor los resultados que se obtuvieron, es aconsejable representarlos a través de la elaboración de una gráfica y una tabla resumen, en las que se muestre el comportamiento de las diferentes

mezclas con cada porcentaje de limalla de hierro gris con respecto a los valores del módulo de elasticidad estático de muestras de concreto.

En la Tabla 34 se pueden observar los datos resumen que se obtuvieron con respecto a la determinación del módulo de elasticidad estático de especímenes de concreto. Es importante recalcar, que la Norma Sismo Resistente (NSR-98), propone determinar el módulo de elasticidad estático a través de la siguiente expresión.

$$E = 3900 * \sqrt{f'c} \text{ Ecuación 10.2}$$

Para nuestro caso, sabiendo que el valor a la resistencia a la compresión es de 21 MPa, el módulo según la norma tendría un valor de 17872,04 MPa, como se puede observar, el valor que propone la norma es considerablemente mayor a los obtenidos en el laboratorio, alrededor del 34.44% tiene de aumento el valor que recomienda la norma con respecto al que se halló en el laboratorio.

Tabla 34. Resumen de los Resultados del Módulo de Elasticidad Estático

% Limalla Fina	Mezcla N°	Módulo Elasticidad Estático (MPa)
3,5	1	12881,39
	2	14111,84
	3	12150,82
	4	9487,18
	5	11563,85
4,5	1	11976,52
	2	12745,33
	3	11714,97
	4	10856,96
	5	10825,40
5,5	1	11293,26
	2	12362,01
	3	13294,82
	4	12613,49
	5	11946,34
0	1	11190,18
	2	13293,45
	3	9080,92
	4	12598,63
	5	12149,64

Fuente: propia

Teniendo en cuenta el comportamiento de la Figura 33, se observa que los datos tienen una gran variabilidad, en los cuales se encuentran valores de módulo de elasticidad estático de mezclas de concreto entre 9080,92 MPa y 14111,84 MPa.

Además se evidencia que no existe un porcentaje de limalla de hierro gris que predomine en todas las mezclas, como tampoco una mezcla que se comporte de la misma forma en los diferentes porcentajes de limalla fina.

Por último, se observa que la mezcla que arrojó el mayor módulo de elasticidad estático fue la mezcla N° 2 y el porcentaje de limalla fina de hierro gris corresponde al 3,5%.

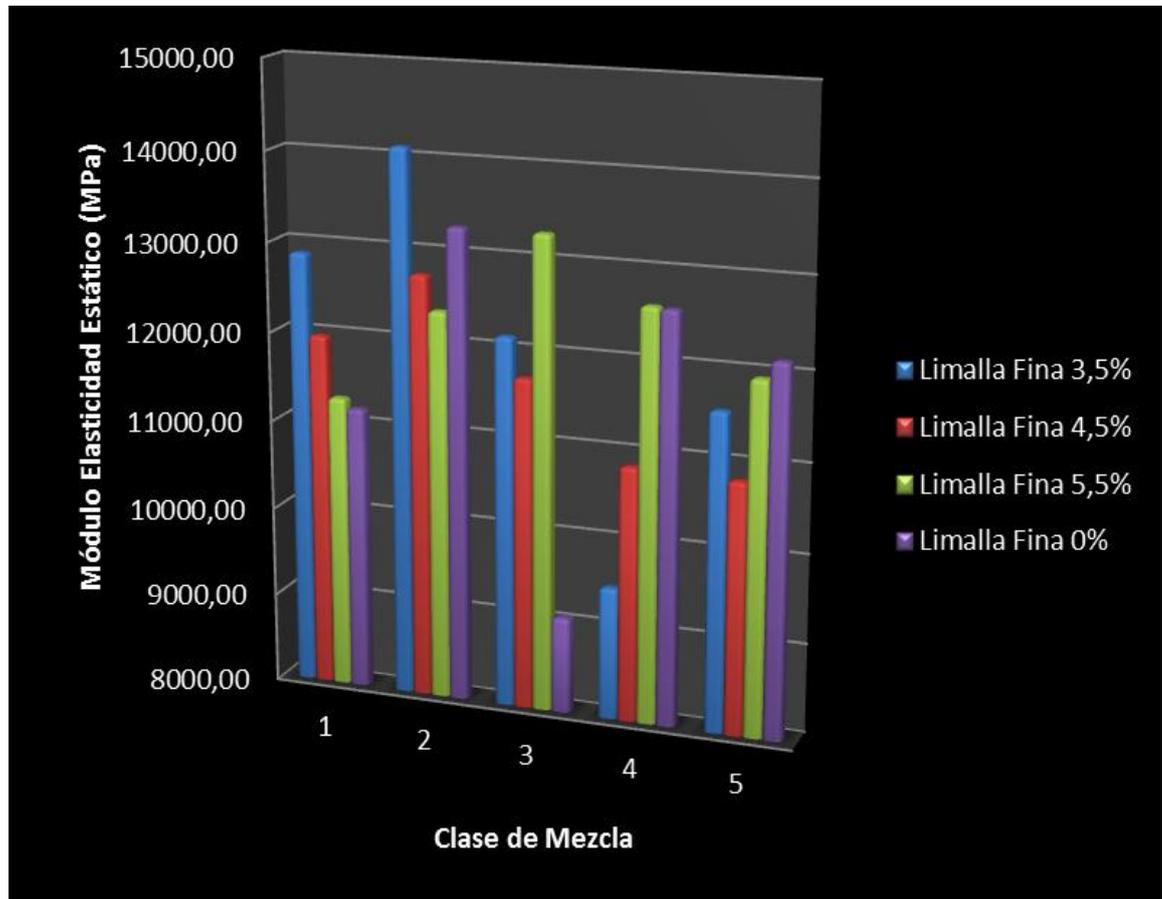


Figura 33. Comportamiento Módulo de Elasticidad Estático en Mezclas de Concreto

Fuente: propia

11. CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos en este trabajo de grado con respecto a la resistencia a la compresión de muestras de concreto, el porcentaje de limalla de hierro gris que aportó la mayor resistencia a una edad de 28 días fue del 3,5% con un valor promedio de 34,35 MPa, gracias a la distribución en peso de los porcentajes de la mezcla N° 2 (Agregado grueso= 65%, Agregado fino= 31,5% y Limalla fina= 3,5%).

En este trabajo de grado, se trabajaron cinco tipos de mezclas diferentes, las cuales varían sus proporciones con respecto al peso de los agregados, estas mezclas fueron: Mezcla N° 1 (Agregado grueso=70%, Agregado fino=30%), Mezcla N° 2 (Agregado grueso= 65%, Agregado fino= 35%), Mezcla N° 3 (Agregado grueso= 60%, Agregado fino= 40%), Mezcla N° 4 (Agregado grueso=55%, Agregado fino= 45%) y Mezcla N° 5 (Agregado grueso= 50%,Agregado fino= 50%). Es importante anotar que el agregado fino está conformado por la arena y la limalla fina.

Según los resultados del diseño de mezcla, se alcanzan valores considerablemente mayores con respecto a la resistencia a la compresión de especímenes de concreto, es decir, se proyectó para que resistiera 21 MPa, pero los datos obtenidos muestran un aumento cercano al 50%.

Los materiales que se utilizaron en el desarrollo de este trabajo de grado, proporcionan confianza, seguridad y calidad en la elaboración de mezclas de concreto, debido a que los valores de los ensayos y pruebas que se les realizaron, se encuentran dentro de los rangos estipulados por las especificaciones, lo cual garantiza el éxito de los resultados obtenidos en el transcurso de esta tesis.

Se observó que con la adición de la limalla de hierro gris a las mezclas de concreto, esta no afecta las propiedades de la mezcla en estado fresco, como son la fluidez y manejabilidad, lo cual permite que esta se adapte con facilidad en las diferentes estructuras donde será utilizada.

Se observa que el porcentaje de aumento de las mezclas adicionadas con limalla de hierro gris tanto en la edad de 14 y 28 días de elaboración son considerables con respecto a las mezclas convencionales, debido a que se evidencia valores comprendidos entre el 19,88% hasta 48,09%. Cabe anotar que el mayor porcentaje de aumento no significa que la mezcla haya sido la que mejor se ha comportado en cuanto a la resistencia.

Según los resultados obtenidos con respecto a la resistencia a la compresión de especímenes de concreto, se recomienda elaborar mezclas con distribuciones en peso como la mezcla N° 1 (Agregado grueso=70%, Agregado fino=30%) y N° 2 (Agregado grueso=65%, Agregado fino=35%), debido a su comportamiento. Por otra parte, no es aconsejable realizar mezclas de concreto con las distribuciones en peso de las mezclas N° 4 (Agregado

grueso=55%, Agregado fino=45%) y N° 5 (Agregado grueso= 50%, Agregado fino=50%), porque estas no tienen una buena relación con respecto a sus agregados tanto gruesos como finos.

Se elaboró un diseño de mezcla que involucra la adición de la limalla fina en mezclas de concreto. Este procedimiento se realizó con el fin de proporcionar elementos que justifiquen el proceso de elaboración de muestras de concreto adicionadas con porcentajes de limalla de hierro gris como proporción del agregado fino.

De acuerdo a los resultados obtenidos con respecto a la resistencia a la compresión, se evidencia que las muestras trabajadas presentan gran variabilidad. Se encuentra que la resistencia a la compresión de los especímenes estudiados muestran valores que van desde 8,89 MPa a una edad de 7 días hasta 34,35 MPa a una edad de 28 días. También se nota que no siempre las mezclas se comportan de la misma forma en los diferentes días estudiados. Además, se evidencia que el comportamiento de las mezclas adicionadas con limalla de hierro gris respecto a la mezcla convencional, en general arrojan valores significativamente mayores en comparación a ésta.

En general, se evidencia que la resistencia a la compresión de muestras de concreto en las diferentes edades, cumplen con el valor mínimo exigido por las especificaciones correspondientes de la resistencia a la compresión.

Con la incorporación de la limalla de hierro gris en mezclas de concreto, se logra reducir los impactos ambientales causados por la explotación y extracción de los materiales que se encuentran en canteras y ríos destinados para la industria de la construcción, debido a que la limalla fina es un desecho de un proceso industrial, y en el momento no se está aprovechando sus propiedades con respecto a la resistencia a la compresión en mezclas de concreto, como consecuencia del desconocimiento y costumbre que se maneja en el campo de la construcción.

Con respecto a la determinación del módulo de elasticidad estático de mezclas de concreto, se utilizaron las fórmulas de la regresión lineal que se puede encontrar en los libros de métodos numéricos aplicados a la ingeniería, para obtener unos resultados más confiables del módulo de elasticidad.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Figura 33 con respecto al módulo de elasticidad estático, se evidencia que las muestras trabajadas presentan gran variabilidad, en las cuales no existen comportamientos similares. Se encuentra que el módulo de elasticidad estático de los especímenes estudiados presentan valores que van desde 9080,92 MPa hasta 14111,84 MPa.

Según los resultados obtenidos del módulo de elasticidad estático de muestras de concreto convencionales comparadas con respecto al valor que recomienda la norma, se evidencia que los resultados presentan gran variabilidad, lo cual

conlleva a que se presenten inquietudes referentes a la elección del valor a utilizar en el diseño de obras civiles.

Realizando una comparación general, se observa que la mezcla que arrojó el mayor módulo de elasticidad estático fue la N° 2 (Agregado grueso= 65%, Agregado fino=35%) correspondiente al porcentaje de limalla de hierro gris del 3,5%.

12. RECOMENDACIONES

Para lograr los resultados que se esperan, es necesario hacer cumplir estrictamente los parámetros y rangos que establecen las normas INVIAS, NTC y ASTM, para ofrecer confiabilidad respecto al uso de los materiales, de tal manera que se encuentren en las mejores condiciones, con lo que se garantiza que los resultados obtenidos son de la más alta calidad.

Se recomienda utilizar las mezclas de concreto adicionadas con limalla de hierro gris en elementos estructurales como: vigas y columnas.

Según un estudio realizado por un grupo de ingenieros de la India, se recomienda utilizar un aditivo denominado Conplast X421 IC, el cual se debe agregar a la hora del mezclado del concreto, y tiene como finalidad retardar el proceso de corrosión en algunos metales, como es el caso de la limalla de hierro gris, lo cual proporciona una mayor durabilidad y mantiene las propiedades de las mezclas de concreto.

Se recomienda elaborar todas las mezclas de concreto en una misma fundida, las cuales serán probadas en diferentes edades; esto con el fin de garantizar que la mezcla que se probó a las diferentes edades fue la misma, pues esto da una mejor confiabilidad en los resultados que se obtienen.

Se recomienda elaborar la mezcla de concreto haciendo uso de la mezcladora para concreto tipo trompo, la cual transforma la muestra de agregados en una mezcla homogénea y uniforme; por el contrario si se realiza manualmente, se corre el riesgo que la muestra de concreto quede segregada, lo cual reduce el grado de confiabilidad de los resultados que se obtengan.

Para conocer mejor el comportamiento de la limalla de hierro gris en el estado fresco de mezclas de concreto, se recomienda estudiar la forma como ésta actúa en el proceso de retracción por fraguado, de tal manera que se encuentre si se debe tener en cuenta la reacción química que produce la limalla con el cemento.

Se recomienda realizar pruebas y/o ensayos para corroborar los resultados de las muestras de concreto con respecto al módulo de elasticidad estático.

Para tener un mayor grado de confiabilidad en el uso de la limalla de hierro gris en mezclas de concreto, es necesario realizarle una serie de pruebas y/o ensayos en cuanto a la corrosión, durabilidad y carbonatación; con esto se logra conocer mejor las propiedades y el comportamiento de la limalla fina en dichas mezclas.

Cuando se estén realizando los ensayos correspondientes al agregado fino, se deben desarrollar tal y como se van a utilizar en las mezclas de concreto, es decir, arena + limalla fina. De tal manera que se conozca previamente el

comportamiento de esta nueva mezcla, que es la que realmente se debe comparar con respecto a las Normas

En la Tabla 35 y la Tabla 36 se analizan los costos de producción de mezclas de concreto tanto convencionales como adicionadas con limalla de hierro gris.

Es importante aclarar, que las cantidades de material de muestras de concreto adicionadas con limalla fina corresponden a la mezcla N° 2 con un porcentaje de limalla fina correspondiente al 3,5%. También, que los valores que se presentan a continuación están vigentes por el mes de Septiembre de 2010.

Tabla 35. Precio de 1 m³ de Concreto Adicionado con Limalla Fina de 31 MPa

Material	Cantidad (m ³)	Precio Unitario (\$)	Precio/m ³
Agregado Grueso	0.449	\$ 55,000	\$ 24,707
Agregado Fino	0.240	\$ 46,000	\$ 11,020
Limalla Fina	61.96 Kg	\$ 300	\$ 18,588
Agua	0.174	\$ 17,000	\$ 2,958
Mano de Obra	2 Hombres	\$7,500	\$15,000
Cemento	6.71 Bultos	\$ 19,500	\$ 130,853
			\$ 203,126

Fuente: propia

Tabla 36. Precio de 1 m³ de Concreto Convencional de 31 MPa

Material	Cantidad (m ³)	Precio Unitario (\$)	Precio/m ³
Agregado Grueso	0.411	\$ 55,000	\$ 22,605
Agregado Fino	0.231	\$ 46,000	\$ 10,626
Agua	0.195	\$ 17,000	\$ 3,315
Mano de Obra	2 Hombres	\$7,500	\$15,000
Cemento	9.05 Bultos	\$ 19,500	\$ 176,475
			\$ 228,021

Fuente: propia

13. BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM dictionary of engineering science & technology: sponsored by ASTM committee E02 on terminology. 10 ed. Pennsylvania: ASTM, 2005. 707 p.

BARRERA MARTÍNEZ, Ever Johan, y NAVAS VILLAMIZAR, Néstor Eduardo. Optimización de un concreto de 3000 PSI mejorando la resistencia a la comprensión adicionando viruta de acero. Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga, 2007. 130 h.

CAPACHO JAIMES, Hernán Darío. Análisis del comportamiento mecánico y económico de vigas de concreto con adiciones de PET reciclado. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2006. 97h.

Características del Concreto. En: Resistencia. [en línea]. [consultado 25 agosto 2010]. Disponible en < <http://www.construaprende.com/t/02/T2Pag8.php>>

DELGADO CAMPOS, Harol Fernando., y SANCHEZ QUIÑONEZ, Hector Mauricio. Análisis del comportamiento mecánico de un concreto aligerado con la corteza que contiene las semillas del pino cupressus sempervirens. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2005. 111h.

DELGADO RÚGELES, Rafael Andrés, y DELGADO RÚGELES, Edgar Darío. Mejoramiento de la resistencia a la flexión del concreto con adición de viruta de acero con porcentajes 6, 8, 10, 12% y 14% respecto al agregado fino de la mezcla. Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga, 2008.

DÍAZ POSADA, Maria Claudia. Elaboración del contenido virtual de la asignatura materiales de construcción apoyado en el software learningspace. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga. 2005.

FERREIRA DÍAZ, Juan Sebastián. Aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2009. 117h.

GARCÍA BADILLO, Alfonso. Mejoramiento del Concreto con Adición de Viruta de Acero a Porcentajes de 12 y 14% Respecto al Agregado Fino de la Mezcla. Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga, 2008.

GARCÍA CORDOVA, Heyner Andrés, y SARMIENTO GUTIÉRREZ, John Edinson. Mejoramiento de un Concreto de 3000 PSI con Adición de Viruta de Acero con Porcentajes de 6%, 8% y 10% Respecto al Agregado Fino de la Mezcla. Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga, 2008.

GONZÁLEZ CUEVAS, Oscar M., y ROBLES FERNÁNDEZ, Francisco. Aspectos fundamentales de concreto reforzado, 2da edición, Limusa, México, pp 670, 1985.

<http://www.arqhys.com/construccion/concreto-fraguado.html>, visitada el 18 de Agosto de 2010.

http://www.cemexcolombia.com/np/np_co_cp.html, visitado el 12 de Septiembre de 2.010

<http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>, visitada el 25 de Agosto de 2010.

<http://www.sika.com.co/>, visitada el 17 de Agosto de 2010.

Instituto del Concreto- Asocreto. Tecnología y Propiedades. Asociación Colombiana de Productores de concreto. Bogotá. 215p. 2000.

Invias, Especificaciones Artículo 300-07, Disposiciones generales para la ejecución de afirmados, subbases granulares y bases granulares y estabilizadas.

Invias, Norma INV E-133-07, Equivalente de arena de suelos y agregados finos.

Invias, Norma INV E-135-07, Determinación de la humedad de suelos usando el horno microondas.

Invias, Norma INV E-211-07, Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados.

Invias, Norma INV E-212-07, Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos.

Invias, Norma INV E-213-07, Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

Invias, Norma INV E-218-07, Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles.

Invias, Norma INV E-222-07, Gravedad específica y absorción de agregados finos.

Invias, Norma INV E-223-07, Gravedad específica y absorción de agregados gruesos.

Invias, Norma INV E-227-07, Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.

Invias, Norma INV E-230-07, Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras.

Invias, Norma INV E-307-07, Densidad del cemento hidráulico.

Invias, Norma INV E-402-07, Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de concreto para ensayos de compresión y flexión.

Invias, Norma INV E-404-07, Asentamiento del concreto (Slump).

Invias, Norma INV E-405-07, Masa unitaria (densidad), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto.

Invias, Norma INV E-410-07, Resistencia a la compresión de cilindros de concreto.

JAGANNA RAO, K., SESHAGIRI RAO, M. V., y SWAROOPA RANI, M. Study on the Strength Characteristics of SCC with GGBS and RHA as Mineral Admixtures. Bases de datos de artículos de investigación. [base de datos en línea]. The IUP Journal of Structural Engineering, Vol. III, No. 3, 2010. [consultado 19 ago. 2010]. Disponible en <<http://search.ebscohost.com/>>

JAYABALAN, P., MANOHARAN, R., y PALANISAMY, K. Experimental Evaluation of Corrosion Rate of Rebars in M25 Concrete with Water Proofing Admixture. Bases de datos de artículos de investigación. [base de datos en línea]. International Journal of Applied Engineering Research. Vol. IV, No. 6, 2009. [consultado 19 ago. 2010]. Disponible en <http://search.ebscohost.com/>

MUÑOZ URIBE, Jaime., y SARMIENTO COLMENARES, León Rodolfo. Evaluación técnico-económica del uso del concreto reciclado en la construcción de obras civiles. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2005. 98h.

Norma Técnica Colombiana, Norma NTC-174, Especificaciones de los agregados para concreto.

Norma Técnica Colombiana, Norma NTC-4025, Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión.

PÉREZ CARRASCAL, Andres Felipe. Análisis del comportamiento mecánico del concreto hidráulico para pavimentos utilizando las fibras de las hojas caulinares del bambú o guadua. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2004. 84h.

SÁENZ TORRES, Vladimir., y VILLAMIZAR SIERRA, Paola Andrea. Análisis del comportamiento de cenizas volantes de las centrales termoeléctricas de Tasajero y Paipa Iv como material cementante en la producción de concreto.

Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, 2005. 139h.

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego, Tecnología del Concreto y del Mortero, 5ta edición, Bhandar Editores, Colombia, pp 349, 2001.

SÚAREZ GONZÁLEZ, Omar Alfonso, y VARGAS RINCÓN, Angélica María. Análisis, Observación y comportamiento estadístico en función del tiempo de una mezcla de concreto de 3000 PSI con adición de viruta de acero en porcentajes de 9%, 10%, y 11% respecto al agregado fino. Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga, 2008.

THILGAVATHI, S., DHINAKARAN, G., y VENKATARAMANA, J. Durability of Fly Ash Concrete to Chloride Ingress. Bases de datos de artículos de investigación. [base de datos en línea]. The IUP Journal of Structural Engineering, Vol. III, No. 3, 2010. [consultado 19 ago. 2010]. Disponible en <<http://search.ebscohost.com/>>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Sede Manizales. Dirección Nacional de Servicios Académicos Virtuales. Concreto estructural. En: Composición del Concreto Simple. [en línea]. [consultado 25 agosto 2010]. Disponible en <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%203/COMPOSICION%20DEL%20CONCRETO%20SIMPLE.htm>