

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO AL
ADICIONAR LIMALLA FINA EN UN 3%, 4% y 5% RESPECTO AL PESO DE LA
MEZCLA**

**JUAN SEBASTIÁN REYES BAUTISTA
YAMID ALONSO RODRÍGUEZ PINEDA**

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

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO AL
ADICIONAR LIMALLA FINA EN UN 3%, 4% y 5% RESPECTO AL PESO DE LA
MEZCLA**

**JUAN SEBASTIÁN REYES BAUTISTA
YAMID ALONSO RODRÍGUEZ PINEDA**

Trabajo de grado como requisito para optar al título de ingenieros civiles

**Director:
Claudia Patricia Retamoso Llamas
MIC. Ingeniera Civil**

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

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Septiembre de 2010

*A **Dios**, ser supremo y celestial que día a día me demuestra su inmenso amor, quien por medio de su omnipotencia ha consolidado todo mi ser y ha hecho de mí un hombre capaz de superar los obstáculos presentes en el transcurso de la vida. Este trabajo está consagrado en su nombre y el de su único hijo Jesucristo.*

*A la entrega incesante y esfuerzo de mi madre **Maruja Pineda**, mujer guerrera, quien con sus consejos y ejemplo de vida, ha fecundado en mi corazón la semilla del amor, la perseverancia y el deseo de superación... A ti Madre dedico todo cuanto soy porque has demostrado que eres capaz de entregar tu vida a cambio de la de tus hijos.*

*A mi padre **Arsenio Rodríguez**, hombre solidario, luchador y perseverante, quien siempre ha puesto toda su confianza y esperanza en mí, y por medio de su apoyo ha forjado en mí un hombre que no se deja vencer por los malos momentos.*

*Al apoyo y colaboración tanto física, como moral y espiritual por parte de mis hermanas **Sandra** y **Yudy**, y mi hermano **Cristian** al que especialmente llevo en mi corazón pues Dios ha hecho de él un regalo para la familia al concederle un corazón limpio y puro.*

*Al inmenso amor, la confianza y el apoyo constante de mi novia **Laura Prada** quien ha hecho de los últimos años los mejores de toda mi vida.*

*A mi compañero y amigo **Juan S. Reyes**, ejemplo de sacrificio académico y de quien admiro la capacidad de abordar los sueños y hacerlos realidad sin importar las circunstancias que puedan impedirlos.*

Creo que sin ese granito de arena que todos ustedes aportaron no hubiese sido posible la culminación de esta etapa de mi vida; alcanzar esta meta es un sueño hecho realidad... pero estoy seguro que acá no termina todo, exhorto a todos ustedes a seguir el camino de la vida de la mano de Dios pues es la única forma de alcanzar el elixir de la felicidad, “la vida eterna”... “Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa” (Gandhi)

Yamid Alonso Rodríguez Pineda

*Al arduo trabajo y constancia que hicieron posible alcanzar mis metas, que no hubiesen sido posible lograrlas sin la constante fuerza, sabiduría, sacrificios y empeño de mi madre **Amparo Bautista Cáceres**, de mi padre **Jorge Manuel Reyes Pérez**, de mis hermanos **Manuel Andrés Reyes Bautista** y **Carlos Daniel Reyes Bautista**, de mi primo **Mario Fernando Pérez Flórez**, que más que un primo es otro hermano, de mis amigos **Eliecer Beltrán Castillo**, **Víctor Hugo Ortiz Ariza**, **Daniel Abraham Fontalvo Varón**, **Cristian Pinzón Restrepo** , de mis parientes y compañeros.*

*Doy gracias a Dios por haber encontrado en mi camino de formación profesional a mi colega y amigo **Yamid Alonso Rodríguez Pineda**, que con sus ideas, conocimientos, aportes y amistad, hemos logrado nuestra meta que espero no sea la última a alcanzar.*

*Creo que todos los que creemos en Él siempre recibimos lo mejor, es por eso que doy un millón de gracias a **Dios** por darme una vida saludable y amena, que hizo posible el no caer y desvanecer en el camino de este sueño, ese sueño que aunque inmenso es otro escalón a una vida llena de frutos y bienestar.*

“A la gente buena, cosas buenas le pasan”

Juan Sebastián Reyes Bautista

AGRADECIMIENTOS

A nuestra Alma Mater, Universidad Pontificia Bolivariana.

A nuestra directora de trabajo de grado, mentora, amiga y de quien recibimos apoyo constante, la MIC. Claudia Patricia Retamoso Llamas, que con su carisma, simpatía, inteligencia, empeño y experiencia facilitó la realización de este trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Civiles.

De igual forma agradecemos a la PhD María Fernanda Serrano Guzmán, Directora de Investigación, que con sus consejos, aportes técnicos e investigativos, ayudo de manera directa a la elaboración teórica y metodológica de este proyecto.

Al MIC Samuel Montero Vargas, decano de la facultad de ingenierías, quien con sus aportes y recomendaciones técnicas hizo del análisis de los resultados de este trabajo una tarea enriquecedora y fructífera.

A la ingeniera Luz Marina Torrado Gómez, Directora del Laboratorio de Ingeniería Civil, quien facilitó los espacios, los equipos y las herramientas para agilizar nuestros procesos manuales y mecánicos concernientes al Proyecto de Grado.

A Helí Rueda Aparicio y José Vicente Páez Mendoza, auxiliares de laboratorio, que con sus años de experiencia, facilitaron la realización de todos los ensayos de laboratorio concernientes al proyecto.

La colaboración y dedicación aportada por los compañeros Julián Felipe Porras García, Wilson Álvarez Gómez y Henry Andrey Mercado Otavo, estudiantes de cuarto (4) semestre de ingeniería civil de la UPB, a quienes agradecemos por permitirnos lograr la culminación a tiempo de todas las pruebas en el laboratorio.

A la Ladrillera Bautista Cáceres, empresa productora de ladrillos para la construcción, por concedernos el uso de sus instalaciones con el fin de lograr el objetivo de realizar la elaboración de los cilindros testigos dispuestos a fallar a la edad de 28 días.

A la empresa INDUSTRIAS LAVCO Ltda. que muy gentilmente donó la limalla fina a utilizar en el Trabajo de Grado.

Por último, a todos los que indirectamente colaboraron con su apoyo. A todos, gracias totales.

Los Autores

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	25
2. JUSTIFICACIÓN	26
3. OBJETIVOS	28
3.1 OBJETIVO GENERAL	28
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
4. MARCO TEÓRICO	29
4.1 CONCRETO	29
4.1.1 Clasificación según sus propiedades y características	30
4.1.2 Clasificación según el sistema de colocación y compactación	30
4.1.3 Concretos especiales	31
4.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO	31
4.2.1 Trabajabilidad o manejabilidad	32
4.2.2 Ensayo de asentamiento	32
4.2.3 Segregación	32
4.2.4 Exudación o sangrado	33
4.2.5 Masa unitaria	33
4.2.6 Contenido de aire	33
4.2.7 Contenido de agua y de cemento	33
4.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO	34
4.3.1 Relación agua-cemento	34
4.3.2 Curado del concreto	34
4.3.3 Edad del concreto	35
4.3.4 Resistencia a la tracción	35
4.3.5 Resistencia a la flexión	35
4.3.6 Resistencia a cortante	36

4.4	ADITIVOS	36
4.4.1	Plastificantes	37
4.4.2	Retardantes	37
4.4.3	Acelerantes	37
4.4.4	Plastificantes retardantes y acelerantes	37
4.4.5	Superplastificantes	37
4.4.6	Inclusores de aire	37
4.5	MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO	37
4.5.1	Cemento	37
4.5.2	Agregados pétreos	38
4.5.2.1	Agregado grueso	38
4.5.2.2	Agregado fino	39
4.5.3	Agua ³⁹	
4.5.4	Limalla	40
4.5.4.1	Características físicas	41
4.5.4.2	Características químicas	41
4.6	PRUEBAS PRELIMINARES (PREMUESTRA)	42
4.7	PRUEBAS FÍSICO MECÁNICAS DE LOS MATERIALES	42
4.7.1	Procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo	42
4.7.2	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos	43
4.7.3	Determinación del contenido de humedad total en los agregados	45
4.7.4	Densidad del cemento hidráulico	45
4.7.5	Densidad de la limalla	46
4.7.6	Gravedad específica y absorción	47
4.7.6.1	Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos	48
4.7.6.2	Gravedad Específica y Absorción de Agregados Gruesos	49
4.7.7	Masa unitaria y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos	49
4.7.8	Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en agregados	50
4.7.9	Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos	51

4.7.10	Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles	52
4.7.11	Equivalente de arena de suelos y agregados finos	53
4.7.12	Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	55
4.7.13	Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados	55
4.7.14	Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio	56
4.7.15	Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto	59
4.7.16	Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión	59
4.8	ANTECEDENTES DE ALGUNOS TIPOS DE CONCRETO ADICIONADOS CON MATERIALES NO CONVENCIONALES	61
4.8.1	Óptimo Contenido de Escoria de Cobre como Agregado Fino en el Hormigón de Alta Resistencia	62
4.8.2	Nuevos Concretos para el Aprovechamiento de un Sub-Producto Industrial	62
4.8.3	Efectos y usos de las fibras de acero en mezclas de concreto	63
4.8.4	Investigaciones concernientes al tema, Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga	64
5.	METODOLOGÍA	65
5.1	VISITA Y SOLICITUD DE SUMINISTRO DE LIMALLA EN LAS EMPRESAS DEL SECTOR METALMECÁNICO (LOCALES)	65
5.1.1	Recolección, selección y acopio de limalla	67
5.2	PREMUESTRA	67
5.2.1	Estimación de las cantidades de material para la elaboración de la premuestra	67
5.2.2	Elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros testigo, fase preliminar	70
5.3	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	70
5.4	DISEÑO DE MEZCLA	70
5.4.1	Datos previos	71
5.4.2	Elección del Asentamiento	73
5.4.3	Estimación tamaño máximo nominal	74
5.4.4	Estimación del contenido de aire	75

5.4.5	Estimación de la cantidad de agua de mezclado	76
5.4.6	Selección relación agua/cemento (a/c)	78
5.4.7	Estimación del contenido de cemento	79
5.4.8	Verificación granulométrica	79
5.4.9	Estimación de las proporciones de agregados y limalla	81
5.4.9.1	Volumen de agregados	81
5.4.10	Corrección por humedad y absorción de agregados	82
5.5	ELABORACIÓN DE MUESTRAS	85
5.6	DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO	86
5.6.1	Determinación de la masa unitaria de los cilindros de concreto	86
5.6.2	Ensayo de compresión y determinación del módulo de elasticidad	87
6.	RESULTADOS	88
6.1	FASE PRELIMINAR “PREMUESTRA”	88
6.2	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	88
6.2.1	Análisis granulométrico de los agregados	90
6.3	DISEÑO DE MEZCLA	92
6.4	RESULTADOS DE PRUEBAS DEL CONCRETO	92
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	94
7.1	FASE PRELIMINAR (PREMUESTRA)	94
7.2	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	95
7.2.1	Análisis granulométrico de los agregados	96
7.2.2	Densidad del cemento hidráulico	97
7.2.3	Absorción de los agregados	98
7.2.4	Partículas deleznales de los agregados	98
7.2.5	Contenido aproximado de materia orgánica.	98
7.2.6	Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles	99
7.2.7	Equivalente de arena de suelos y agregados finos	99
7.2.8	Caras fracturadas	99
7.2.9	Índice de aplanamiento y alargamiento	100
7.3	DISEÑO DE MEZCLA	100
7.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS DEL CONCRETO	100

7.4.1	Resistencia a la compresión del concreto, 7 días	102
7.4.2	Resistencia a la compresión del concreto, 14 días	103
7.4.3	Resistencia a la compresión del concreto, 28 días	104
7.5	PESO UNITARIO DEL CONCRETO	105
7.6	ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS MUESTRAS.	106
7.7	FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO	108
8.	CONCLUSIONES	111
9.	RECOMENDACIONES	114
	BIBLIOGRAFÍA	116

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación del concreto según su resistencia a compresión	30
Tabla 2. Clasificación del concreto según su peso unitario	31
Tabla 3. Clasificación según el tamaño	38
Tabla 4. Componentes principales de la limalla	42
Tabla 5. Serie de Tamices, Granulometría Agregados Gruesos y Finos	44
Tabla 6. Masas mínimas de las muestras	51
Tabla 7. Placa orgánica	52
Tabla 8. Gradación tipo y peso de cada fracción	53
Tabla 9. Peso muestra	55
Tabla 10. Masa mínima de la muestra	56
Tabla 11. Número de capas requeridas para las muestras	58
Tabla 12. Diámetro de varilla y número de golpes para utilizar en el moldeo de muestras de ensayo	59
Tabla 13. Proporción de agregados para la fabricación de cilindros testigo – Premuestra (Cálculo tipo – muestras selectivas)	68
Tabla 14. Ensayos de laboratorio para la caracterización de agregados utilizados en la fabricación de mezclas de concreto	69
Tabla 15. Datos previos de obra y de los materiales	73
Tabla 16. Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción	74
Tabla 17. Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregado	75
Tabla 18. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado	78
Tabla 19. Relación agua-cemento	79
Tabla 20. Requisitos de gradación para agregado grueso	80
Tabla 21. Requisitos de gradación para agregado fino	81
Tabla 22. Estimación de las proporciones de agregados para la producción de 1m ³ de concreto – Cálculos tipo	82
Tabla 23. Cálculo tipo, ajuste de agua Diseño de Mezcla	83

Tabla 24. Cálculo tipo, masa de materiales necesaria para la producción de 1m^3 de concreto	84
Tabla 25. Cantidades para la producción de un cilindro de concreto, $\phi=15\text{cm}$, $h=30\text{cm}$. Cálculo tipo	85
Tabla 26. Resultados de los ensayos de laboratorio para caracterización de materiales	89
Tabla 27. Resumen granulométrico para agregado fino	90
Tabla 28. Resumen granulométrico para agregado grueso	91
Tabla 29. Estimación del TM, TMN y Modulo de Finura.	92
Tabla 30. Resumen consolidado de pruebas del concreto	92
Tabla 31. Requisitos de los ensayos de caracterización de materiales	95
Tabla 32. Normas para el control del concreto	103
Tabla 33 Comparación del módulo de elasticidad obtenido con los esperados por medio de ecuaciones teóricas propuestas.	106
Tabla 34. Precios unitarios para mezclas de concreto producido en obra	109
Tabla 35. Análisis de precio unitario para 1 m^3 de concreto con limalla producido en obra	109
Tabla 36. Análisis de precio unitario para 1 m^3 de concreto convencional producido en obra	110

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Asentamiento del concreto	32
Figura 2. Curado del concreto	35
Figura 3. Proceso productivo	40
Figura 4. Proceso de mecanizado	41
Figura 5. Cuarteo de material	43
Figura 6. Densidad del cemento hidráulico	46
Figura 7. Estimación densidad de la limalla	47
Figura 8. Gravedad específica y absorción de los agregados	48
Figura 9. Masa unitaria de los agregados	50
Figura 10. Contenido de materia orgánica	52
Figura 11. Determinación de la resistencia al desgaste	53
Figura 12. Estimación del equivalente de arena	54
Figura 13. Elaboración y curado de muestras de concreto para ensayos de laboratorio	58
Figura 14. Compresómetro ajustado para medida del modulo de elasticidad	60
Figura 15. Metodología general del proyecto	66
Figura 16. Secuencia de pasos para la dosificación de mezclas	72
Figura 17. Requerimiento aproximado de agua de mezclado, para concreto con aire incluido, en función del tamaño máximo, forma y textura del agregado	76
Figura 18. Requerimiento aproximado de agua de mezclado, para concreto sin aire incluido, en función del tamaño máximo, forma y textura del agregado	77
Figura 19. Proceso de elaboración y curado de cilindros de concreto	85
Figura 20. Metodología para la elaboración de especímenes de concreto	86
Figura 21. Determinación de las propiedades del concreto endurecido	87
Figura 22. Comparación de granulometrías para agregado fino	90
Figura 23. Comparación de granulometrías para agregado grueso.	91
Figura 24. Comparación de la resistencia a la compresión a los 28 días (premuestra)	94

Figura 25. Requisito granulométrico para agregado fino	96
Figura 26. Requisito granulométrico para agregado grueso	97
Figura 27. Porcentaje de variación de f'_c respecto a la mezcla convencional.	101
Figura 28. Tendencia de la resistencia a la compresión, 7 días	102
Figura 29. Tendencia de la resistencia a la compresión, 14 días	104
Figura 30. Tendencia de la resistencia a la compresión, 28 días	105
Figura 31 Variación del módulo de elasticidad obtenido respecto a los valores esperados.	107

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN “PREMUESTRA”	121
ANEXO B. NORMATIVIDAD TÉCNICA Y ESPECIFICACIONES	124
ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLA PARA LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO ADICIONADO CON LIMALLA	125
ANEXO D. RESULTADOS DE PRUEBAS DEL CONCRETO	132
ANEXO E. CONSOLIDADO DE ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	139
ANEXO F. VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD RESPECTO A FORMULAS ESTABLECIDAS.	145

GLOSARIO

ACELERANTE (ACCELERANT): sustancia que se añade al cemento o a una mezcla de mortero, que modifica sus propiedades así como la rapidez del fraguado.

ACI (ACI): American Concrete Institute es una sociedad organizada en 1904 y es una de las principales autoridades del mundo en tecnología del concreto; publica información fiable sobre cemento y sus aplicaciones.

ADHESIÓN (ADHESION): atracción molecular entre superficies de cuerpos distintos puestos en contacto.

ADITIVO (ADMIXTURE): material que se usa en una cantidad muy pequeña para alterar una propiedad específica de otro material o, por el contrario para mejorar sus características.

AGREGADO FINO (FINE AGGREGATE): material duro e inerte que se emplea para preparar hormigón o mortero que pasa por un tamiz de 4,76 mm (No 4) y queda retenido en el tamiz 75µm (No. 200). También llamado arena.

AGREGADO GRUESO (COARSE AGGREGATE): árido que queda retenido por un tamiz de 4,76 mm (No 4). También llamado grava.

ALÚMINA (ALUMINA): óxido de aluminio, constituyente importante de la arcilla que se utiliza en la fabricación de ladrillos, piezas cerámicas y refractarios.

ARCILLA (CLAY): tierra fina constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados.

ASENTAMIENTO (SLUMP): procedimiento o método que se emplea para determinar la consistencia y plasticidad del hormigón fresco midiendo su descenso.

ASTM (ASTM): American Society for Testing and Materials fundada en 1898, es uno de los mayores contribuyentes técnicos del ISO, y mantiene un liderazgo en la definición de los materiales y métodos de prueba en casi todas las industrias.

BOMBEO (PUMPING): eyección de material líquido o sólido o ambos, transportado en obra mediante una manguera o tubería.

CEMENTO PORTLAND (PORTLAND CEMENT): cemento hidráulico producido al pulverizar Clinker Portland, consiste básicamente de silicatos de calcio hidráulicos,

y que usualmente contiene una o más formas de sulfato de calcio como adición de molienda.

CILINDRO TESTIGO (*TEST CYLINDER*): cilindro de hormigón de 15cm (6") de diámetro y 30 cm (12") de altura, curado bajo unas condiciones controladas.

COHESIÓN (*COHESION*): adhesión de las cosas entre sí o entre las materias de que están formadas.

COMPRESIÓN (*COMPRESSION*): presión que se ejerce con el fin de reducir el volumen del cilindro testigo.

CONCRETO U HORMIGÓN (*CONCRETE*): mezcla de arena, cemento, triturado y en algunos casos un aditivo, para cambiar su propiedad.

CORTANTE (*SHEARING*): fuerza interna que desarrolla un cuerpo como respuesta a una fuerza cortante. También llamado fuerza de cizallamiento.

CURADO (*CURING*): mantener el hormigón o el mortero a una temperatura y humedad adecuadas para asegurar su hidratación y endurecimiento adecuados.

DANA TRANSEJES COLOMBIA (*DANA*): empresa Colombiana fundada en 1972, encargada de suministrar la tecnología de eje diferencial y eje cardán (mecanismo que permite transmitir un movimiento de rotación a dos ejes de direcciones distintas).

DELEZNABLE (*FRIABLE*): material que se rompe o deshace fácilmente.

DÚCTIL (*DUCTILE*): material que puede deformarse, moldearse o extenderse con facilidad.

DURABILIDAD (*DURABILITY*): capacidad de la masa endurecida de resistir los efectos de los elementos tales como la acción del viento, escarcha, nieve, hielo, la reacción química de los suelos o los efectos de la sal y la abrasión.

ESCORIA (*SLAG*): material no metálico formado por silicatos y otras bases producto de la fusión de hierro en un alto horno.

ESPÉCIMEN (*SPECIMEN*): muestra normalmente con las características de su especie muy bien definidos

EXUDACIÓN (*BLEEDING*): aparición de una cantidad de agua superior a la normal en la superficie de un hormigón fresco debido a la sedimentación de sus componentes sólidos o el drenaje del agua de amasado. También llamado exceso de agua.

FLEXIÓN (FLEXURE): doblamiento que sufre un elemento estructural al ser sometido a una fuerza transversal externa.

FLUIDEZ (FLUIDITY): contenido de humedad que corresponde al límite entre el estado líquido y plástico de la consistencia.

HOLCIM (HOLCIM): empresa suiza fundada en 1912, actualmente es la cementera más grande del mundo y es líder en el suministro de cementos y áridos, así como concreto premezclado y combustibles alternativos.

ICONTEC (ICONTEC): Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación es un organismo que trabaja para fomentar la normalización, certificación, metrología y gestión de la calidad en Colombia.

INVIAS (INVIAS): Instituto Nacional de Vías es el encargado de la contratación pública y la normatividad en el sector de las vías en general.

LAVCO LTDA. (LAVCO): constituida legalmente en enero de 1991 como una empresa manufacturera y de servicios, del sector metalmecánico cuyo objeto social incluía además de la fabricación de camisas centrifugadas para motores, el servicio de rectificación de motores para el segmento automotriz.

LIMALLA (FILINGS): son las virutas o limaduras finas de los residuos del metal como resultado de las operaciones metalúrgicas.

LIMO (SILT): material compuesto de gránulos minerales no plásticos, que no oponen resistencia al secado, de diámetros comprendidos entre 0,002 y 0,05 mm.

MALEABILIDAD (MALLEABILITY): dícese de los materiales que pueden deformarse plásticamente sin rotura por batido o presión en forma de láminas y planchas.

MEZCLADORA (MIXER): máquina diseñada para mezclar grandes cantidades de concreto y es impulsada por un motor de gasolina o eléctrico. También conocida como “trompo”.

MÓDULO DE ELASTICIDAD (MODULUS OF ELASTICITY): relación entre la fatiga unitaria y la correspondiente deformación unitaria en un material sometido a un esfuerzo que está por debajo del límite de elasticidad del material. También llamado módulo de Young.

MÓDULO DE ROTURA (MODULUS OF RUPTURE): resistencia máxima determinada en un ensayo de flexión o torsión.

NTC (NTC): Normas Técnicas Colombianas.

PAVIMENTO (PAVEMENT): es una estructura vial formada por una o varias capas de materiales seleccionados que se construyen sobre la subrasante, y es capaz de resistir las cargas impuestas por el tránsito, la acción del medio ambiente, transmitir al suelo de apoyo esfuerzos y deformaciones tolerables y además permitir la circulación de los vehículos con rapidez, comodidad, seguridad y economía.

PLASTIFICANTE (PLASTICIZER): aditivo que incrementa la plasticidad de una mezcla de hormigón, mortero o pasta de cemento.

RESISTENCIA (STRENGTH): es la capacidad del concreto de resistir cargas a compresión, flexión o al cortante.

RETARDANTE (RETARDANT): producto que adicionado a pastas, morteros u hormigones en el momento de amasado, impiden o retardan el fraguado de los mismos y actúan sobre su endurecimiento.

SEGREGACIÓN (SEGREGATION): concentración disgregada de los áridos o componentes en el hormigón fresco.

TAMAÑO MÁXIMO (MAXIMUM SIZE): corresponde a la abertura del menor tamiz de la serie de tamices que permite el paso del 100% del material

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL (NOMINAL MAXIMUM SIZE): es la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más.

TERRONES (LUMPS): masas pequeñas y sueltas de tierra compacta.

TRACCIÓN (TENSION): acción de las fuerzas que mantienen un cuerpo estirado al tirar de sus extremos, de la que resulta un elongamiento del mismo. También llamado tensión.

VIRUTA (STEEL WOOL): fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral que es extraído al realizar trabajos de cepillado, desbastado o perforación sobre metales.

VÍTREAS (VITREOUS): hecho de vidrio o que tiene sus propiedades.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO AL ADICIONAR LIMALLA FINA EN UN 3%, 4% y 5% RESPECTO AL PESO DE LA MEZCLA

AUTOR(ES): JUAN SEBASTIÁN REYES BAUTISTA
YAMID ALONSO RODRÍGUEZ PINEDA

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Claudia Patricia Retamoso Llamas

RESUMEN

En este trabajo de grado, se adiciona limalla como agregado no convencional. Éste material es un residuo proveniente de procesos industrializados tendientes a la manufactura de camisas de acero para motores, el cual reemplaza parte del agregado fino y en combinación con los demás componentes producen un concreto que cumple las especificaciones requeridas. El objetivo principal de este trabajo es determinar el porcentaje de adición óptimo de limalla, además de las cantidades relativas de cada material, que garanticen una producción de mezclas de concreto, de modo que aumenten la resistencia a la compresión respecto a las mezclas convencionales de concreto, bajo condiciones de seguridad, técnicas y de factibilidad económica.

La caracterización de los materiales a utilizar (Cemento, Agregado fino, Agregado grueso y Limalla) se realiza por medio de ensayos de laboratorio estandarizados por las Normas Técnicas Colombianas (NTC) y las normas del Instituto Nacional de Vías (INV), en correspondencia con las normas de la Sociedad Americana para Prueba y Materiales (ASTM). Con estos materiales, se determinan las proporciones relativas para la producción de mezclas (diseño de mezcla) y finalmente se elaboran 285 especímenes de concreto, diseñados inicialmente para resistir un esfuerzo a la compresión de 21 MPa. Se obtuvo con este trabajo de grado, que la adición de limalla proporciona un aumento cercano al 48% respecto a la resistencia máxima a la compresión de las mezclas convencionales de concreto. Además, se estima que el porcentaje óptimo de adición de limalla es el 4% respecto al peso de la mezcla y reemplaza en la misma cantidad al agregado fino, alcanzando un valor máximo de resistencia a la compresión a los 28 días $f'c = 30$ MPa, donde el convencional registro una resistencia $f'c = 22$ MPa.

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

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: ANALYSIS OF COMPRESSION STRENGTH OF CONCRETE WHEN FINE STEEL FILINGS ARE ADDED IN 3%, 4%, AND 5% BY WEIGHT TO THE MIXTURE

AUTOR(ES): JUAN SEBASTIÁN REYES BAUTISTA
YAMID ALONSO RODRÍGUEZ PINEDA

FACULTAD: Civil Engineering

DIRECTOR(A): Claudia Patricia Retamoso Llamas

RESUMEN

In this project, filings are added as a nonconventional aggregate. This material is residue obtained from industrial manufacturing of steel cylinder liners for engines. It partially replaces fine aggregate and combined with other components produce a concrete that complies with the required specifications. The main objective of this project is to determine the optimal percentage of filings and relative quantities of each material that guaranty the production of a concrete with increased compression strength when compared to a conventional concrete mixture under safe conditions, techniques, and economic viability.

The material characterization (i.e. characterization of cement, fine aggregate, coarse aggregate, and filings) is performed under standardized laboratory tests of Normas Técnicas Colombianas (NTC) and the norms of Instituto Nacional de Vías (INV), in accordance with the American Society for Testing and Materials (ASTM) standards. With these materials, the relative proportions for the mixture production (mixture design) were determined and 285 concrete specimens were made; these were initially designed to support a compressive load of 21 MPa. It was determined that the addition of filings increased the maximum compressive strength by 48% relative to a conventional concrete mixture. Additionally, the estimated optimum percentage addition of filings is 4% relative to the weight of the mixture and replaces in the same amount the fine aggregate obtaining a maximum compression strength on the 28th day of $f'c = 30$ MPa; in contrast, the conventional concrete mixture obtained a strength of $f'c = 22$ MPa.

KEYWORDS: Concrete, mixture, steel filings, compression strength, mixture design, aggregate.

INTRODUCCIÓN

El mundo está sufriendo cambios sociales y tecnológicos que buscan primordialmente la sostenibilidad de las distintas culturas para mejorar la calidad de vida y las condiciones actuales en las que se encuentra el planeta. Por ende el aporte que brinda este proyecto está enmarcado a ese objetivo, encontrar de manera experimental y metódica el porcentaje de limalla de acero que favorezca en la reducción paulatina del uso de agregados pétreos naturales que tienen una gran acogida y demanda en el sector de la construcción que en el mayor de los casos, estos agregados constituyen el 70% u 80%* de las mezclas de hormigón y hormigón armado.

Por consiguiente, se quiere dar a conocer que hay nuevas maneras de mejorar las mezclas de concreto al utilizar materiales que en el mayor de los casos son reciclados y en el peor son desechados generando un impacto ambiental negativo; en este caso se utilizó las limaduras resultantes del proceso de mecanizado de material acerado con el que la universidad aún no había realizado ensayo alguno a este material reciclado, empero, se esperaba una respuesta positiva dado los resultados obtenidos en trabajos de grado anteriores** realizados en la UPB*** sobre un material reciclado muy común (viruta) con características físicas casi idénticas a la limalla, pues ambas se producen de procesos mecánicos similares.

El concreto convencional es una mezcla de agua, cemento hidráulico, agregado grueso y fino, donde se obtiene un compuesto lo suficientemente resistente para soportar esfuerzos a compresión altos, sin embargo, para alcanzar las exigencias a las que es sometido, sus componentes deben cumplir con los estándares estipulados por los diferentes organismos de normalización internacional y nacional para sus ensayos de caracterización. Con estos podemos asegurar que una mezcla de hormigón cumple y amerita su uso o la continuación de su investigación para optimizarlo; es por esta razón que el siguiente proyecto (cumpliendo todas las normas) sustenta metodológicamente la mejora de mezclas convencionales al adicionar el porcentaje de limalla de acero con la que se alcanza un mayor valor de esfuerzo a la compresión.

* Diseño de mezcla realizado por la MIC Claudia Patricia Retamoso Llamas. 2010.

** a) "Optimización de un concreto de 3000 PSI mejorando la resistencia a la compresión adicionando viruta de acero". b) "Mejoramiento de la resistencia a la flexión del concreto con adición de viruta de acero con porcentajes de 6, 8, 10, 12% y 14% respecto al agregado fino de la mezcla". c) "Mejoramiento del concreto con adición de viruta de acero a porcentajes de 12 y 14% respecto al agregado fino de la mezcla". d) "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". e) "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.

Este trabajo de grado da hincapié a la continuación del mismo, debido a que presenta los resultados obtenidos, metodologías, conclusiones y demás para que se continúe mejorando y así lograr alcanzar el uso de esta clase de hormigón en el sector de la construcción. Como se dijo anteriormente, el objetivo actualmente es la sostenibilidad de la sociedad en general y también la búsqueda de mejores materiales, cada día más ligeros, resistentes y económicos que colaboren ante todo al ambiente y a los procesos utilizados en la industria de la construcción.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Ante el inminente crecimiento por parte de la industria de la construcción en el mundo, se evidencia un crecimiento directamente proporcional respecto a la demanda de recursos naturales no renovables. Para el caso de las mezclas de concreto en particular, se presenta una demanda elevada en cuanto a la disposición de agregados pétreos los cuales hacen parte fundamental de las mismas. Sin embargo, la explotación desmedida de éstos, conlleva directamente a actividades como la tala descontrolada de árboles y la deforestación incesante de grandes extensiones de bosques; de tal manera se aumenta significativamente la erosión del suelo y por consiguiente elevan los niveles de contaminación, contribuyendo directamente con el aumento de la temperatura de la atmosfera terrestre (calentamiento global); preocupación latente pues se está presentando un desequilibrio ecológico el cual agudiza la crisis ambiental.

Por lo tanto, el problema a resolver involucra factores como el uso desmedido de los recursos naturales no renovables (concientización) utilizados en la elaboración de mezclas de concreto, el mejoramiento de la calidad de las mismas y el aumento de la contaminación a causa de la erosión del suelo, además de la mala disposición de residuos contaminantes por parte de las industrias. Dichos factores podrían mejorarse sustancialmente por medio de la implementación de materiales reciclados de procesos industriales que reemplacen en parte a los agregados procedentes de las canteras o fuentes naturales. La limalla fina (teniendo en cuenta que esta cumpla con los requerimientos necesarios para ser incorporada en la producción de mezclas de concreto), podría reemplazar cierto porcentaje de la mezcla ocupado por agregado fino, aumentando considerablemente -o manteniendo- la resistencia (estándar) a la compresión del concreto e incorporando al mercado un nuevo tipo de concreto que requiera para su producción el uso de acero reciclado y además disminuya la demanda de agregados pétreos; teniendo en cuenta las exigencias de resistencia y durabilidad demandadas por las nuevas tecnologías de construcción.

2. JUSTIFICACIÓN

Bucaramanga, capital del departamento de Santander, fue fundada en 1622^{*} y desde aquella época se ha venido consolidando como una potencia nacional en la industria textilera, agrícola y turística, hasta el punto de convertirse en una de las cinco ciudades más importantes de Colombia. Por lo tanto, estas actividades han ocasionado un aumento significativo en la industria de la construcción mostrando una expansión considerable de la infraestructura. Es evidente, que este comportamiento se presenta de manera similar a nivel del mundo entero, haciendo de la construcción uno de los principales entes que promueven el desarrollo de la sociedad.

El concreto –Mezcla entre agregado grueso (grava), agregado fino (arena), cemento y agua– es uno de los componentes más importantes en todo tipo de construcción. Este se ha caracterizado por ser un compuesto que presenta una gran resistencia a la compresión, por ende, es uno de los principales materiales constructivos responsable del éxito –o fracaso– de proyectos de infraestructura en general, pues proporciona estabilidad y seguridad a los diferentes tipos de estructura en los cuales se ve involucrado su uso. Fabricar un concreto de buenas características y con las normas de calidad vigentes, puede llegar a considerarse una actividad simple, pero no lo es. Aunque se puedan obtener algunos beneficios económicos con ofertas de bajo precio y calidad, la diferencia se evidencia tarde o temprano en la obra, en su seguridad y/o en el prestigio de quien la construye.

En la elaboración de mezclas para la fabricación del concreto, es innegable el uso de recursos naturales no renovables (agregados pétreos) procedentes de canteras y/o de fuentes naturales (del fondo de los ríos). La explotación de dichos recursos conlleva de manera directa a un problema de contaminación el cual con el pasar del tiempo se ha hecho más agudo, contribuyendo con el aumento de la temperatura del planeta tierra, más conocido como el fenómeno del calentamiento global.

Por lo tanto, este proyecto está encaminado a diseñar nuevos tipos de mezclas que involucren el uso de materiales no convencionales como es el caso de los residuos de procesos industriales. En este caso en particular, se quiere promover la adición de limalla fina en la elaboración de mezclas convencionales de concreto, con el fin de disminuir determinado porcentaje de agregado fino y consecuentemente garantizar una resistencia a la compresión igual o mayor a la resistencia presentada por las muestras convencionales. De tal manera, se evita que la mala disposición de dichos residuos socave con la integridad de los seres vivos y del planeta en general.

^{*} Bucaramanga. Columbia Electronic Encyclopedia, 6th Edition, 1/1/2009

Por otra parte, con la ejecución de la investigación se busca introducir en la industria de la construcción un nuevo tipo de concreto, el cual conlleve un proceso de optimización de la materia prima empleada en la fabricación del mismo. Además se busca concientizar a los constructores en general, para que promuevan el uso de nuevos procesos en los cuales prime el cuidado del medio ambiente y la calidad de las obras de infraestructura.

Los beneficiados directos al implementar los resultados de la investigación propuesta son, en primera instancia, el gremio de la construcción quienes de manera directa usan el concreto como componente principal de la mayoría de las obras, por otra parte, los estudiantes de ingeniería quienes estén interesados en llevar a cabo nuevas investigaciones acerca del tema y la presente investigación sirva de guía principal, y por último, si se logra aumentar significativamente la resistencia a la compresión del concreto endurecido, los usuarios obtendrán un grado de confiabilidad que garantice su integridad física.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer por medio de ensayos de laboratorio la composición óptima de agregados para una mezcla de concreto adicionado con el 3%, 4% y 5% de limalla fina, con el fin de reducir el uso de recursos naturales no renovables en la fabricación de la mezcla (fomentando el desarrollo sostenible en la industria del concreto) y aumentar considerablemente –o mantener– la resistencia a la compresión del concreto.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar la variación de la resistencia a la compresión del concreto, comparando mezclas convencionales de concreto y mezclas de concreto adicionadas con limalla fina.

Realizar diferentes mezclas de concreto, para un mismo porcentaje de limalla fina (3%, 4% y 5%), disminuyendo en 5% el contenido de agregado grueso y aumentando el mismo porcentaje de agregado fino respectivamente en cada mezcla.

Ejecutar ensayos de resistencia a la compresión, a edades de siete (7), catorce (14) y veintiocho (28) días, con el fin de registrarlos.

Realizar el análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, con el fin de determinar la composición óptima de agregados (Diseño de mezcla óptimo), para el porcentaje de limalla adicionado.

Definir el porcentaje de limalla óptimo el cual proporcione el aumento más significativo en la resistencia a la compresión del concreto respecto a los demás porcentajes ensayados.

4. MARCO TEÓRICO

El fenómeno del cambio climático es hoy en día el problema que más aqueja a los seres vivos en general, es obligación del hombre buscar nuevos procesos y tecnologías que encaminen la productividad y el desarrollo hacia una sostenibilidad que interrelacione factores económicos, ambientales y tecnológicos. En el caso de la industria de la construcción, con el pasar del tiempo se ha buscado implementar procesos industrializados que conlleven el uso de nuevos materiales los cuales reemplacen en gran parte los recursos naturales no renovables (materiales convencionales), como son el cemento* portland y los agregados pétreos utilizados en masa en la fabricación de mezclas de concreto, por medio de la adición de sustancias o materiales que mejoren las características normales del concreto.

El concreto es el compuesto que presenta más demanda en la industria de la construcción, está elaborado por medio de materiales convencionales como el cemento portland, agregados pétreos, agua y en algunos casos especiales con el uso de aditivos o materiales no convencionales (en este caso limalla); para su mayor comprensión a continuación se presenta una descripción de cada uno de estos.

4.1 CONCRETO

También conocido como hormigón, es una piedra artificial fabricada por el hombre; su principal componente es el Cemento Portland el cual ocupa aproximadamente el 15% del volumen de la mezcla – para el caso de mezclas convencionales-. *“En términos generales, el concreto u hormigón puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (Cemento portland hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos”*¹. El concreto en estado endurecido es capaz de resistir grandes exigencias en cuanto a esfuerzos de compresión, siendo esta su principal característica.

Debido a sus principales características presenta una gran versatilidad en cuanto a factores como la forma, pues se adapta a cualquier moldeamiento por parte del constructor; uso, ya que puede ser estructural y no estructural; maleabilidad, en cuanto se refiere a la facilidad de vaciado del concreto; y finalmente la gran comercialización y fácil acceso, hacen de este componente, el material de construcción más utilizado en el mundo.

* HOLCIM. Cemento Boyacá Portland Tipo I. 2010.

¹ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar Editores LTDA., 2001. p. 19.

4.1.1 Clasificación según sus propiedades y características. Es tal vez la clasificación más usada en el campo de la construcción, dentro de sus subdivisiones más importantes se derivan el Concreto convencional, Concreto Ciclópeo (piedras de gran tamaño) y la clasificación del concreto según la resistencia a la compresión (dentro del medio colombiano de la construcción el más común es el concreto de 21 MPa* ó 3000 PSI). (Véase *Tabla 1. Clasificación del concreto según su resistencia a compresión*).

Tabla 1. Clasificación del concreto según su resistencia a compresión

Descripción	MPa	Resistencia a la Compresión	
		kg/cm ²	lb/pulg ²
Normal	7 - 42	70 - 420	1000 - 6000
Alta Resistencia	42 - 100	420 - 1000	6000 - 14000
Ultra Alta Resistencia	Más de 100	Más de 1000	Más de 14000

Fuente²

4.1.2 Clasificación según el sistema de colocación y compactación. Dentro de este aparte se encuentran, aunque no son de aplicación en infraestructura convencional (en su mayoría), tipos de concreto que han marcado el desarrollo y evolucionado los sistemas constructivos, uno de ellos es el *Concreto Compactado con Rodillo CCR*³ el cual difiere del concreto convencional por su consistencia seca, presenta gran aplicación en la construcción de presas de gravedad y algunos tipos de pavimento.

Otro de los más importantes tipos que se encuentran dentro de esta clasificación es el *Concreto Lanzado*, debido a que se lanza en forma de chorro a presión, este se puede auto soportar y por lo tanto lo convierte en la mejor opción cuando se tienen espesores entre 100 - 300mm y además se dificulta el uso de formaleta. También presenta gran aplicabilidad en la estabilización de taludes y en reparaciones de concreto deteriorado.

Finalmente, es importante mencionar otro, y tal vez el más conocido de los tipos de concreto, que por su versatilidad y facilidad de aplicación se ha venido constituyendo como uno de los tipos de concreto de más demanda en el mundo. Se trata del *Concreto de Bombeo*, el cual es conducido por medio de un tubo

* [MPa]: Mega-Pascal es una unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades. Se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 Mega-Newton sobre una superficie de 1 Metro cuadrado normal a la misma.

² SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Concretos y Morteros. Manejo y colocación en obra. 2 ed. Bogotá: Asocreto, 1998. p. 27.

³ Mayor información: <www.umng.edu.co/www/resources/8n1art1.pdf>.

rígido y vaciado directamente en el área de trabajo según sean los requerimientos. El volumen de concreto vaciado puede alcanzar flujos entre 8 y 150m³/hora y la distancia de bombeo puede llegar hasta 2000 m aproximadamente dependiendo del equipo que se utilice⁴.

4.1.3 Concretos especiales. Dentro de esta clasificación se encuentran diversos tipos como el *Concreto Ligero* (densidad menor que la del convencional); *Concreto de Peso Pesado* (concreto de densidad elevada), aunque sus características son similares se usa solo cuando la disposición de agregados lo exija (Véase *Tabla 2. Clasificación del concreto según su peso unitario*). Por otra parte se encuentran el *Concreto Expansivo* (uso de cementos expansivos), el *Concreto de Alta Resistencia* (cemento portland tipo III generalmente) y el *Concreto Reforzado con Fibras* (utilización de fibras sintéticas o naturales)⁵.

Dentro de esta clasificación se podría ubicar el concreto que está siendo motivo de ensayo en el presente trabajo de grado, al tratarse de un concreto donde se reemplaza parte del agregado por un material no convencional, en este caso la limalla, se convierte en un concreto especial.

Tabla 2. Clasificación del concreto según su peso unitario

Peso unitario aproximado kg/m ³	Descripción
400 - 2000	Concreto ligero
2000 - 2500	Concreto Normal
2500 - 5600	Concreto Pesado

Fuente⁶

4.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

La propiedad que con mayor frecuencia se hace referencia es la resistencia a la compresión del concreto endurecido con la cual es suficiente para garantizar un buen comportamiento estructural, aunque actualmente es crucial realizar controles a las propiedades del concreto en estado fresco para mejorar la eficiencia de los procesos constructivos y aumentar la vida útil del concreto. El concreto fresco se elabora con diversos grados de trabajabilidad, segregación, exudación, masa unitaria, contenido de aire y contenido de agua; estas son las principales propiedades que se pueden determinar por medio de ensayos de laboratorio.

⁴ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar Editores LTDA., 2001. p. 329.

⁵ Ibíd., p. 337.

⁶ Ibíd., p. 324.

4.2.1 Trabajabilidad o manejabilidad. Es el trabajo interno utilizado en vencer la fricción interna o componentes del concreto para conseguir una compactación adecuada, es decir, la capacidad que tiene el concreto para ser colocado y compactado apropiadamente sin producir deficiencias de sus propiedades en estado fresco. “La manejabilidad está representada por el grado de compacidad, cohesividad, plasticidad y consistencia”⁷.

4.2.2 Ensayo de asentamiento. Este ensayo es el más utilizado para medir la manejabilidad del concreto fresco durante la realización de los especímenes testigo, ya que es muy sencillo de realizar y ayuda a controlar el asentamiento y trabajabilidad de la mezcla a realizar con respecto a lo estipulado en el diseño de mezcla. Se estipula⁸ la consistencia en muy secas (0 a 2 cm), secas (2,5 a 3,5 cm), semisecas (3,5 a 5cm), media (5 a 10 cm), húmeda (10 a 15cm) y muy húmedas (>15cm). (Véase *Figura 1. Asentamiento del concreto*).

Figura 1. Asentamiento del concreto



Fuente: Propia

4.2.3 Segregación. Es considerada una propiedad del concreto fresco, empero, se puede considerar también como un aspecto importante de la trabajabilidad al ser definida como una tendencia de separación de las partículas gruesas del mortero del concreto, esto se debe en gran parte a la diferencia de densidades, el tamaño y forma de las partículas, el mal mezclado, el exceso de vibración en la compactación, el arrojar el concreto desde alturas mayores a 1m y al dejar fluir el concreto a lo largo de la formaleta⁹.

⁷ INSTITUTO DEL CONCRETO. Tecnología y propiedades. 2 ed. Bogotá D.C.: Asocreto, 1997. p 108.

⁸ *Ibíd.*, p. 191.

⁹ *Ibíd.*, p. 116.

Para evitar la segregación la ACI-304* recomienda realizar lo inverso a lo anteriormente descrito.

4.2.4 Exudación o sangrado. Es un tipo de segregación donde el agua de la mezcla tiende a elevarse a la superficie de una mezcla de concreto fresco. Este fenómeno es normal en tasas bajas, ya que al ser alta produce debilitamiento en la parte superior del concreto, mayor porosidad, fisuras de retracción, menor resistencia a la abrasión y al ataque de agentes agresivos del ambiente, y como consecuencia genera una disminución en la resistencia de la mezcla. La NTC** 1294 comprende un ensayo por apisonamiento del espécimen sin perturbaciones y otro por vibración intermitente, con el fin de conocer la cantidad de agua por área unitaria de concreto descubierto.

4.2.5 Masa unitaria. Este se calcula con la norma NTC-1926 (muy parecido al procedimiento para realizar cilindros testigos) que consiste en llenar tres capas de igual altura las cuales se compactan con una varilla compactadora 25 veces cada una de estas y a su vez se vibra entre 10 a 15 veces con un martillo de goma para eliminar al máximo las burbujas atrapadas de aire (no se debe enrasar ya que compacta el concreto y varia la masa unitaria).

La masa unitaria real del concreto se determina mediante el cociente de la masa neta del concreto y el volumen del recipiente y se divide la masa total de los materiales mezclados entre este valor.

4.2.6 Contenido de aire. El aire es atrapado de manera natural durante el proceso de mezclado y en algunos casos el contenido de aire aumenta en consecuencia de una mala colocación o compactación. El alto grado de vacíos pueden ocasionar en las mezclas de concreto una reducción en su resistencia, secciones efectivas de los elementos y mal aspecto visual términos arquitectónicos.

Los diferentes ensayos para calcular el contenido de aire son el de presión (norma NTC-1028), el volumétrico (norma NTC-1032) y el gravimétrico (norma NTC-1926).

4.2.7 Contenido de agua y de cemento. Esta propiedad del concreto fresco es determinante para el desempeño del concreto, ya que al encontrar variaciones

* AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI. Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting and placing. Farmington, 1997.

** Normas Técnicas Colombianas. ICONTEC.

desfavorables en las propiedades del concreto en estado endurecido estas se deban principalmente a un cambio en el contenido del agua, por ende, es importante asegurar la cantidad estipulada en el diseño de mezcla.

La norma NTC-3752 ayuda a tener una estimación de la resistencia y durabilidad potencial que tendrá el concreto y principalmente sirve para confirmar que se ha cumplido con los contenidos de agua utilizados en el diseño de mezcla.

4.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

El concreto es un compuesto capaz de soportar grandes esfuerzos a compresión dependiendo de sus propiedades mecánicas de sus componentes y de la interacción de cada uno de ellos. La resistencia a la compresión es la propiedad a la que se le da mayor importancia ya que el concreto presenta una alta resistencia a este esfuerzo donde se considera un concreto de resistencia normal cuando no supera los 42 MPa, de alta resistencia al superar los 42 MPa e inferior a 100 MPa y de ultra alta resistencia superiores a 100 MPa a los 28 días respectivamente.

La resistencia del concreto endurecido se basa en la resistencia propia de las partículas de agregado y la adherencia entre la pasta cementante y los agregados; los factores que más inciden en su resistencia son la relación agua-cemento, curado del concreto, edad del concreto y los ensayos anteriormente mencionados y desarrollados en el transcurso del proyecto.

4.3.1 Relación agua-cemento. Se describe como la cantidad de agua en masa, sin incluir el agua absorbida por los agregados sobre la cantidad de cemento en masa, es de vital importancia mantener una buena relación, ya que al haber una mayor cantidad de agua que generan poros en la pasta cementante del concreto, este se ve afectado al disminuir su resistencia.

4.3.2 Curado del concreto. La prevención del secado prematuro del concreto es crucial para evitar las fisuras internas y externas debido al aumento de la temperatura interna del concreto, y así impedir disminuciones de la resistencia del concreto como tal.

El curado debe ser de por lo menos 7 días donde el concreto se debe mantener en un ambiente totalmente húmedo que conlleve a un secado paulatino y óptimo. (Véase *Figura 2. Curado del concreto*).

Figura 2. Curado del concreto



Fuente: Propia

4.3.3 Edad del concreto. Para los concretos convencionales la máxima resistencia se alcanza a los 28 días, después de este tiempo el aumento de la resistencia es muy mínimo. Los concretos considerados de alta y ultra alta resistencia alcanzan su máxima resistencia entre los 56 y 90 días por que el aumento después de los 28 días es considerable, aunque estos son de gran densidad, impermeabilidad y resistencia, son más propensos al agrietamiento debido a la mayor contracción por fraguado y menor extensibilidad.

4.3.4 Resistencia a la tracción. Esta propiedad no se tiene en cuenta en la mayoría de los casos de estructuras normales, ya que la tracción es una propiedad donde el concreto tiene una resistencia bastante débil. Esta tiene que ver con el agrietamiento a causa de la contracción inducida por el fraguado o por cambios de temperatura que generan esfuerzos internos de tracción.

Esta propiedad del concreto endurecido es medible por ensayos indirectos más no directos debido a la dificultad de montar muestras y las dudas sobre esfuerzos secundarios. Por eso se desarrolló el método de tracción indirecta (NTC-722), el cual a la fecha proporciona datos acertados e idóneos.

4.3.5 Resistencia a la flexión. Este factor es importante en estructuras de concreto simple (losas de pavimentos), donde estos elementos sometidos a flexión

tienen una zona sometida a compresión y otra región donde predomina el esfuerzo a tracción. Este se refiere al módulo de rotura, donde se realizan ensayos en vigas de concreto (NTC-2871) para determinar el mayor esfuerzo a flexión.

4.3.6 Resistencia a cortante. Esta resistencia es tenida en cuenta por los códigos de diseño estructural, aunque el concreto presente baja resistencia frente al mismo; este tipo de esfuerzos son importantes al diseñar vigas y zapatas donde se presentan valores superiores a la resistencia del concreto.

Esta propiedad aún no tiene un ensayo claro o determinado para determinar el esfuerzo por cizalladura, ya que los diferentes métodos realizados para su medición no son muy confiables por que los resultados obtenidos son variables.

4.4 ADITIVOS

Los aditivos se han utilizado en los concretos durante mucho tiempo (aunque estos se han empezado a estudiar desde el siglo XX), ya que está comprobado que el uso de aditivos puede mejorar ciertos aspectos y características del concreto donde su comportamiento no es el deseado u óptimo. Son aquellos ingredientes extras del concreto que no están implementados para la realización de mezclas convencionales, pero estos pueden ser utilizados al realizar las pruebas necesarias que demuestren que el uso de cierto aditivo “reduce los costos en la construcción del concreto, aumente las especificaciones convencionales del concreto y aseguren la calidad del concreto en condiciones ambientales severas durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado”¹⁰ (el cumplimiento de estos tres aspectos es lo ideal al implementar cualquier aditivo en las mezclas de concreto).

Lo más relevante del uso de aditivos son las modificaciones que genere al concreto en su estado fresco, durante el fraguado y endurecido. Las principales modificaciones que se obtienen son el aumento del tiempo de manejabilidad con el mismo contenido de agua, reducción de la segregación, retardar o acelerar el fraguado, reducción del calor de hidratación, aumento de resistencia a compresión (es el que más interesa en el alcance de este proyecto), aumento de la durabilidad, entre otros. Se hará mención a los más utilizados en la industria de la construcción*.

¹⁰ INSTITUTO DEL CONCRETO. Tecnología y propiedades. 2 ed. Bogotá D.C.: Asocreto, 1997. p 97.

* Mayor información de aditivos comerciales disponible en <http://www.sika.com.co/co-con/ev-co_con_productos.htm>

4.4.1 Plastificantes. Estos son tipo A* y ayudan a plastificar o reducir la cantidad de agua.

4.4.2 Retardantes. Como su nombre lo indica son aquellos que retardan el tiempo de fraguado del concreto. Son de tipo B.

4.4.3 Acelerantes. Son aditivos tipo C utilizados para acelerar el fraguado y el desarrollo de la resistencia a edades tempranas.

4.4.4 Plastificantes retardantes y acelerantes. Combina los efectos anteriormente nombrados. Son los tipo D y E.

4.4.5 Superplastificantes. Son los más modernos de los aditivos convencionales. Es la actualización de los plastificantes retardantes, ya que mejora la reducción de agua y el retardo del tiempo de fraguado. Pueden ser de tipo F y G.

4.4.6 Incluidores de aire. Este aditivo busca incrementar la impermeabilidad y mejorar la manejabilidad o trabajabilidad de la mezcla al retener intencionalmente burbujas de aire para lograr tal fin.

4.5 MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO

Como se había mencionado en un apartado anterior, el concreto es un compuesto que resulta de la mezcla de una serie de insumos o materiales los cuales, por medio de una caracterización breve, se describen a continuación.

4.5.1 Cemento. Prácticamente ningún tipo de obra se puede iniciar excluyendo el uso de esta materia prima, al ser el elemento activo del concreto, se convierte en una de las más usadas e indispensables para el desarrollo de la infraestructura.

Es un material formado mediante la trituración y calcinación (a una temperatura de fusión de 1482°C aproximadamente) de materiales minerales calcáreos como la piedra caliza que contiene más del 25% de material arcilloso con contenido de alúmina y sílice. Al combinarse con agua, este material sufre una reacción química

* Mayor información de la clasificación de aditivos disponible en <<http://www.sika.com.mx/folleto-clasificacion-aditivos.pdf>>

y se endurece hasta formar una masa rígida; este proceso se conoce como hidratación y los cementos que de ella resultan se denominan *Cementos Hidráulicos*¹¹. Además posee propiedades de adhesión y cohesión que el aglutinamiento de todos los agregados que conforman el concreto.

4.5.2 Agregados pétreos. Son el mayor constituyente de las mezclas de concreto, generalmente componen más del 70% de la mezcla y su principal característica consiste en que son un material económico de construcción. Son obtenidos generalmente de fuentes de arenas naturales y depósitos de grava explotados por el hombre.

“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 fijando un tamaño de 4.76mm (N°4) a 0.075mm (N°200) para finos y de 4.76mm en adelante para el grueso”¹².

4.5.2.1 Agregado grueso. Es considerado como agregado grueso aquel que proviene de fuentes naturales y/o artificiales (plantas de triturado, y a partir de productos industrializados respectivamente) y es retenido en el tamiz de 4.76mm (N°4), dentro de la clasificación más común se encuentra la Gravilla, Grava, Piedra y Rajón (Véase *Tabla 3. Clasificación según el tamaño*). Sin embargo, “el agregado grueso puede ser grava triturada, roca triturada, escoria de alto horno (enfriada al aire), concreto triturado (fabricado con cemento hidráulico) o una combinación de ellos”¹³.

Tabla 3. Clasificación según el tamaño

Tamaño de las partículas en mm (Tamiz)	Denominación Corriente	Clasificación como agregado para concreto
< 0,002	Arcilla	Fracción muy fina
0,002 -- 0,075 (N°200)	Limo	
0,0075 -- 4,76(N°200 -- N°4)	Arena	Agregado Fino
4,76 -- 19,1 (N°4 -- 3/4")	Gravilla	Agregado grueso
19,1 -- 50,8 (3/4" -- 2")	Grava	
50,8 -- 152,4 (2" -- 6")	Piedra	
>152,4 (6")	Rajón, Piedra bola	

Fuente: INSTITUTO DEL CONCRETO. Tecnología y Propiedades. Colección básica del concreto. 1997.

¹¹ LOVE, T.W. El concreto en la construcción. 2 ed. México: Trillas, 2006. p. 9.

¹² INSTITUTO DEL CONCRETO. Tecnología y propiedades. 2 ed. Bogotá D.C.: Asocreto, 1997. p 67.

¹³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura: especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. p. 7.

El tamaño del agregado es un factor que afecta la resistencia de las mezclas de concreto, depende del tamaño y tipo de estructura para la cual se requiere el concreto e influye en el grado de operabilidad del mismo. Mientras más grande sea el tamaño del agregado grueso, menores serán las cantidades de cemento y agua requeridas para producir una calidad dada¹⁴.

4.5.2.2 Agregado fino. De igual manera, el agregado fino, denominado comúnmente como arena, es aquel que proviene de fuentes naturales y/o artificiales (plantas de triturado, y a partir de productos industrializados respectivamente), pasa por el tamiz de 4.76mm (N°4) y es retenido por el tamiz de 0.075mm (N°200).

La cantidad de este material afecta factores directos como la operabilidad, la textura y el terminado de la superficie. Se debe tener en cuenta la cantidad de agregado fino que se requiere para el diseño de mezcla esperado, pues se relaciona directamente con la cantidad de agua, es decir, un cambio en la cantidad de agregado fino demanda más cantidad de agua (pues presenta mayor absorción respecto al agregado grueso) y por lo tanto aumenta el grado de cohesión, aumentando también la cantidad de cemento y los factores económicos intrínsecos a la elaboración de la misma.

4.5.3 Agua. El agua en el concreto se puede definir como aquel componente por medio del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de endurecer para formar un sólido único con los agregados¹⁵. Además de su funcionalidad en el proceso de hidratación, proporciona fluidez a la mezcla mejorando su lubricación y manejabilidad. Otro de los procesos en los que el agua cumple una función indispensable es durante el curado del concreto, pues hace que el cemento se hidrate sin interrupción y por lo tanto garantiza que la mezcla alcance las propiedades potenciales para las cuales fue diseñada.

En la elaboración de mezclas de concreto se debe utilizar agua libre de materias orgánicas, álcalis, ácidos y aceites. *“Como regla general se considera que el agua es adecuada para producir concreto si su composición química indica que es apta para el consumo humano”*¹⁶. De lo contrario deben hacerse los estudios necesarios para establecer la calidad del agua según su disposición.

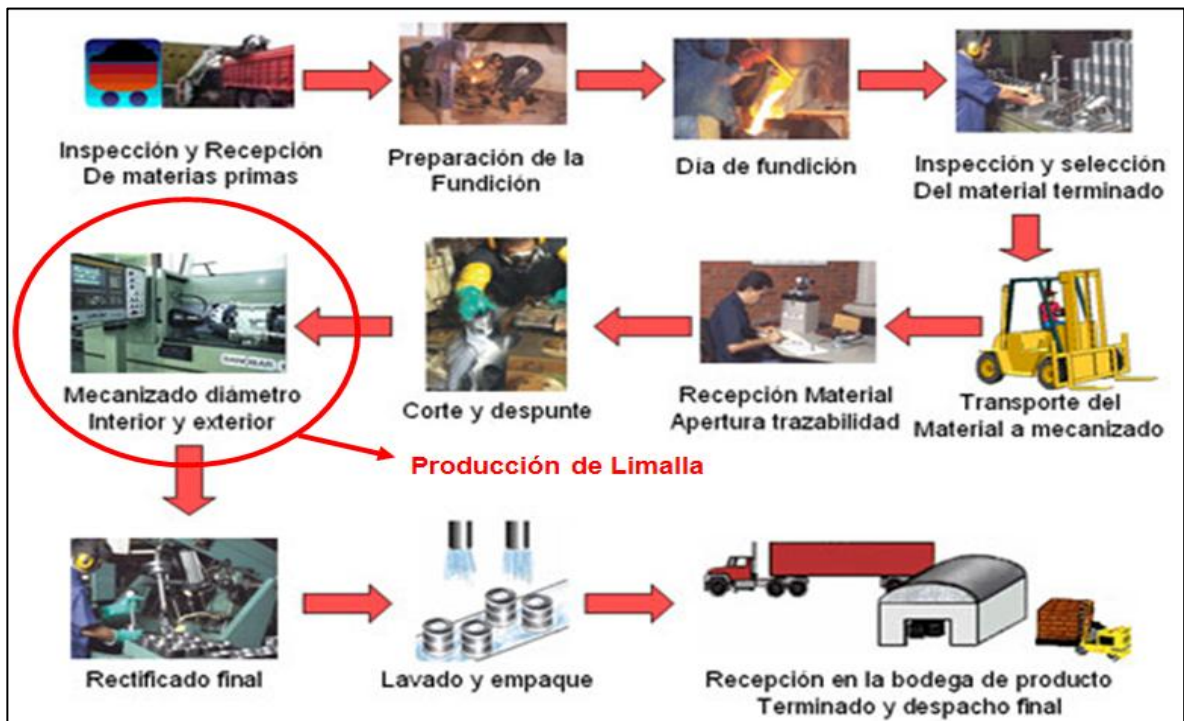
¹⁴ LOVE, T.W. El concreto en la construcción. 2 ed. México: Trillas, 2006. p. 26.

¹⁵ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar Editores LTDA., 2001. p. 57.

¹⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura: agua para la elaboración de concreto. NTC 3459. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. p. 1.

4.5.4 Limalla. La limalla es un material que se genera como subproducto del mecanizado, procedente de procesos industrializados, en este caso encaminados a la “producción y Comercialización de Camisas de Cilindro centrifugadas y barras centrifugadas para asientos de válvula para motores a gasolina, diesel y gas. Reparación de Cilindros Compresores Reciprocantes, y fabricación y reparación de partes para equipos del sector Industrial”^{*} por parte de INDUSTRIAS LAVCO LTDA^{**}.

Figura 3. Proceso productivo



Fuente: INDUSTRIAS LAVCO LTDA. 2010.

El proceso de obtención de este material inicia con la fundición a 1350°C de hierro gris reciclado (chatarra), pasando por el moldeamiento de las camisas automotrices por medio de máquinas de centrifugación, hasta llegar al proceso de mecanizado, donde se produce el arranque de limalla por medio del torno con el fin de desbastar y pulir las piezas, dando el acabado final. (Véase Figura 3. Proceso productivo y Figura 4. Proceso de mecanizado).

^{*} INDUSTRIAS LAVCO LTDA. Manual de Calidad. Bucaramanga, 2009. p. 5.

^{**} Empresa manufacturera y de servicios, del sector metalmecánico, proveedor directo de limalla para la ejecución del proyecto. Ubicada en el Km. 4 Autopista Floridablanca – Piedecuesta.

Figura 4. Proceso de mecanizado



Fuente: INDUSTRIAS LAVCO LTDA. 2010.

4.5.4.1 Características físicas. La limalla es un residuo sólido proveniente de procesos industrializados elaborados con el hierro gris, por lo tanto presenta el mismo color y textura de éste. Su tamaño se encuentra distribuido, en gran porcentaje, entre el tamiz de 4,76mm (N°4) y 0,075mm (N°200). Es un material dúctil y maleable debido a que presenta características físicas muy similares a las del hierro gris.

4.5.4.2 Características químicas*. La composición química de este material es controlada por medio de ensayos de laboratorio y cumple con los requerimientos establecidos por la norma ASTM A247-10. Su temperatura Solido-Líquido se encuentra entre 1090 y 1150°C. (Véase *Tabla 4. Componentes principales de la limalla*).

Por otra parte, a través de estudios de metalografía, se procura que el material contenga bajos porcentajes de carburos pues hace más difícil el proceso de fundición, por el contrario se requiere un material que contenga ferrítica y perlítica.

Otros componentes químicos que se encuentran en la limalla, aunque en un bajo porcentaje (<0,5%) y no presentan relevancia son: Manganeseo (Mn), Fósforo (P), Cromo (Cr), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Estaño (Sn), Titanio (Ti), Magnesio (Mg) y Aluminio (Al).

* Fuente: INDUSTRIAS LAVCO LTDA. 2010.

Tabla 4. Componentes principales de la limalla

Elemento	Símbolo	Cantidad ASTM A247-10
Carbono	C	3,2% - 3,6%
Silicio	Si	1,8% - 2,4%
Azufre	S	0,12% - 0,15%

Fuente: INDUSTRIAS LAVCO LTDA. 2010.

4.6 PRUEBAS PRELIMINARES (PREMUESTRA)

La limalla, en este caso, se convierte en un agregado no convencional para la fabricación de mezclas de concreto. Sin embargo, aunque en años anteriores se ha trabajado con materiales de características similares, como es el caso de la viruta de acero...Véase *numeral 4.8.4...*; hoy en día no se cuenta con algún tipo de registro que especifique el comportamiento e incidencia de la limalla en la variabilidad de la resistencia de dichas mezclas respecto a las mezclas convencionales de concreto.

Por lo tanto, con el fin de optimizar recursos y disminuir el grado de incertidumbre, se lleva a cabo una investigación preliminar por medio de la cual se debe ajustar un rango de trabajabilidad en relación al porcentaje óptimo de limalla que se debe agregar a la mezcla.

4.7 PRUEBAS FÍSICO MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Con el fin de realizar un diseño de mezcla óptimo, prevenir un mal comportamiento mecánico del concreto y caracterizar el tipo de materiales y estimar la calidad de los mismos, se deben realizar una serie de ensayos estandarizados los cuales se describen en forma breve a continuación:

4.7.1 Procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo. Este procedimiento¹⁷ es fundamental a la hora de realizar cualquier ensayo, ya que este divide las muestras de agregado grueso o fino para obtener porciones representativas y los tamaños adecuados.

Las muestras de agregado, previamente secas con humedad libre, son colocadas sobre una bandeja metálica la cual proporciona una superficie dura, nivelada y evita la pérdida y contaminación del material. Este se mezcla bien por medio de una pala o palustre (el que mejor se acople a la cantidad de material) para

¹⁷ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo. INVE-104-07. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. p. 3-6.

homogenizar toda la muestra, esta es apilada cónicamente en el centro de la bandeja, para proseguir con el cuarteo del cono de agregado grueso o fino.

Se dispone a aplanar la muestra con la parte llana de la pala hasta conseguir un espesor y diámetros uniformes, por último se divide el material en cuartos (se realiza con las diagonales de punta a punta de la bandeja) para tener cantidades relativamente iguales y proseguir a usar la que se requiera en los diferentes ensayos. (Véase Figura 5. Cuarteo de material)

Figura 5. Cuarteo de material



Fuente: Propia

4.7.2 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. Para la elaboración de mezclas de concreto de alta calidad, es necesario utilizar áridos bien gradados –es decir que contengan una distribución respecto a las normas de calidad, de partículas según los tamices o mallas que se utilizan en el ensayo; materiales que contengan un solo tamaño de partículas no son aptos para la elaboración de mezclas de concreto- por lo tanto con el fin de identificar la gradación, caracterizar los agregados utilizados y realizar el cálculo del Tamaño Máximo (TM), Tamaño Máximo Nominal* (TMN) y Modulo de finura de los mismos, se efectúa el ensayo¹⁸ de laboratorio por medio del cual se determina de manera cuantitativa la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, utilizando una serie de tamices de malla cuadrada cuya dimensión decrece progresivamente.

* “El tamaño máximo corresponde a la abertura del menor tamiz de la serie de tamices que permite el paso del 100% del material y el tamaño máximo nominal es el de la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más” (ASTM C125).

¹⁸ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. INVE-213-07. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. p. 4-6.

El equipo necesario para la ejecución del ensayo comprende una balanza con sensibilidad de 0,1% de la masa de la muestra, serie de tamices según las especificaciones (Véase *Tabla 5. Serie de Tamices, Granulometría Agregados Gruesos y Finos*), Horno para secado de material capaz de mantener una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$, Recipientes para pesado y herramientas menores.

El tamaño de la muestra, previamente seleccionada por el método del cuarteo, debe ser el indicado por la norma en mención. Se debe tener en cuenta que el agregado grueso utilizado para la ejecución de los ensayos respectivos durante el trabajo de grado, presenta un Tamaño Máximo Nominal TMN=1”.

Tabla 5. Serie de Tamices, Granulometría Agregados Gruesos y Finos

AGREGADO GRUESO		AGREGADO FINO	
Tamiz	Tamiz (mm)	Tamiz	Tamiz (mm)
1"	25,400	N°4	4,750
3/4"	19,050	N°8	2,360
1/2"	12,700	N°16	1,180
3/8"	9,525	N°30	0,600
N°4	4,750	N°50	0,300
N°8	2,360	N°100	0,149
N°16	1,180	N°200	0,075
N°30	0,600	Fondo	0,0
N°50	0,300		
N°100	0,149		
N°200	0,075		
Fondo	0,0		

Fuente: Propia

Una vez seleccionada la muestra, se somete a secado durante un periodo de 24 horas, hasta obtener masa constante. Después de este periodo se registra la masa de la muestra seca (M1) y se procede a lavar utilizando como fondo el tamiz N°200 (75µm); luego de este último, se deja secar la muestra de igual forma como se efectuó en pasos anteriores. Cuando se obtenga nuevamente masa constante, se registra este valor como M2 (la diferencia entre M1 y M2 es el contenido de material fino eliminado por lavado) y se procede a seleccionar la serie de tamices adecuada en forma decreciente por tamaño de abertura; se coloca la muestra en cantidades proporcionales de manera que no se ocasione pérdida de material.

Por último, se agitan los tamices individualmente (utilizando un fondo que ajuste sin holgura) y se registran las masas del material retenido en cada uno de ellos.

4.7.3 Determinación del contenido de humedad total en los agregados. La determinación del contenido de humedad total de los agregados a utilizar en una mezcla de concreto es indispensable en la medida que proporciona una base fundamental para el cálculo de la cantidad óptima de agua que debe ser agregada a las diferentes mezclas con el fin de garantizar la calidad del diseño de mezcla y por consiguiente la resistencia del concreto endurecido.

El proceso que se llevó a cabo es el descrito por la norma NTC-1776; consiste en separar una muestra de tamaño especificado, registrar el peso de la misma y someterla a un proceso de secado en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar masa constante. Por último, una vez seca y aireada la muestra, se registra el peso seco de la misma y se calcula el porcentaje de humedad.

Es importante aclarar que para la programación de fundida en días diferentes con un mismo diseño de mezcla, se debe tener en cuenta un ajuste de humedades debido a que los cambios climáticos proporcionan alteración de las mismas. Por medio de este ensayo se determinó la humedad natural para los agregados grueso, fino y limalla respectivamente.

Para el cálculo de la humedad total de la limalla, se utiliza el proceso descrito anteriormente debido a que no existe una normatividad establecida para dicho ensayo.

4.7.4 Densidad del cemento hidráulico. La densidad del cemento hidráulico es una medida indispensable en el diseño y control de mezclas de concreto; durante la ejecución de los ensayos de laboratorio concernientes al trabajo de grado se utilizó Cemento Boyacá.

Esta propiedad física no indica de manera directa la calidad del cemento; sin embargo, a partir de ella se pueden deducir otras características cuando se analiza en conjunto con otras propiedades¹⁹. En un cemento portland normal, la densidad varía muy poco dependiendo el fabricante, generalmente se encuentra cercana a 3,15 gr/cm³, a diferencia de los cementos adicionados para los cuales el valor es cercano a 3,00 gr/cm³ dependiendo del tipo y porcentaje de adición²⁰.

¹⁹ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 5 ed. Bogotá D.C.: Bhandar editores LTDA., 2001. p. 41.

²⁰ INSTITUTO DEL CONCRETO. Tecnología y propiedades. 2 ed. Bogotá D.C.: Asocreto, 1997. p 47.

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma I.N.V.E-307-07; consiste en llenar un frasco patrón de Le Chatelier* con kerosene o nafta hasta un punto medio entre 0 y 1ml, luego se lleva a un baño de agua hasta alcanzar la temperatura de calibración del frasco y se registra la primera lectura. Finalmente se agregan 64g de cemento aproximadamente (teniendo cuidado que este no quede adherido a las paredes del frasco), se hace girar el frasco suavemente con el fin de sacar el aire y finalmente se registra la segunda lectura necesaria para el cálculo de la densidad. (Véase *Figura 6. Densidad del cemento hidráulico*).

Figura 6. Densidad del cemento hidráulico



Fuente: Propia

4.7.5 Densidad de la limalla. Debido a las características físicas y químicas del material (escoria de hierro gris) imposibilita cualquier procedimiento descrito por la normatividad vigente en lo concerniente a la elaboración de mezclas de concreto, pues se trata de un material que no se ha tenido en cuenta como aditivo en el concreto. Por lo tanto, el cálculo de la densidad del material se basa en el principio de Arquímedes*, para una cantidad de material que proporcione una variabilidad baja respecto al resultado de varias pruebas. El procedimiento consiste en registrar una masa de material (M), luego se sumerge en un volumen de agua conocido (V1), la diferencia entre el volumen final (V2) e inicial se registra como

* Se trata de un frasco de vidrio de altura total de 243 mm, con un bulbo de 90 mm de diámetro. Su capacidad aproximada es de 250 ml y se utiliza para determinar la gravedad específica de materiales en polvo como limas, escorias y cemento hidráulico. <Disponible online: www.thetestequipment.com/le-chatelier-flask.html>

* "Un cuerpo sumergido en el agua pierde su peso, tanto cuánto pesa el agua desplazada por aquel cuerpo" (Arquímedes, 230 a.C.).

volumen desplazado el cual corresponde al volumen ocupado por el material (V_m). La densidad del material será dada por la expresión M/V_m . (Véase *Figura 7. Estimación densidad de la limalla*).

Figura 7. Estimación densidad de la limalla



Fuente: Propia.

4.7.6 Gravedad específica y absorción. Este ensayo incluye el procedimiento para el cálculo de medidas de gran importancia en el diseño de mezclas de concreto, en el caso de las gravedades específicas determinadas*, la más importante en el campo de la tecnología del concreto es la “Gravedad Específica Aparente”, debido a que por medio de esta, se determina la cantidad optima de agregado grueso o fino respectivamente requerido para un volumen unitario de concreto. Además se obtiene el valor de la absorción del agregado ensayado, medida la cual es inversamente proporcional a la calidad del concreto puesto que en cuanto menor sea la absorción, mayor es la calidad y compactación del mismo, sin embargo la mayor importancia de la medida de absorción se adquiere en el momento de realizar correcciones en la cantidad de agua que se debe incorporar a la mezcla.

* Gravedad específica aparente, Gravedad específica bulk con superficie saturada superficialmente seca y Gravedad específica bulk.

4.7.6.1 Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos. La ejecución de este ensayo se basa en la norma I.N.V.E-222-07, el procedimiento inicia con la separación de la muestra por el método de cuarteo, esta debe ser secada al horno hasta alcanzar masa constante. Una vez seca la muestra, se procede a cubrir la muestra con agua durante un periodo entre 15 y 19 horas; después del periodo de inmersión, se decanta la muestra –garantizando que no haya pérdida de material-, se extiende en una superficie plana y por medio de corrientes de aire caliente se seca la superficie de las partículas hasta conseguir un estado saturado superficialmente seco (SSS) en las partículas. Para verificar este estado se realiza una prueba por medio de un molde cónico el cual es llenado con la muestra compactada por medio de 25 golpes, si al levantar el cono las partículas finas se derrumban parcialmente, el agregado a alcanzado el estado SSS.

Al obtener el estado SSS del agregado se registran las masas y se procede a introducir una cantidad de $500 \pm 10\text{g}$ del agregado fino en un picnómetro parcialmente lleno de agua –previamente aforado y pesado- (se llena hasta un 90% de su capacidad). Se elimina el aire contenido en el picnómetro por medio de agitación y se sumerge en agua hasta alcanzar una temperatura de 23°C aproximadamente, finalmente se registra la masa del conjunto.

Figura 8. Gravedad específica y absorción de los agregados



Fuente: Propia

4.7.6.2 Gravedad Específica y Absorción de Agregados Gruesos. La ejecución de este ensayo se basa en la norma I.N.V.E-223-07, el procedimiento inicia con la separación de la muestra por el método de cuarteo hasta obtener la masa mínima especificada. La muestra debe ser lavada hasta eliminar el material que pasa el Tamiz N°4, después del lavado se procede con el secado al horno de la muestra hasta alcanzar masa constante; posteriormente se sumerge la muestra en agua durante un periodo de 15 horas aproximadamente.

Después del proceso de inmersión, se procede a secar las partículas por medio de un paño absorbente hasta observar una superficie opaca de las partículas, en este punto se elimina el agua superficial y se obtiene el estado SSS de las mismas, a continuación se registra la masa de la muestra saturada con superficie seca.

Finalmente, se coloca la muestra dentro de una canastilla metálica y se registra la masa de la masa sumergida en el agua. Una vez sumergida se seca la muestra al horno hasta alcanzar masa constante y se registra la masa de la muestra seca. (Véase *Figura 8. Gravedad específica y absorción de los agregados*).

4.7.7 Masa unitaria y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos. La incidencia en la mezclas de concreto de la masa unitaria suelta y compacta respectivamente, es de gran importancia debido a que la primera se relaciona directamente con aspectos de forma y textura; y la masa unitaria compacta es un índice para conocer la calidad del agregado ensayado, debido a que en cuanto mejor sea la granulometría, mayor es el valor de la densidad. Las partículas de forma cúbica o esférica producen mayor masa unitaria²¹. Además se obtiene el porcentaje de vacíos presente en los agregados, el cual proporciona una estimación del espacio entre partículas en una masa de agregado no ocupado por materiales minerales sólidos.

Para la ejecución del ensayo, se tuvo en cuenta la norma I.N.V.E-217-07 “Densidad Bulk (Peso Unitario) y Porcentaje de Vacíos de los Agregados Compactados o Suelos”. La muestra debe ser seleccionada por el método de cuarteo y el tamaño debe ser mayor al 125% de la cantidad requerida para llenar el recipiente, esta muestra debe estar seca en el momento de realizar el ensayo.

Primero se debe calibrar el molde y registrar la masa y volumen del mismo. Tanto para agregados gruesos como para finos se sigue el mismo procedimiento. Para la determinación de la masa unitaria del agregado compactado, se debe realizar llenando del molde por medio de tres capas homogéneas, compactadas cada una por medio de 25 golpes con una varilla compactadora de punta semiesférica; una vez terminada la última capa se enraza y se registra la masa del molde y el agregado compactado.

²¹ INSTITUTO DEL CONCRETO. Tecnología y propiedades. 2 ed. Bogotá D.C.: Asocreto, 1997. p 90.

Por otra parte, para la determinación de la masa unitaria del agregado suelto, se llena el molde por medio de una cuchara, dejando caer libremente el material desde una altura no mayor a 50mm hasta colmarlo, finalmente se enraza y se registra la masa del molde con el agregado suelto. El porcentaje de vacíos se calcula por medio de una relación que involucra la Gravedad Específica Bulk y la Masa Unitaria del agregado ensayado. (Véase *Figura 9. Masa unitaria de los agregados*)

Figura 9. Masa unitaria de los agregados



Fuente: Propia

4.7.8 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en agregados. Este ensayo se realiza teniendo en cuenta la norma INVE-211-07, en la cual está lo necesario para la realización del mismo (objeto, materiales, muestra y procedimiento). La determinación de esta práctica es de vital importancia, ya que con ella se puede decidir si los agregados a utilizar son ideales para la realización de concreto con cemento Portland.

Para realizar este ensayo, se toma una gran cantidad de agregado grueso y fino el cual se cuartea en una bandeja de acero. Se toma una cantidad de agregado grueso, en este caso se tomaron muestras retenidas en los tamices de 3/4", 3/8" y No.4, se deben tener en cuenta las masas mínimas exigidas por la norma. Se procede de igual forma con el agregado fino, teniendo en cuenta que para éste se utiliza el material retenido en los tamices N°8 y N° 16 (Véase *Tabla 6. Masas mínimas de las muestras*).

Tabla 6. Masas mínimas de las muestras

Tamaño de las partículas entre los tamices de:	Masa mínima de la muestra de ensayo, g
4.75 - 9.5 mm (No.4 - 3/8")	1000
9.5 - 19.0 mm (3/8" - 3/4")	2000
19.0 - 37.5 mm (3/4" - 1½")	3000
Mayores de 37.5 mm (1½")	5000
La muestra para ensayo del agregado fino deberá consistir de partículas más gruesas que el tamiz de 1.18 mm (No.16) y su masa no deberá ser menor de 25g.	

Fuente: Norma INVE-211-07

A estas muestras, una vez tamizadas, se les realiza un lavado para eliminar al máximo los finos y luego son llevadas al horno hasta que se sequen totalmente. Estas son pesadas y registradas en la hoja de datos correspondiente al ensayo. Inmediatamente se deja en remojo durante 24 horas para realizar la separación entre los componentes de la muestra y las partículas finas removibles que puedan romperse al apretar entre los dedos índice y pulgar, estas partículas se clasifican como terrones de arcilla o partículas deleznable. Por último, las muestras son secadas y pesadas para así calcular el porcentaje de estas partículas contenidas en ellas.

4.7.9 Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos. Esta norma²² da a conocer la importancia de este ensayo, ya que permite tener una referencia sobre las impurezas orgánicas que pueden estar presentes en las arenas con las cuales se va a realizar las mezclas de concreto. Este procedimiento es sencillo ya que es un ensayo cualitativo.

Para la determinación del contenido de materia orgánica en la arena, se vierte este material en una botella de vidrio incoloro hasta completar un volumen aproximado de 130 mililitros (ml), consiguiente a este paso se añade la solución de hidróxido de sodio a la arena y se agita vigorosamente el frasco hasta que el conjunto alcance un volumen aproximado de 200 ml.

Finalmente, se deja reposar la mezcla durante 24 horas para continuar con la comparación de colores de la placa orgánica con la del tono del hidróxido de sodio. La placa orgánica representa 5 colores (Véase *Tabla 7. Placa orgánica*), de los cuales el 4 y el 5, no están permitidos para las arenas cuya disposición sea la elaboración de mezclas de concreto. (Véase *Figura 10. Contenido de materia orgánica*).

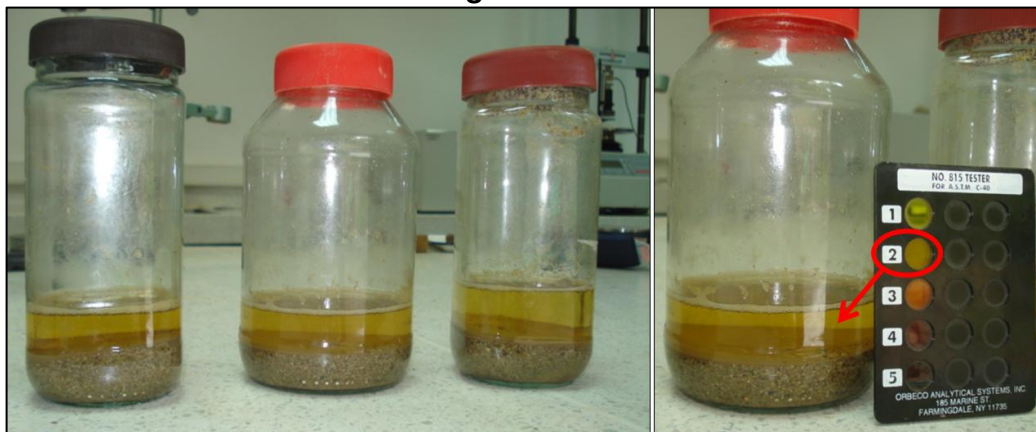
²² INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos. INVE-212-07. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. p. 2-3.

Tabla 7. Placa orgánica

NUMERO DEL COLOR NORMAL GARDNER	PLACA ORGÁNICA No.	COLORES
5	1	AMARILLO
8	2	AMARILLO OSCURO
11	3	ÁMBAR
14	4	ÁMBAR OSCURO
16	5	NEGRO

Fuente: Adaptado de la Norma INVE-212-07

Figura 10. Contenido de materia orgánica



Fuente: Propia

4.7.10 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles. Este control²³ es utilizado como un indicador de la calidad inherente de los agregados gruesos, el cual se determina por medio de la máquina de los ángeles (Véase *Figura 11. Determinación de la resistencia al desgaste*). Se realiza la granulometría correspondiente a la muestra donde se retenga material cumpliendo con el peso exigido de la norma (Véase *Tabla 8. Gradación tipo y peso de cada fracción*).

Al seleccionar el tipo de gradación, la misma nos da el número de esferas a utilizar en la realización del ensayo, estas se introducen con el material en la máquina de los ángeles donde se deja durante el transcurso de 500 revoluciones (más o menos 30 rpm*), después de este lapso, la muestra se pasa por un tamiz mayor al No.12 y lo que pase se tamiza por el tamiz No.12 y a continuación lo que se retenga en él se lava, se seca y se consigna su masa.

²³ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles. INVE-218-07. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. p. 5.

* Revoluciones por minuto.

Tabla 8. Gradación tipo y peso de cada fracción

TAMAÑOS		GRADACIÓN TIPO Y PESO DE CADA FRACCIÓN (g)						
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2"					2500		
2"	1 1/2"					5000	5000	
1 1/2"	1"	1250					5000	5000
1"	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	N°3			2500				
N°3	N°4			2500				
N°4	N°8				5000			
N° ESFERAS		12	11	8	6	12	12	12

Fuente: Norma INVE-218-07

Figura 11. Determinación de la resistencia al desgaste



Fuente: Propia

4.7.11 Equivalente de arena de suelos y agregados finos. Este ensayo²⁴ tiene como principal objetivo, dar un valor empírico de la cantidad de material arcilloso presente en la muestra de agregado fino, se resalta, que este ensayo es para

²⁴ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Equivalente de arena de suelos y agregados finos. INVE-133-07. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. p. 9-12.

determinar de una manera rápida en el campo las variaciones de calidad de los agregados durante su utilización.

El agregado fino a utilizar en este ensayo debe ser tamizado por la malla No.4 (unos 500gr aproximadamente), se cuartea y se vierte cierta cantidad en un toma muestras de aluminio y se enrasa con una espátula o cuchillo.

En un cilindro plástico graduado se agrega unos 10cm de solución de stock o cloruro de calcio, en este, se vierte el agregado fino del toma muestras por medio de un embudo para evitar que el material se pegue en las paredes del cilindro, este se deja reposando durante 10 minutos para que se homogenice el líquido con la muestra. Después de este lapso, se encaja el cilindro en la máquina de agitación mecánica durante 45 segundos y luego se introduce el tubo irrigador en la muestra para lavar y forzar a las arcillas a quedar en suspensión por encima de la arena.

Figura 12. Estimación del equivalente de arena



Fuente: Propia

Se dispone a dejar en reposo durante 20 minutos la muestra para dejar que se sedimente toda la arcilla, se toma la lectura de la altura del piso hasta la arcilla y por último se introduce el pistón de acero (muy lentamente para evitar el movimiento de la arcilla) que con su peso muerto cae hasta la altura de la arena la

cual se registra para pasar a calcular el porcentaje de equivalente de arena al dividir la lectura de arena sobre la lectura de arcilla (Véase *Figura 12. Estimación del equivalente de arena*).

4.7.12 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados. Lo que se busca determinar²⁵, es el porcentaje en masa de una muestra de agregado grueso de las partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos (una o más caras fracturadas).

Se realiza la granulometría de cierta cantidad de agregado grueso hasta el retenido en el tamiz No.4, luego se cuartea la muestra ya gradada para disponerse a tomar el peso de muestra exigido dependiendo de lo que pasa y se retiene en los diferentes tamices (Véase *Tabla 9. Peso muestra*).

Tabla 9. Peso muestra

FRACCIÓN		PESO MUESTRA (g)
PASA	RETENIDO	INDICADO
1 1/2"	1"	2000
1"	3/4"	1500
3/4"	1/2"	1200
1/2"	3/8"	300

Fuente: Norma INVE-227-07

Una vez separada la masa indicada, se dispone a observar y clasificar cada una de las partículas de la muestra, de las cuales se separan dependiendo si tienen, o no, caras fracturadas*. Consiguiente a esto, se pesan las dos clasificaciones para calcular el porcentaje de caras fracturadas por medio de la diferencia y relación entre el peso tomado de la muestra lavada con el peso de las partículas que cumplen con los requisitos del ensayo.

4.7.13 Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados. El objetivo es determinar²⁶ los índices de partículas aplanadas y alargadas de una muestra, esto ayuda a determinar las partículas más vulnerables a la fractura

²⁵ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados. INVE-227-07. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. p. 3-4.

* "Una superficie angular, áspera o quebrada de una partícula de agregado, formada por trituración por medios artificiales o por la naturaleza" (Norma I.N.V.E-227-07).

²⁶ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras. INVE-230-07. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. p. 7.

debido a su forma. Se realiza la granulometría al material cuya masa mínima ha sido verificada con anterioridad, (Véase *Tabla 10. Masa mínima de la muestra*), con la cual se tomara la masa retenida en cada uno de los tamices. Finalmente, se pone en recipientes la muestra retenida en cada tamiz y se hace pasar cada partícula por el calibrador de alargamiento y de aplanamiento. Se registra la masa de partículas aplanadas y alargadas respectivamente, y se calcula la sumatoria de los índices respectivos.

Tabla 10. Masa mínima de la muestra

MÁXIMO TAMAÑO NOMINAL CON ABERTURAS CUADRADAS		MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA DE ENSAYO Kg.
mm.	Pulg.	
9,5	3/8	1
12,5	1/2	2
19	3/4	5
25	1	10
37,5	1 1/2	15
50	2	20
63	2 1/2	35

Fuente: Norma INVE-230-07

4.7.14 Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. Esta norma²⁷ establece los procedimientos que se deben tener en cuenta para elaborar y curar los cilindros testigo de concreto para ensayos de laboratorio.

Previamente a la realización del procedimiento de elaboración, se tienen en cuenta el tipo de molde a utilizar para la realización de la misma (en el caso de este proyecto se manipularon moldes cilíndricos de 30 centímetros (cm) de altura y 15 cm de diámetro aproximadamente), también constan de una base cuadrada mayor al diámetro para proporcionarle estabilidad y perpendicularidad con respecto al suelo en que se apoye la misma. Estos están hechos de material impermeable (acero y aluminio en algunas), los cuales están previamente aceitados con el fluido hidráulico reciclado de las prensas hidráulicas utilizadas en la realización de los ensayos de resistencia a la compresión de los especímenes testigo. Para la elaboración de los cilindros se tiene en cuenta que el área de trabajo este nivelado, sea rígido y lo más cercano al sitio de almacenamiento.

²⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura: elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. NTC-1377. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. p. 9-15.

Se dispone a realizar el mezclado del cemento, agregado grueso y fino, agua y limalla (cantidades dadas en el diseño de mezcla), estos se colocan dentro de la mezcladora mecánica (trompo) en funcionamiento. Como primero se vierte el agregado grueso con cierta cantidad del agua total de la mezcla, siguiente a este en intervalos de tiempo entre cada uno de ellos, se adiciona el agregado fino, la limalla, el cemento y lo que falta de agua; se deja mezclar hasta que se vea una mezcla fluida y homogénea. En este caso se tuvo en cuenta un desperdicio ya que la mezcladora se “embadurna” de cierta cantidad de mezcla, lo cual genera pérdidas de mezcla.

Se vierte el concreto sobre una bandeja metálica totalmente limpia para evitar la contaminación de la mezcla, a esta se le debe realizar el asentamiento²⁸ con el cono de Abrams que consiste en adicionarle 3 capas iguales hasta el tope del cono, en donde cada capa es compactada 25 veces con la varilla compactadora en toda su área transversal y al llegar al tope, se enrasa con la varilla para quitar el exceso de material. El cono se levanta suavemente y uniformemente en dirección vertical y se prosigue a medir el asentamiento de la mezcla con respecto a la altura del molde para verificar el asentamiento dado en el diseño del concreto (Véase *Figura 13. Elaboración y curado de muestras de concreto para ensayos de laboratorio*).

El método utilizado para la elaboración de los cilindros testigos, fue el de apisonado (Véase *Tabla 11. Número de capas requeridas para las muestras*), pues este especifica el tipo de consolidación a usar con respecto al tipo y altura del espécimen. Consiste en verter el concreto por medio de una cuchara metálica, la cantidad necesaria para cumplir la altura aproximada para cada capa y esta se compacta 25 veces (Véase *Tabla 12. Diámetro de varilla y número de golpes para utilizar en el moldeo de muestras de ensayo*) toda su área transversal dejando caer libremente la varilla compactadora sobre la misma. Luego se dispone a golpear suavemente con el martillo de goma (chapulín) de 10 a 15 veces el molde a cada capa apisonada para cerrar los huecos y permitir la salida de burbujas de aire atrapado.

Consecuentemente, se enrasa el cilindro con la varilla y se alisa con el palustre para dejar una superficie nivelada y lo más lisa posible para proporcionar un área en la cual la carga que se le vaya a suministrar se distribuya lo más uniformemente posible sobre la misma. Inmediatamente se dispone a dejar en el área de almacenamiento.

Finalmente, al realizar todo el procedimiento de elaboración, se retira la formaleta de los cilindros de concreto después de dejar secar al aire durante 24 horas cada

²⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura: método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. NTC-396. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. p. 2-3.

uno. Estos se llevan a unas pilas con agua saturada en cal la cual envuelve todas las caras del cilindro para evitar la evaporación del agua del concreto y así mantener una temperatura estable con la cual los cilindros puedan alcanzar un mejor curado, el cual incide directamente con la resistencia a la compresión del concreto.

Figura 13. Elaboración y curado de muestras de concreto para ensayos de laboratorio



Fuente: Propia

Tabla 11. Número de capas requeridas para las muestras

Tipo y tamaño del espécimen altura (mm)	Método de compactación	Número de capas	Altura aproximada de la capa (mm)
Hasta 300	Apisonado	Tres iguales	100
Mayor que 300	Apisonado	Las requeridas	100
Hasta 460	Vibración	Dos iguales	200
Mayor que 460	Vibración	Tres o mas	200

Fuente: Norma NTC 1377 (Primera actualización). 1994.

Tabla 12. Diámetro de varilla y número de golpes para utilizar en el moldeo de muestras de ensayo

DIÁMETRO DEL CILINDRO EN mm	DIÁMETRO DE LA VARILLA (mm)	NUMERO DE GOLPES POR CAPA
50 a 150	10	25
152	16	25
200	16	50
250	16	75

Fuente: Norma NTC 1377 (Primera actualización). 1994.

4.7.15 Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. Con este se determina²⁹ la carga máxima que resiste cada uno de los especímenes, después de 7, 14 o 28 días de curado respectivamente; con el fin de determinar la resistencia a la compresión de los cilindros testigo.

Después de cumplido el tiempo de curado de cada cilindro (7, 14 o 28 días), estos son extraídos de la pila con agua saturada en cal, se dejan secar un corto lapso de tiempo, para disponerse a tomar y registrar las dimensiones (diámetro y altura) y peso de cada uno de los especímenes. Consignados estos datos, se procede a realizar el ensayo en la prensa hidráulica, la cual se adecua para el correcto funcionamiento de la misma, para ello se pone el espécimen en el mismo sentido en que se hizo (sus caras superior e inferior deben conservar su posición inicial) sobre un plato metálico el cual tiene en su interior una sección circular de neopreno (este fue el material utilizado para este proyecto) que ofrece una mejor distribución de la carga sobre las caras del cilindro testigo.

La máquina esta calibrada a una velocidad para mantener una carga continua y sin impactos, esto con el fin de acoplar el cilindro a la carga de manera paulatina y no abrupta; en el tablero digital de la prensa se registra la máxima carga, la cual es consignada en una hoja de datos para calcular la presión máxima resistida por el espécimen en cualquiera de sus diferentes edades.

4.7.16 Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión. El módulo de elasticidad estático, también conocido como módulo de Young se trata de la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria del concreto, a cualquier edad y bajo las condiciones de elaboración establecidas anteriormente. En otras palabras es la pendiente de la curva Esfuerzo Vs Deformación del concreto dentro de la zona elástica. Este ensayo se

²⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura: ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. NTC-673. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. p. 7-8.

realiza para “cilindros de concreto normalizados y núcleos de concreto, cuando estos se hallan bajo esfuerzos de compresión longitudinal”³⁰.

Para la determinación de éste, se debe seguir un procedimiento el cual inicia cuando ha culminado el proceso de curado de los cilindros de concreto. Una vez registradas las dimensiones y peso de los cilindros testigo, se deben tomar parejas* de ellos, con el fin de establecer la resistencia máxima a la compresión a un cilindro de cada pareja conformada. Consecuentemente, se ajusta un compresómetro al cilindro restante de la pareja que se está ensayando y se procede a medir las excentricidades que existen desde el borde del cilindro hasta los pivotes del compresómetro. (Véase *Figura 14. Compresómetro ajustado para medida del modulo de elasticidad*).

Figura 14. Compresómetro ajustado para medida del modulo de elasticidad



Fuente: Propia

Se debe tener en cuenta que el compresómetro este bien ajustado a las caras del cilindro, se lleva el conjunto Cilindro-compresómetro a la máquina de carga (prensa hidráulica) y se alinea el eje del espécimen con el centro de aplicación del bloque de apoyo de la máquina. Luego se debe ajustar la velocidad de aplicación de la carga, con el fin de garantizar que esta se aplique continuamente y sin

³⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura: método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión. NTC-4025. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. p. 1.

* Se deben realizar parejas de cilindros los cuales hayan sido elaborados con las mismas características de diseño y tipos de material, es decir que pertenezcan al mismo tipo de mezcla.

sobresaltos. Esta velocidad debe ser tal que permita las lecturas necesarias para la ejecución del ensayo.

Finalmente se inicia la aplicación de la carga, registrando lecturas por medio de un deformímetro (calibrado a 0.01mm) cada 10 kN, hasta llegar al 40% de la carga máxima (garantizando que el concreto se encuentre dentro de la zona elástica) estimada anteriormente. Una vez culminado el registro de lecturas se lleva el cilindro hasta su resistencia máxima.

El valor del módulo de elasticidad se obtiene por medio de la expresión:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

- E:** Módulo de elasticidad secante (MPa.)
- S₁:** Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal, ε_1 , de las 50 millonésimas, en MPa.
- S₂:** Esfuerzo correspondiente a una deformación del 40% de la carga última.
- ε_2 :** Deformación longitudinal producida por el esfuerzo S2.

La aplicación del módulo de elasticidad se ve reflejada en el “*dimensionamiento de elementos estructurales reforzados y no reforzados para establecer las cantidades de acero de refuerzo y calcular los esfuerzos para las deformaciones*” (NTC 4025).

4.8 ANTECEDENTES DE ALGUNOS TIPOS DE CONCRETO ADICIONADOS CON MATERIALES NO CONVENCIONALES.

Con el transcurrir del tiempo, los diferentes entes que contribuyen al avance de la ingeniería civil, y por ende al desarrollo de la industria de la construcción, se han visto en la tarea de analizar el comportamiento de nuevos materiales, que conlleven al mejoramiento de la calidad, en este caso específico, de las mezclas de concreto.

Por otra parte, es afán de todo ser humano el cuidado del planeta, por lo tanto la mayoría de las investigaciones actuales tienden hacia el aprovechamiento de productos que fomenten el reciclaje y disminuyan el uso de recursos naturales no renovables. A continuación se presentan a manera de resumen algunas investigaciones, cuyo tema central es consecuente en relación con el objetivo de este trabajo de grado.

4.8.1 Óptimo Contenido de Escoria de Cobre como Agregado Fino en el Hormigón de Alta Resistencia³¹. Este estudio investiga las propiedades mecánicas del hormigón incorporando la escoria de cobre como un agregado fino y llega a la conclusión de que al sustituir menos del 40% de arena por escoria de cobre se puede obtener un hormigón de alta resistencia, de características comparables o mejores a la mezcla de control, sin embargo, al adicionar escoria de cobre en proporciones mayores, su comportamiento disminuye de manera significativa. La viabilidad y características de la fuerza son evaluadas a través de una serie de pruebas en seis diferentes proporciones de mezcla, las cuales se basan en un reemplazo gradual (en peso) de arena por escoria, empezando de 0% hasta 100%, con variaciones constantes de 20% respectivamente.

La investigación incluye las pruebas de compresión estática y dinámica, la prueba de resistencia a la flexo-tracción, y la microscopía electrónica. Los resultados indican además de un crecimiento significativo en la resistencia del hormigón con menos del 40% de escoria de cobre como reemplazo en peso respecto el agregado fino, una excelente compresibilidad de la escoria de cobre, ya que esta presenta una textura suave y superficies vítreas, lo cual puede mejorar la funcionalidad y el comportamiento dinámico del hormigón.

Sin embargo, desde el punto de vista microscópico demuestra que existen diferencias limitadas entre el hormigón convencional y el hormigón con contenido de escoria de cobre. Un exceso en la presencia de agua, altera la finura y los niveles de óxido férrico en la mezcla, afectando la resistencia a la compresión y a la flexo-tracción en el hormigón. Además, muestra que si se adiciona escoria de cobre en proporciones mayores al 40% en peso respecto a la arena, se generan huecos, micro fisuras y canales capilares en la micro estructura del hormigón, presentando daños severos como respuesta a una resistencia prematura.

4.8.2 Nuevos Concretos para el Aprovechamiento de un Sub-Producto Industrial³². La industria de la construcción y los grupos de investigación, influenciados por las tendencias mundiales, se encaminan hacia el uso de nuevos materiales que fomenten el desarrollo sostenible con una baja emisión de Dióxido de Carbono y un correcto aprovechamiento de los recursos naturales, además de ventajas técnicas para el uso respectivo de los mismos en diferentes campos de aplicación.

³¹ WU WEI, ZHANG WEIDE, MA GUOWEI; Optimum Content of Copper Slag as a Fine Aggregate in High Strength Concrete. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore; School of Civil and Resource Engineering, University of Western Australia, Australia.

³² MEJÍA DE GUTIÉRREZ R., BERNAL S., RODRÍGUEZ E. Nuevos Concretos para el Aprovechamiento de un Sub-Producto Industrial. Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, Habana, Cuba, Octubre 8 de 2006.

En este artículo se evalúa el desempeño de “concretos a base de polímeros inorgánicos (Geoconcretos) obtenidos a partir de la activación alcalina de una escoria siderúrgica de alto horno colombiana, que posee un coeficiente de basicidad de 1.01 ($Mb = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$). Como activadores alcalinos para la producción de los geoconcretos se empleó Hidróxido de Sodio (NaOH) y waterglass ($Na_2SiO_3 \cdot nH_2O + NaOH$)”³³.

Por medio de ensayos de laboratorio se obtiene una serie de propiedades de durabilidad de las mezclas, la resistencia mecánica a diferentes edades de curado del concreto, y además se evidencia, en presencia de agentes agresivos (cloruros y sulfatos), que los valores de porosidad y permeabilidad de los concretos activados resaltan su durabilidad potencial. Los resultados fueron comparados con mezclas de referencia de concreto y se obtuvieron resistencias a la compresión a 28 días de curado de 35, 20 y 26 MPa para los concretos activados con Waterglass, NaOH y convencional respectivamente.

4.8.3 Efectos y usos de las fibras de acero en mezclas de concreto³⁴. El uso de fibras de acero en las mezclas para concreto, colaboran a mejorar la resistencia a la compresión, tracción y flexión del hormigón en estado endurecido.

La presencia de estas fibras influye ligeramente en la resistencia a compresión; con una adición de 1,5% de fibras de acero con respecto al volumen del concreto puede aumentar la resistencia a la tracción directa hasta un 40% y en un 150% la resistencia a la flexión. Usualmente, los volúmenes de fibras de acero agregadas al concreto varían del 0,25% al 2%, volúmenes que sean mayores al 2% reducen considerablemente la trabajabilidad de la mezcla y el esparcimiento de las mismas. Si se desea realizar un hormigón con mayor porcentaje de fibras, se requiere un diseño de mezcla especial o técnica especial de colado.

Con respecto al tema de durabilidad de estos concretos con adición de fibras de acero depende de las mismas causas que el convencional. La resistencia a la congelación-deshielo no se minimiza siempre y cuando se le incorpore aire, se consolide correctamente y haya un ajuste de mezcla para acomodar las fibras. Con respecto al problema de la corrosión superficial de las fibras de acero en el concreto, es simplemente un problema de apariencia y no afecta las condiciones estructurales, esto ocurre si no se coloca y proporciona el hormigón de manera correcta. Las fibras contenidas dentro de la mezcla están protegidas de la corrosión por la alta alcalinidad del concreto (como sucede con el acero de refuerzo contenido en el concreto).

³³ MEJÍA DE GUTIÉRREZ R. PhD, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Profesor Titular “Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, Habana, Cuba, Octubre 8 de 2006.

³⁴ KOSMATKA, Steven H., et al. Diseño y control de mezclas de concreto. 1 ed. Illinois: PCA, 2004. p.154-156.

La adherencia de la mezcla con las fibras de acero se puede mejorar, si éstas tienen una rugosidad superficial alta. El módulo de elasticidad de estas fibras es relativamente alto, por lo que estas son comúnmente utilizadas en pavimentos de aeropuertos y en las capas de revestimiento de las pistas, en los tableros de puentes, pisos industriales, pavimentos de autopistas, donde sea necesario un aumento de la resistencia al impacto o de la tenacidad, la estabilización de la inclinación de rocas y revestimiento de túneles.

4.8.4 Investigaciones concernientes al tema, Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga. Por medio de una serie de Trabajos de Grado (para optar por el título de Ingeniero Civil) realizados anteriormente* por estudiantes de la universidad en mención, se lograron obtener resultados favorables relacionados con el incremento sustancial de la resistencia del concreto fabricado en el laboratorio mediante ensayos de muestras de cilindros testigo sometidos a compresión.

Sin embargo, cabe aclarar que el material adicionado a las mezclas de concreto en estas tesis, se trataba de **viruta de acero**, el cual es un material que presenta características de tamaño y resistencia diferentes a la **limalla fina**.

La cantidad de ensayos que se realizan se distribuyen según la edad de las mezclas para cada cilindro testigo, las cuales son de tres (3), siete (7) y veintiocho (28) días. Con esto se logran comparar los incrementos o la disminución en la resistencia para las diferentes mezclas de concreto en los diversos periodos de tiempo previamente establecidos, para finalmente reportar que diseño de mezcla resulto ser el más óptimo según las especificaciones del proyecto.

Luego de la ejecución de los diversos ensayos, utilizando los cilindros testigo con adiciones de viruta de acero de porcentajes variables que van desde el 6% hasta el 20%, se logró estipular un rango de resultados de esfuerzos favorables que van desde los 26 MPa hasta los 37 MPa con 6% y 10% de viruta adicionada a la mezcla respectivamente, generando un incremento en la resistencia entre el 20% al 60% respecto a la mezcla de concreto estándar sin adición de viruta de acero.

* a) "Optimización de un concreto de 3000 PSI mejorando la resistencia a la compresión adicionando viruta de acero". b) "Mejoramiento de la resistencia a la flexión del concreto con adición de viruta de acero con porcentajes de 6, 8, 10, 12% y 14% respecto al agregado fino de la mezcla". c) "Mejoramiento del concreto con adición de viruta de acero a porcentajes de 12 y 14% respecto al agregado fino de la mezcla". d) "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". e) "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".

5. METODOLOGÍA

Las universidades en general, convergen en un objetivo primordial para la evolución y trascendencia de las mismas, se trata de la investigación; por ende se hace necesario incentivar en cada una de estas, proyectos que conlleven a la inclusión de nuevas tecnologías y procesos según el campo de aplicación, empero, dichos cambios deben ir ligados de manera directa con el cuidado y mejoramiento del medio ambiente, pues actualmente, es la situación que más aqueja al mundo entero.

Por consiguiente, con el fin de dar pie a una investigación a fondo acerca de nuevos procedimientos o materiales para mejorar, en este caso, el compuesto más utilizado en la industria de la construcción –el concreto– por medio de la adición de limalla, se establece un orden de actividades según su precedencia. Además, ante el interés que puedan mostrar estudiantes, docentes o cualquier ente educativo además de las diferentes empresas productoras de concreto, la metodología que se presenta a continuación, da pie para que el proyecto se reproduzca de manera similar, utilizando materiales que cumplan con las especificaciones estimadas para los utilizados en el presente, garantizando de tal manera resultados similares.

Por otra parte, tratando de dar claridad a la metodología que se llevó a cabo, se presenta una ilustración por medio de la cual, de manera gráfica se puede observar cada uno de los pasos descritos dentro de esta (*Véase Figura 15. Metodología general del proyecto*).

5.1 VISITA Y SOLICITUD DE SUMINISTRO DE LIMALLA EN LAS EMPRESAS DEL SECTOR METALMECÁNICO (LOCALES).

El trabajo inicia con la búsqueda de empresas del sector metalmecánico o a fines, que estuvieran en la disposición de proveer la limalla necesaria para la ejecución del proyecto. Por consiguiente, se realizan visitas de campo a dos de las empresas más importantes del sector, en la ciudad de Bucaramanga y el área metropolitana, con el fin de gestionar el suministro de dicho material.

La primera de estas visitas, se realiza a la empresa DANA TRANSEJES COLOMBIA, ubicada en la zona industrial de Girón (Santander), no obstante, la gestión prevista no fue la esperada, debido a que el material en mención es manejado por una empresa contratista que compra y recicla el mismo. Tras la intención de gestionar el suministro ante esta última, no fue posible la ubicación de los responsables del manejo del material y por tanto se descarta cualquier procedimiento ante las empresas anteriormente mencionadas.

Figura 15. Metodología general del proyecto



Fuente: Propia

Consecuentemente, se inicia una nueva gestión ante INDUSTRIAS LAVCO LTDA (km 4 Autopista Floridablanca-Piedecuesta) empresa manufacturera y de servicios, del sector metalmecánico; por medio de una visita donde se evidenció una excelente disposición por parte de los directivos de la misma. Por consiguiente, se pactó realizar la solicitud escrita del material, registrando la cantidad requerida para la ejecución del proyecto (la solicitud la realizó el Departamento de investigaciones de la UPB quienes facilitaron el proceso de adquisición de la limalla), planteando como posibilidad, la ampliación del mercado de la empresa, si los resultados son favorables y presentan aceptación ante las empresas productoras de concreto.

5.1.1 Recolección, selección y acopio de limalla. Una vez terminada la gestión ante la empresa proveedora, se programa una visita con el fin de recolectar el material. La cantidad solicitada a la empresa fueron **600 kg de limalla**, con el fin de suministrar las cantidades necesarias para la ejecución de este proyecto y el de los compañeros Eliecer Beltrán Castillo y Víctor Hugo Ortiz Ariza³⁵ (estos dos proyectos son del mismo tema a tratar pero con diferentes porcentajes de limalla). El material es conducido al laboratorio de suelos de la universidad*, donde se realiza un tamizado del mismo, separando de la muestra los grumos y tamaños mayores al tamiz N°4. Finalmente se empaca en sacos de fibra y se almacena en un lugar libre de humedad.

5.2 PREMUESTRA

5.2.1 Estimación de las cantidades de material para la elaboración de la premuestra. El cálculo de las cantidades de materiales, necesarias para la producción de los cilindros testigo en la fase preliminar, se realiza de forma experimental...*Véase numeral 4.6...* De acuerdo a lo anterior, se inicia con la elaboración de seis mezclas diferentes, disminuyendo constantemente 10% -en cada una- el porcentaje de agregado grueso y aumentando en igual cantidad el agregado fino. El porcentaje de limalla permanece constante, y se reemplaza en cada mezcla en iguales cantidades respecto al peso del agregado fino. (*Véase Tabla 13. Proporción de agregados para la fabricación de cilindros testigo – Premuestra (Cálculo tipo – muestras selectivas).*)

Este procedimiento se lleva a cabo de igual manera, para la elaboración de mezclas con diferentes porcentajes de adición de limalla (se elaboraron mezclas con adiciones de **3%, 4%, 8%, 12% y 20%** de limalla)*. Por medio de las mezclas

³⁵ “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”. 2010.

* Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga. Laboratorios de Ingeniería civil.

* La razón por la cual se utilizan estos rangos de adición de limalla, se fundamenta en las investigaciones previas y descritas en el numeral 4.8.4

experimentales anteriormente mencionadas, se elaboran **120 cilindros** testigo con el fin de registrar por medio de ensayos de laboratorio, la resistencia a la compresión de cada uno de ellos para edades de 7, 14 y 28 días respectivamente... Véase numeral 4.7.15...

Tabla 13. Proporción de agregados para la fabricación de cilindros testigo – Premuestra (Cálculo tipo – muestras selectivas)

Limalla 3%	Agregados= 13300,0 g Cemento= 1700,20 g H ₂ O= 990,0 ml					
MATERIALES	PORCENTAJES (%)					
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
Grueso	70	60	50	40	30	20
Fino	27**	37**	47**	57**	67**	77**
Limalla	3*	3*	3*	3*	3*	3*
Fino Sin Limalla	30	40	50	60	70	80
MATERIALES	PESOS (g)					
Grueso	9310	7980	6650	5320	3990	2660
Fino	3591	4921	6251	7581	8911	10241
Limalla	399	399	399	399	399	399
MATERIALES	MUESTRA SIN LIMALLA (g)					
Grueso	9310	7980	6650	5320	3990	2660
Fino	3990	5320	6650	7980	9310	10640
CONVENCIONAL						
MATERIALES	MUESTRA SIN LIMALLA (g)					
Grueso	9310	7980	6650	5320	3990	2660
Fino	3990	5320	6650	7980	9310	10640
Cemento	1700,2	1700,2	1700,2	1700,2	1700,2	1700,2
H ₂ O=	990	990	990	990	990	990

Fuente: MIC. Claudia Patricia Retamoso Llamas. 2010.

*Este porcentaje varía de acuerdo a la adición de limalla.

El porcentaje de agregado fino, varía respecto al porcentaje de adición de limalla y se calcula por medio de la ecuación: **%Fino= 100% - %Grueso - %Limalla.

Tabla 14. Ensayos de laboratorio para la caracterización de agregados utilizados en la fabricación de mezclas de concreto

ENSAYO	NORMA (INVIAS)	CORRESPONDENCIA
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS	INVE-213-07	ASTM C-136-01 NTC 77-94
HUMEDAD NATURAL DE LOS AGREGADOS	NA*	NTC 1776-94
HUMEDAD NATURAL DE LA LIMALLA	NA	NA
DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO	INVE-307-07	ASTM C-188-95 R03 NTC 221-99
DENSIDAD DE LA LIMALLA	NA	NA
GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS	INVE-222-07	ASTM C-128-01 NTC 237-95
GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS	INVE-223-07	ASTM C-127-01 NTC 176-95
DENSIDAD BULK (PESO UNITARIO) Y PORCENTAJE DE VACÍOS DE LOS AGREGADOS COMPACTADOS O SUELTOS	INVE-217-07	ASTM C-29/C-29M-R03 NTC 92-95
DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS	INVE-211-07	ASTM C-142-97 NTC 589-00
CONTENIDO APROXIMADO DE MATERIA ORGÁNICA EN ARENAS USADAS EN LA PREPARACIÓN DE MORTEROS O CONCRETOS	INVE-212-07	ASTM C-40-04 NTC 127-00
RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37,5 mm (1 1/2") POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ÁNGELES	INVE-218-07	ASTM C-131-03 NTC 93-95
EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS	INVE-133-07	ASTM D2419-02
PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS	INVE-227-07	ASTM D5821-01
ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS	INVE-230-07	ASTM D4791-05e1

Fuente: Propia

* No aplica.

Finalmente, una vez obtenida la resistencia máxima a la compresión registrada para cada uno de los cilindros testigo, y por medio de un análisis detallado a los resultados, se llega a la conclusión que el porcentaje óptimo de limalla se encuentra cercano al 4%. Es por tal motivo que durante la ejecución de los ensayos y muestras referentes al trabajo de grado final, se trabajaron mezclas con adiciones de limalla en proporciones de 3%, 4% y 5% respecto al peso de la mezcla.

5.2.2 Elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros testigo, fase preliminar. Teniendo como base las cantidades estimadas anteriormente, estos procedimientos se elaboran con base a las normas NTC 1377 y NTC 673... Véase numeral 4.7.14 y 4.7.15... Finalmente, se registran los valores de resistencia a la compresión para cada uno de los cilindros ensayados, y por medio de un análisis se estima el rango dentro del cual el comportamiento de las mezclas fue el mejor, teniendo en cuenta la resistencia última a la compresión y el porcentaje de adición de limalla.

5.3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Los agregados utilizados en la ejecución de los diferentes ensayos, proceden de yacimientos naturales, “Bocas (Rio Negro, Santander)” y “Pescadero (Santander)”; aunque la experiencia ha demostrado buena calidad de los materiales procedentes de estas fuentes, es necesario realizar una serie de ensayos, por medio de los cuales se estimen las características físico-químicas de los mismos y posteriormente analizar si estas, se encuentran o no, dentro de los estándares establecidos por las normas. Para dicha caracterización, se emplean los ensayos relacionados en la *Tabla 14. Ensayos de laboratorio para la caracterización de agregados utilizados en la fabricación de mezclas de concreto... Véase numeral 4.7...*

5.4 DISEÑO DE MEZCLA

En el numeral 4.5 se ha estudiado la composición de las mezclas de concreto y se puede concluir que los principales componentes de éstas son el cemento, los agregados pétreos (áridos), agua, aditivos (según requerimientos) y para el caso de estudio de este trabajo de grado en especial, la limalla. Una dosificación óptima de estos materiales, garantiza en una mezcla el cumplimiento de las principales exigencias en cuanto a factores económicos y de diseño. Por lo tanto, siendo la optimización de recursos un aspecto primordial para la industria de la construcción, se hace necesario determinar las cantidades relativas de agregados

bajo condiciones de seguridad, técnicas y de factibilidad económica, necesarias para producir un concreto que satisfaga sus requerimientos particulares de uso*.

Los métodos que se llevan a cabo para el diseño de la mezcla son, el estipulado por el Instituto Americano del Concreto durante su comité ACI 211³⁶ y el de la Road Note Laboratory (RNL), adaptados a las exigencias del proyecto. El primero, es tal vez el más conocido y de mayor uso en la mayoría de países del mundo, “*se fundamenta en el principio básico de la relación agua/cemento desarrollado por Abrams. Consiste en seguir en forma ordenada una serie de pasos y determinar la cantidad de cada material en peso y en volumen, para 1m³ de concreto*” (Instituto del Concreto)³⁷. El segundo, es un método gráfico por medio del cual se busca la combinación de agregados que produzca la mayor densidad, y se utiliza en los casos que los agregados no cumplen con las especificaciones respectivas de granulometría contenidas por la norma ASTM C33³⁸.

Por lo tanto, se presenta la metodología descrita para cada uno de los pasos que se llevaron a cabo en la estimación de las cantidades óptimas de materiales para la fabricación de mezclas de concreto. (Véase *Figura 16. Secuencia de pasos para la dosificación de mezclas*).

5.4.1 Datos previos. Es importante conocer los datos de la obra que se vaya a construir y de las condiciones de transporte y colocación, empero, esta sección del diseño de la mezcla se debe tener en cuenta para conocer las propiedades de los materiales con los que se va a preparar la mezcla, con el fin de realizar un diseño acorde a las exigencias y sistema constructivo de la estructura civil a ejecutar (Véase *Tabla 15. Datos previos de obra y de los materiales*).

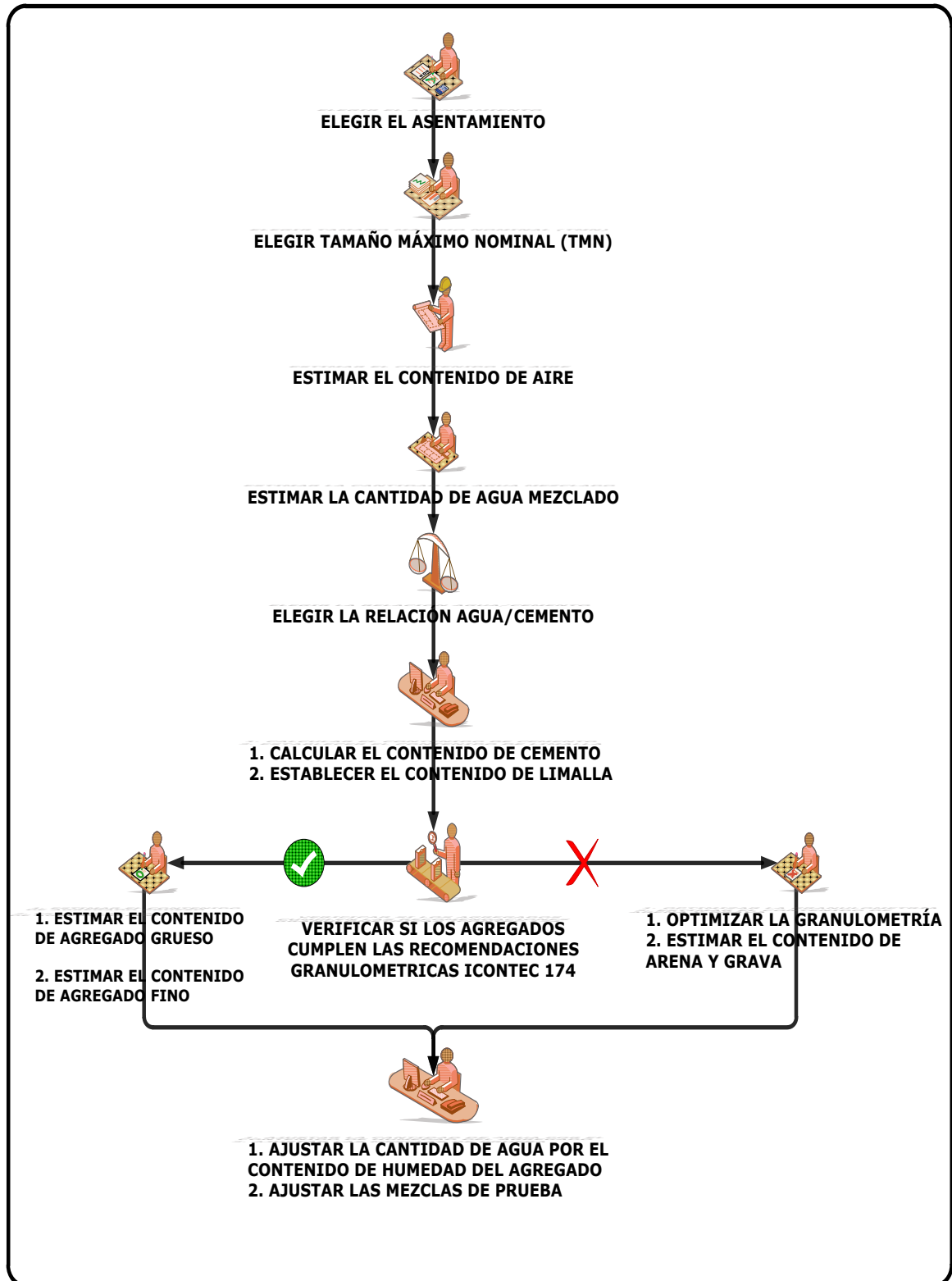
* Estado fresco: Maleabilidad, Economía. Estado endurecido: Resistencia, durabilidad, acabado y peso volumétrico.

³⁶ 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.

³⁷ INSTITUTO DEL CONCRETO; Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Tecnología y propiedades. 2 ed. Bogotá D.C.: Asocreto, 1997. p 187.

³⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33 / C33M – 08. Pennsylvania, USA: ASTM, 2003. P 1-11.

Figura 16. Secuencia de pasos para la dosificación de mezclas



Fuente: Adaptado de "Tecnología y Propiedades (Instituto del concreto)". 1997.

Tabla 15. Datos previos de obra y de los materiales

DATOS DE LA OBRA	DATOS DE LOS MATERIALES
Máxima relación agua/cemento	Granulometría
Tamaño máximo nominal del agregado	Módulo de finura de la arena
Asentamiento (consistencia) recomendado	Tamaño máximo de la grava y de la arena
Mínimo contenido de cemento	Densidad aparente de la grava y de la arena
Dimensión mínima del elemento a construir	Absorción de la grava y de la arena
Espaciamiento del acero de refuerzo	Masa unitaria compacta de la grava
Condiciones a que estará expuesta la estructura	Humedad de los agregados inmediatamente antes de hacer las mezclas
Resistencia a la compresión mínima necesaria por consideraciones estructurales	Densidad del cemento
Densidad mínima para pesas de gravedad y estructuras similares	

Fuente: Adaptado de "Tecnología y Propiedades (Instituto del concreto)". 1997.

5.4.2 Elección del Asentamiento. En cualquier tipo de obra de construcción donde se involucre el uso de mezclas de concreto, se debe adoptar un valor de asentamiento (Slump) el cual garantice una consistencia tal, que permita una puesta en obra eficiente. Para la elección del asentamiento, se tuvo en cuenta los valores de la *Tabla 16. Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción*. La selección del asentamiento se realizó teniendo en cuenta una consistencia media, un grado de trabajabilidad medio y el tipo de estructura (Losas medianamente reforzadas, Pavimentos y losas compactados a mano, Columnas, vigas, fundaciones y muros con vibración).

Con base a lo anterior, para el diseño de las diferentes mezclas de concreto que involucra este trabajo, se eligió un valor de asentamiento de **10cm**, ya que corresponde al tipo de estructura y condiciones de colocación previamente descritos. Donde la mezcla de concreto a trabajar se considera en esencia de consistencia media.

Tabla 16. Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción

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.
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: Instituto del concreto. Tecnología y propiedades. 1997.

5.4.3 Estimación tamaño máximo nominal. El tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso se debe especificar ya que este límite afecta en las proporciones relativas del mismo, bien como la demanda de agua y de cemento, la trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, contracción y retracción, y durabilidad del concreto. El tamaño es esencial para poder determinar el concreto que se desea, es decir, si el tamaño máximo nominal se aumenta considerablemente en la mezcla se obtienen concretos económicos con resistencias aceptables (al suministrar una menor cantidad de cemento y agua), pero si lo que se quiere obtener es un concreto de alta resistencia, se hace una mezcla con un tamaño máximo nominal menor que al mezclarse con una relación agua-cemento ideal este alcanza dicha clase de resistencia. “El tamaño máximo

nominal deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura”³⁹.

Al realizar la granulometría especificada anteriormente en el marco teórico, dio como resultado final un tamaño máximo nominal de 25mm. (1”), aunque por ese tamiz paso el 100%, en el tamiz de ¾” se retuvo más del 15% de la muestra, por ende se escogió ese tamaño con respecto a la ASTM C 125.

5.4.4 Estimación del contenido de aire. El aire incluido ayuda a la mezcla a mejorar la trabajabilidad y cohesión de la mezcla, esta cantidad (Véase *Tabla 17. Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregado*) de aire esperado en el concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para los agregados, se determina como un factor que puede variar el volumen unitario del concreto para corroborar los efectos que producen al quedar atrapadas en la mezcla (dependiendo del caso de exposición dado en ACI-211 y 318). En este caso, la mezcla del concreto se realiza con el aire que es atrapado naturalmente.

Tabla 17. Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregado

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
½	12.50	2.5	4.0	5.5	7.0
¾	19.10	2.0	3.5	5.0	6.0
1	25.40	1.5	3.0	4.5	6.0
1 ½	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

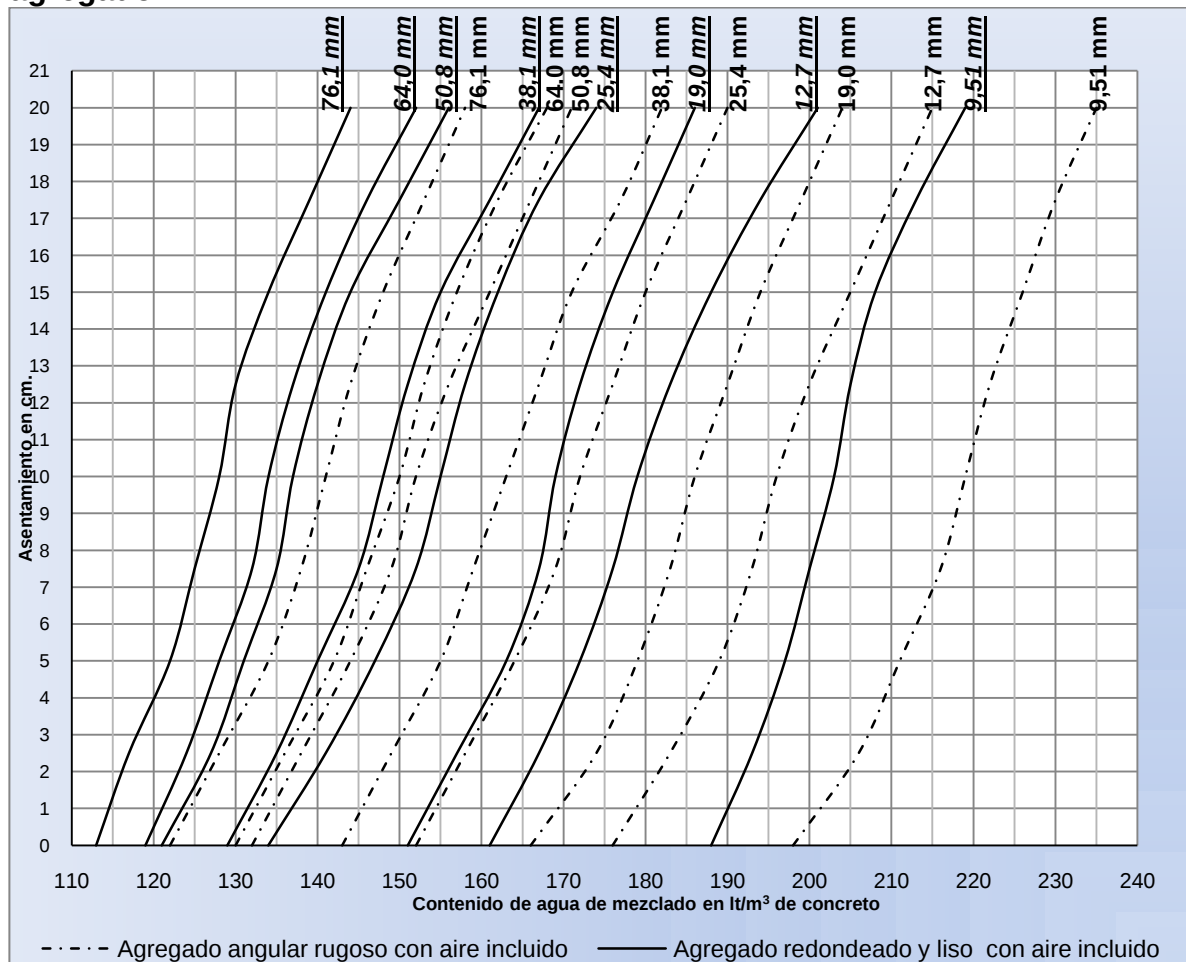
Fuente: Adaptado del ACI-211 y 318 (11.2, 11.4)

³⁹ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 5 ed. Bogotá D.C.: Bhandar editores LTDA., 2001. p 229.

Respecto al tamaño máximo nominal (1") del proyecto se calcula el contenido de aire atrapado naturalmente, es por eso que se escoge el valor en donde el porcentaje de aire atrapado y el tamaño máximo nominal se crucen, en este caso es 1,5%.

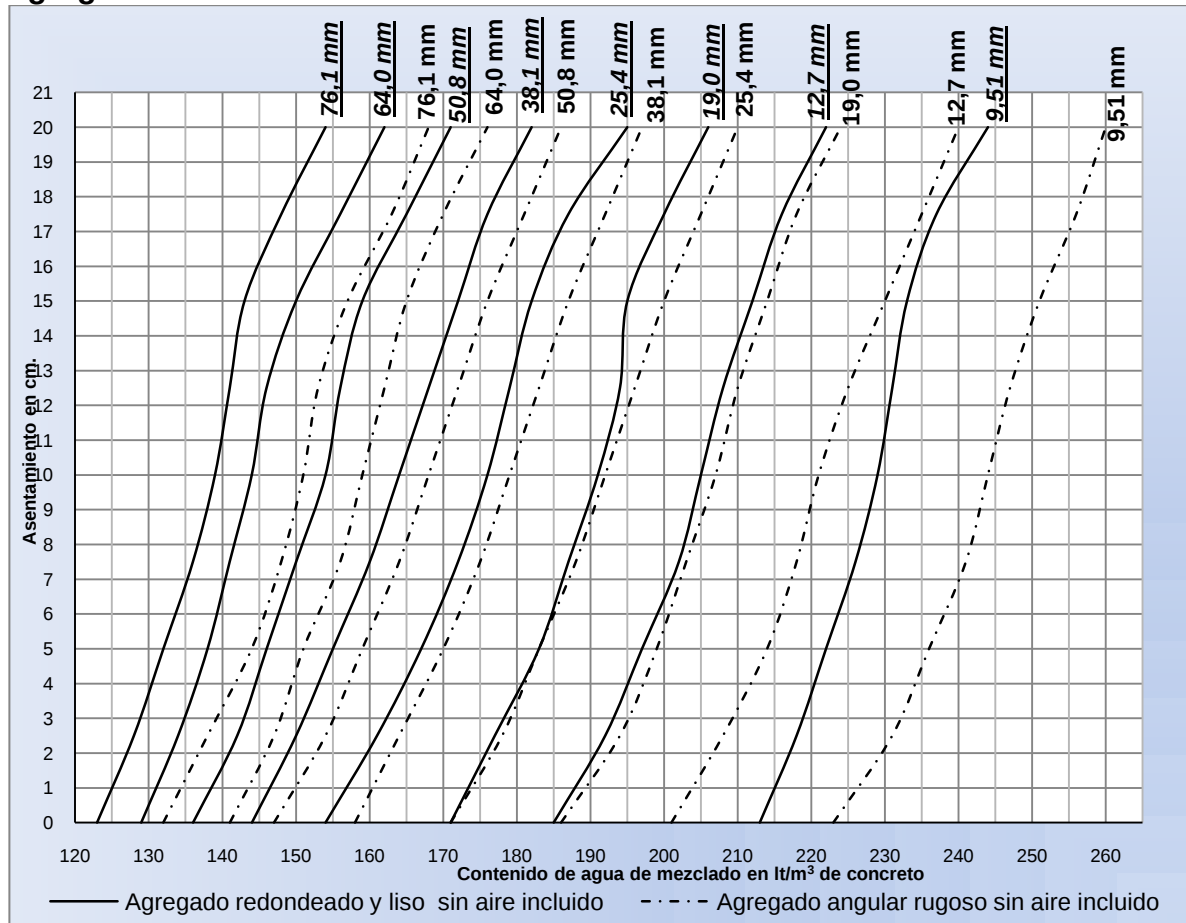
5.4.5 Estimación de la cantidad de agua de mezclado. La cantidad de agua que se requiere para producir una mezcla de concreto con un asentamiento establecido, depende directamente de factores de tamaño, forma y textura de los agregados (partículas rugosas necesitan menos cantidad de agua que las partículas lisas), del contenido de aire, y del uso de aditivos (cuando se requiera).

Figura 17. Requerimiento aproximado de agua de mezclado, para concreto con aire incluido, en función del tamaño máximo, forma y textura del agregado



Fuente: Adaptado de Diego Sánchez de Guzmán. "Tecnología del concreto y del mortero". 2001.

Figura 18. Requerimiento aproximado de agua de mezclado, para concreto sin aire incluido, en función del tamaño máximo, forma y textura del agregado



Fuente: Adaptado de Diego Sánchez de Guzmán. "Tecnología del concreto y del mortero". 2001.

Para la estimación de este valor existen dos métodos, el primero es un método gráfico que relaciona el TMN del agregado, el asentamiento de la mezcla, y la forma y textura de las partículas (Véase *Figura 17. Requerimiento aproximado de agua de mezclado, para concreto con aire incluido, en función del tamaño máximo, forma y textura del agregado* y *Figura 18. Requerimiento aproximado de agua de mezclado, para concreto sin aire incluido, en función del tamaño máximo, forma y textura del agregado*). El segundo, es un criterio suministrado por el Instituto Americano del Concreto (ACI 211) descrito por medio de la *Tabla 18. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado*. Este último, es el procedimiento que se lleva a cabo para la estimación de la cantidad de agua de mezclado, utilizada en el diseño de mezcla en cuestión.

Tabla 18. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado

CONDICIONES DEL CONTENIDO DE AIRE	Asentamiento (cm)	Agua en kg/m ³ de concreto para los TMN del agregado indicado (mm)							
		10	12.5	20	25	40	50**	70**	150**
CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO	3 – 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 – 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 – 18	240	230	210	205	185	180	170	---
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire incluido (%)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
CONCRETO CON AIRE INCLUIDO	3 – 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 – 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 – 18	215	205	190	185	170	165	160	---
	Promedio recomendable de contenido de aire (%)	8.0	7.0	6.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0
**Los valores de asentamiento para un concreto que contenga un agregado mayor de 40 mm están basados en pruebas de asentamiento efectuado después de remover las partículas mayores de 40 mm por medio de cribado húmedo.									

Fuente: American Concrete Institute. ACI 211-08

Por lo tanto, teniendo en cuenta un TMN=1" (25,4mm) para el agregado, la cantidad de agua a utilizar en el diseño de mezcla para un concreto sin aire incluido, según el método anterior, es **a= 194,6kg/m³** y el volumen de la misma es **0,1946m³**.

5.4.6 Selección relación agua/cemento (a/c). La resistencia del concreto se ve claramente ligada a la interacción que tiene la adherencia de la pasta cementante y los agregados pétreos dentro de la mezcla. Por ende es importante conocer la

relación agua-cemento existente para determinar cuál relación es la adecuada para la mezcla, ya que los distintos agregados y cementos interactúan de manera distinta con una misma relación agua-cemento.

La resistencia a la compresión del concreto convencional del proyecto es de 21 MPa, entonces la relación agua/cemento (Véase *Tabla 19. Relación agua-cemento*) del concreto sin inclusor de aire es **a/c= 0,58**.

Tabla 19. Relación agua-cemento

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)	CONCRETO SIN INCLUSOR DE AIRE	CONCRETO CON INCLUSOR 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: hoja de cálculo MIC Claudia Patricia Retamoso Llamas. 2010.

5.4.7 Estimación del contenido de cemento. Para el cálculo de la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto, se procede por medio de una ecuación sencilla (Véase *Ecuación 2*), donde se involucra la relación agua/cemento (a/c) y la cantidad de agua (a). Finalmente, se obtiene una masa de cemento **Mc=335,52 kg** y un volumen de cemento **Vc= 0,111 m3** (valores para producir 1 m3 de concreto).

$$c = \frac{a}{a/c}$$

Ecuación 2

Dónde: **C:** Volumen de cemento
a: Volumen de agua
a/c: Relación agua-cemento

5.4.8 Verificación granulométrica. El diseño de una mezcla optima, depende en gran parte de la gradación que presentan los agregados. Por lo tanto, es indispensable verificar que la distribución de partículas de acuerdo al tamaño, este dentro de los rangos establecidos por las especificaciones técnicas.

Para tal fin se utilizan las tablas contenidas en la norma NTC 174 (ASTM C33-03) las cuales relacionan los requisitos de gradación para agregado grueso y fino respectivamente (Véase *Tabla 20. Requisitos de gradación para agregado grueso* y *Tabla 21. Requisitos de gradación para agregado fino*). Es de aclarar que el método de diseño de mezclas descrito por la norma ACI-211, requiere del cumplimiento de las gradaciones anteriormente nombradas. De lo contrario, debe utilizarse otro método (RNL) de estimación de las proporciones óptimas de los materiales utilizados en las mezclas de concreto.

Al realizar la comparación de las diferentes gradaciones obtenidas para los agregados, con las gradaciones comprendidas en la norma, se puede verificar que las curvas de distribución propia de cada agregado se encuentran dentro de la franja granulométrica especificada, y por tanto se garantiza el uso del método del ACI 211 para el diseño de la mezcla.

Tabla 20. Requisitos de gradación para agregado grueso

Agregado	Tamaño nominal mm	MATERIAL QUE PASA CADA UNO DE LOS SIGUIENTES TAMICES ICONTEC (PORCENTAJE)												
		101.6 mm (4")	90.5m m (3 1/2")	76.1m m (3")	64.0m m (2½")	50.8m m (2")	38.1m m (1½")	25.4m m (1")	19.0m m (¾")	12.7m m (½")	9.51m m (3/8")	4.76m m (N°4)	2.38m m (N°8)	1.19m m (N°16)
1	90.50 – 38.10	100	90 a 100		25 a 60		0 a 15		0 a 15					
2	64.00 – 38.10			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5					
3	50.80 – 25.40				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5				
35 7	50.80 – 4.76				100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 5		
4	38.10 – 19.0					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5				
46 7	38.10 – 4.76					100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 5		
57	25.40 – 4.76						100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5	
67	19.00 – 4.76							100	90 a 100		20 a 55	0 a 10	0 a 5	
7	12.70 – 4.76								100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	
8	9.510 – 2.38									100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

Fuente: Adaptado de la norma NTC 174. 1994.

Tabla 21. Requisitos de gradación para agregado fino

TAMIZ		%PASA	
mm	Alternativo	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
9.51	3/8"	100	100
4.76	No 4	95	100
2.38	No 8	80	100
1.19	No 16	50	85
0.595	No 30	25	60
0.297	No 50	10	30
0.149	No 100	2	10

Fuente: Adaptado de la norma NTC 174. 1994.

5.4.9 Estimación de las proporciones de agregados y limalla. Desde este punto en adelante, el diseño de mezcla es adaptado particularmente a los requerimientos necesarios para la inclusión en la mezcla del material no convencional. Por lo tanto, como no se conocen registros históricos del comportamiento de la limalla en las mezclas de concreto, se hace necesario aplicar métodos de dosificación experimentales, por medio de los cuales se pueda estimar la dosificación óptima de los materiales (agregados grueso, fino y limalla), realizando las correcciones que por humedad sean necesarias.

Las proporciones de agregados se distribuyen de acuerdo al tipo de mezcla y apoyados en los resultados obtenidos en la fase de experimentación preliminar (premuestra); se distribuyen (para cierto porcentaje de limalla) cinco (5) mezclas diferentes, disminuyendo en cada una la cantidad de agregado en 5% y aumentando la misma cantidad de manera proporcional en cada mezcla.

5.4.9.1 Volumen de agregados. En primera instancia, la estimación del volumen total de agregados es relativamente sencilla; como se había especificado anteriormente, el diseño de mezcla se realiza –inicialmente– con el fin de estimar las proporciones necesarias para producir 1m^3 de concreto. Por consiguiente, una vez estimados los volúmenes de aire, agua y cemento respectivamente, se estima el volumen total de agregados por medio de la *Ecuación 3*. Una vez aplicada, se obtiene un volumen total de agregados $V_{\text{AGREGADOS}} = 0.68\text{m}^3$.

$$V_{\text{AGREGADOS}} = 1\text{m}^3 - V_{\text{AIRE}} - V_{\text{AGUA}} - V_{\text{CEMENTO}}$$

Ecuación 3

Consecuentemente, por medio de la *Ecuación 4*, se obtiene la masa total de los agregados según el tipo de mezcla. Una vez obtenido este valor y conociendo las proporciones de los agregados (en porcentaje)... Véase numeral 5.4.9..., se estima la masa de cada uno de los agregados por separado, incluyendo la limalla. Finalmente, teniendo en cuenta que por medio de las pruebas físicas realizadas a los materiales se obtuvo el peso específico de cada uno de ellos, se procede a calcular el volumen de cada agregado y limalla respectivamente, necesarios para producir 1m³ de concreto (Véase *Tabla 22. Estimación de las proporciones de agregados para la producción de 1m³ de concreto – Cálculos tipo*).

$$MT_{AGREGADOS} = \frac{VT_{AGREGADOS}}{\frac{\%_{grueso}}{\gamma_{grueso}} + \frac{\%_{fino}}{\gamma_{fino}} + \frac{\%_{limalla}}{\gamma_{limalla}}}$$

Ecuación 4

Dónde: **MT:** Masa total en kg.
VT: Volumen total en m³.
γ: Masa unitaria en kg/m³.

Tabla 22. Estimación de las proporciones de agregados para la producción de 1m³ de concreto – Cálculos tipo

Vol. agregados =	0,6798 m3
------------------	-----------

Mezcla	Grueso	Fino	Limalla	Peso (Kg)	Peso Grueso (Kg)	Peso Fino (Kg)	Peso Limalla (Kg)	Vol. Grueso (m ³)	Vol. Fino (m ³)	Vol. Limalla (m ³)	Vol. Total (m ³)
1	70%	27%	3%	1790,755	1253,528	483,504	53,723	0,484	0,187	0,0091	0,6798
2	65%	32%	3%	1790,755	1163,991	573,042	53,723	0,449	0,221	0,0091	0,6798
3	60%	37%	3%	1790,755	1074,453	662,579	53,723	0,415	0,256	0,0091	0,6798
4	55%	42%	3%	1790,755	984,915	752,117	53,723	0,380	0,290	0,0091	0,6798
5	50%	47%	3%	1790,755	895,377	841,655	53,723	0,346	0,325	0,0091	0,6798

γ _{grueso} =	2590 kg/m3
γ _{fino} =	2590 kg/m3
γ _{limalla} =	5890 kg/m3

Fuente: MIC. Claudia Patricia Retamoso Llamas. Hoja de cálculo para Diseño de Mezcla. 2010.

5.4.10 Corrección por humedad y absorción de agregados. Durante el proceso de estimación de agua de mezclado, se asume que los agregados se encuentran en la condición saturada con superficie seca (SSS). Sin embargo, en condiciones de trabajo normales (in situ)^{*} es de esperar que el grado de humedad en los

^{*} En el sitio.

materiales varíe respecto a las condiciones climáticas y las características propias de los mismos (porosidad y capilaridad, entre otras); es claro que, condiciones como las de secado total o como la SSS, se alcanzan (y se estiman) únicamente por medio de procedimientos de laboratorio. Por tanto los agregados siempre tendrán un exceso de agua (agua libre), o por el contrario un defecto de ésta; dependiendo cual sea la situación, el exceso o defecto deberá sumarse o restarse, respectivamente según convenga, a la cantidad de agua de mezclado.

Con el fin de determinar la cantidad de agua sobrante (exceso) o faltante (defecto), se utiliza la *Ecuación 5* propuesta por Sánchez de Guzmán⁴⁰.

$$A = M(H \pm Abs)$$

Ecuación 5

Dónde: **A:** Agua en exceso o defecto respecto a la condición SSS.
M: Masa de la muestra seca.
H: Humedad del agregado en tanto por uno
Abs.: Absorción del agregado en tanto por uno.

Tabla 23. Cálculo tipo, ajuste de agua Diseño de Mezcla

(H ± Abs)	
Agua Grueso	-0,07%
Agua Fino	5,30%
Agua Limalla	0,46%

% Limalla = 3%					
Mezcla	Masa Agua (Grueso)	Masa Agua (Fino)	Masa Agua (Limalla)	Masa Agregados	Masa Agua Ajustada
1	-0,88	25,63	0,2471	24,995	169,605
2	-0,81	30,37	0,2471	29,804	164,796
3	-0,75	35,12	0,2471	34,612	159,988
4	-0,69	39,86	0,2471	39,420	155,180
5	-0,63	44,61	0,2471	44,228	150,372
M (H ± Abs)					

Fuente: MIC. Claudia Patricia Retamoso Llamas. Hoja de cálculo para Diseño de Mezcla. 2010.

Por medio de la *Tabla 23. Cálculo tipo, ajuste de agua Diseño de Mezcla*, se puede observar el ajuste de agua que se realizó para cada porcentaje de limalla respectivamente.

⁴⁰ INSTITUTO DEL CONCRETO. Tecnología y propiedades. 2 ed. Bogotá D.C.: Asocreto, 1997. p 203.

Finalmente, como en los pasos anteriores se estimaron las densidades y volúmenes para cada uno de los agregados, teniendo en cuenta las correcciones necesarias, se procede a la estimación de la masa de cada uno de los agregados, necesaria para producir un metro cúbico (1m³) de concreto. Para el agregado grueso, fino y la limalla; como el material húmedo pesa más que el seco, la corrección se realiza por medio de la *Ecuación 6*⁴¹. Con el fin de ilustrar el procedimiento descrito anteriormente, se presenta la *Tabla 24. Cálculo tipo, masa de materiales necesaria para la producción de 1m³ de concreto*.

$$M_h = M(1 + H)$$

Ecuación 6

Dónde: **M_h**: Masa corregida del material húmedo.
M: Masa del material seco.
H: Contenido de humedad en tanto por uno.

Tabla 24. Cálculo tipo, masa de materiales necesaria para la producción de 1m³ de concreto

Mezcla 1		Limalla= 3%	
Materiales	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol. (m3)
Aire	--	--	0,015
Agua	169,60	1000	0,195
Cemento	335,52	3033,33	0,111
Agregado Grueso	1261,30	2590	0,484
Agregado Fino	522,14	2590	0,187
Limalla	54,05	5890	0,009
Total	2342,61	--	1,00

Fuente: MIC. Claudia Patricia Retamoso Llamas. Hoja de cálculo para Diseño de Mezcla. 2010.

Una vez estimadas las cantidades de agregados, para cada uno de los porcentajes de limalla que se trabajan en este proyecto, se debe calcular las cantidades necesarias para producir un cilindro testigo según las medias ($\phi=15\text{cm}$, $h=30\text{cm}$, aprox.), en realidad es una operación sencilla pues con una relación directa respecto a las cantidades necesarias para producir 1m³ de concreto, se obtienen dichas cantidades (Véase *Tabla 25. Cantidades para la producción de un cilindro de concreto, $\phi=15\text{cm}$, $h=30\text{cm}$. Cálculo tipo*).

⁴¹ INSTITUTO DEL CONCRETO. Tecnología y propiedades. 2 ed. Bogotá D.C.: Asocreto, 1997. p 204.

Tabla 25. Cantidades para la producción de un cilindro de concreto, $\phi=15\text{cm}$, $h=30\text{cm}$. Cálculo tipo

Cantidad Cilindros	Limalla= 3%					
	Mezcla	1	2	3	4	5
	Materiales	Masa (kg)				
1	Aire	0	0	0	0	0
	Agua	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80
	Cemento	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31
	Agregado Grueso	8,69	8,07	7,45	6,83	6,21
	Agregado Fino	3,60	4,26	4,93	5,60	6,26
	Limalla	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
	Total	15,88	15,90	15,92	15,94	15,96

Fuente: Propia

5.5 ELABORACIÓN DE MUESTRAS

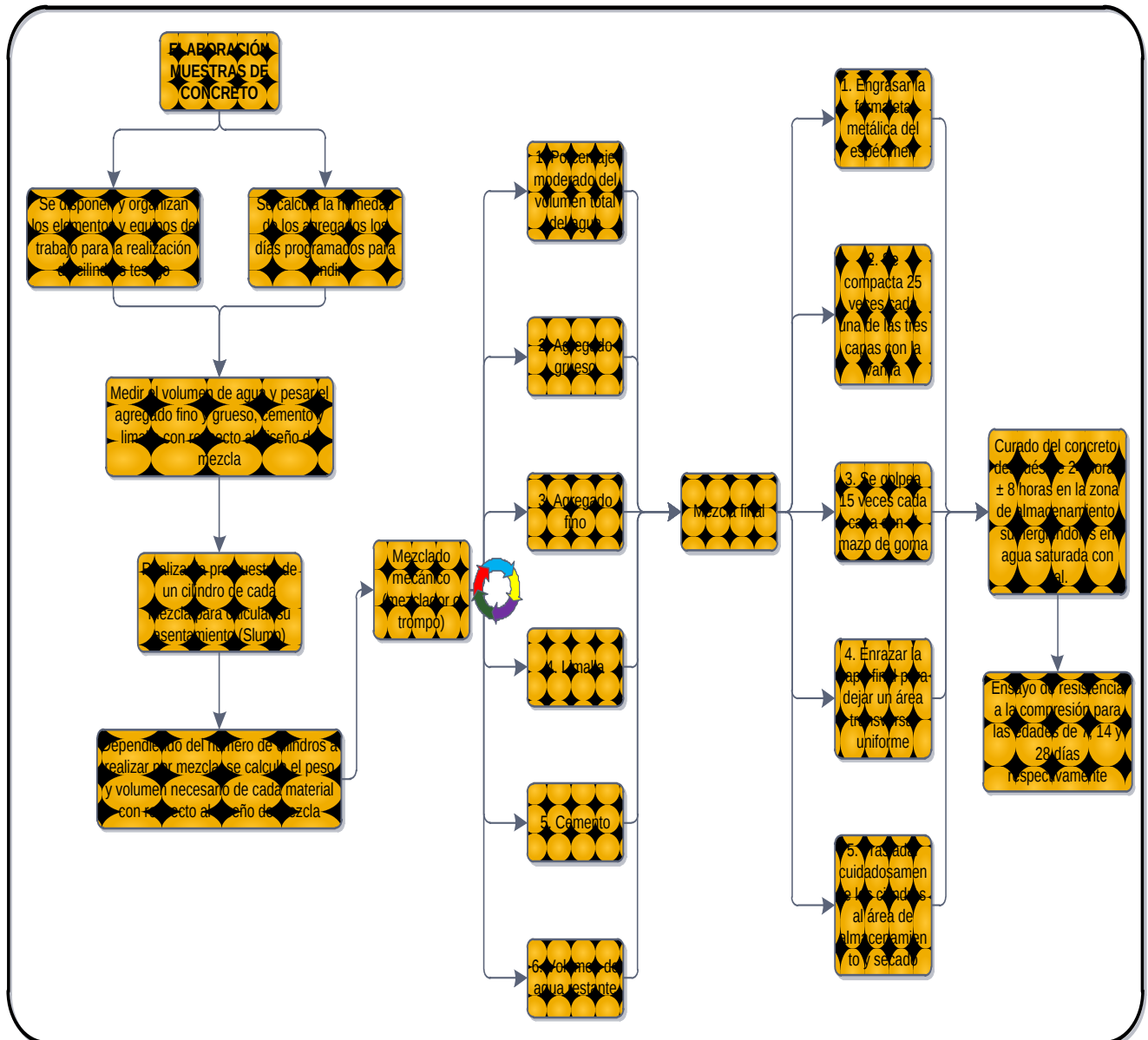
Este procedimiento se lleva a cabo siguiendo los parámetros establecidos por la norma NTC 1377 (ASTM C192), para facilitar su comprensión, se representa por medio de la *Figura 20. Metodología para la elaboración de especímenes de concreto*.

Figura 19. Proceso de elaboración y curado de cilindros de concreto



Fuente: Propia

Figura 20. Metodología para la elaboración de especímenes de concreto



Fuente: Propia

5.6 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

5.6.1 Determinación de la masa unitaria de los cilindros de concreto. Al terminar el proceso de elaboración y curado de los especímenes de concreto, se procede a estimar las dimensiones de cada uno de ellos (se debe medir el diámetro " ϕ ", la altura " h " y la masa " m ", teniendo en cuenta la correspondencia

entre unidades); es de aclarar las dimensiones de los cilindros se deben medir posteriormente a un proceso en el cual los cilindros se han dejado secar por un tiempo mínimo de 1 hora. Finalmente, se registran estas dimensiones para de realizar un próximo cálculo que comprenda el volumen y la masa de los cilindros, con el fin de estimar la masa unitaria de los mismos.

5.6.2 Ensayo de compresión y determinación del módulo de elasticidad. Consecuentemente, se elabora el ensayo para determinar la resistencia máxima a la compresión (f'_c) de cada una de las muestras destinadas para tal fin (para edades de 7, 14 y 28 día respectivamente). Este procedimiento se lleva a cabo siguiendo la norma NTC 673. Por otra parte, se estima el valor del módulo de elasticidad (E) para cada uno de los cilindros testigo, por medio de los procedimientos descritos en la norma NTC 4025...Véase numeral 4.7.15 y 4.7.16...

Finalmente, se registran los valores de resistencia máxima y módulo de elasticidad estático para cada uno de los especímenes, con el fin de realizar el análisis respectivo de los mismos.

Figura 21. Determinación de las propiedades del concreto endurecido



Fuente: Propia

6. RESULTADOS

La resistencia máxima a la compresión (f'_c), es uno de los factores más influyentes en aras de un buen diseño respecto a los diferentes tipos de estructura donde el concreto es el componente fundamental. Con el transcurrir del tiempo, por medio de diferentes procesos, se ha buscado mejorar las características de resistencia de dicho compuesto, de tal forma que permita disminuir el uso de cemento, y por ende la explotación exagerada de recursos naturales, a través de la adición de materiales no convencionales en las mezclas de concreto.

Por medio de la ejecución de este trabajo, se ha podido evidenciar la variación de la resistencia a la compresión del concreto ante la adición de limalla (residuo de acero proveniente de procesos industriales) en porcentajes diferentes. Por otra parte, también se ha logrado caracterizar, por medio de ensayos de laboratorio estandarizados, los materiales utilizados en la fabricación de las mezclas de concreto involucradas en la ejecución de este proyecto, y por consiguiente, estimar las proporciones óptimas de los mismos, con el fin de obtener el diseño de mezcla que garantice la mayor resistencia a la compresión del concreto (entre las mezclas ensayadas). En base a lo anterior, se presentan los resultados obtenidos según el orden de ejecución de los diferentes ensayos.

6.1 FASE PRELIMINAR “PREMUESTRA”

Durante esta fase se elaboran 120 cilindros testigo, con el fin de disminuir el grado de incertidumbre en cuanto al comportamiento de las mezclas de concreto ante la adición de limalla, de manera que en la fase de ejecución de los ensayos definitivos se trabaje en un rango dentro del cual se encuentre el porcentaje óptimo de adición de la misma.

La proporción de agregados para la elaboración de cilindros, respecto a las diferentes mezclas, se estima por medio del procedimiento descrito en el numeral 5.2.1. Finalmente, se registran los resultados de la resistencia a la compresión obtenidos para las diferentes mezclas durante esta fase... Véase ANEXO A...

6.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Como se había mencionado anteriormente, los agregados utilizados para la elaboración de las mezclas de concreto, propias de la ejecución del presente trabajo, son provenientes de dos fuentes naturales, “Bocas” en el caso de la arena y “Pescadero”, de donde se extrajo el triturado... Véase numeral 5.3... Estos son sometidos a una serie de ensayos con el fin de estimar sus principales características físicas o químicas, según convenga, para establecer finalmente un

criterio de aceptación respecto al uso de los mismos en la producción de mezclas de concreto. Por lo tanto, se presenta el resumen de los resultados obtenidos para cada ensayo (Véase Tabla 26. Resultados de los ensayos de laboratorio para caracterización de materiales).

Tabla 26. Resultados de los ensayos de laboratorio para caracterización de materiales

ENSAYO			RESULTADO				NORMATIVIDAD VIGENTE	
			MUESTRA			Promedio.	INVIAS	CORRESPONDE
			1	2	3			
Humedad natural	Agregado fino		7,04%	7,95%	8,97%	7,99%	--	NTC 1776-94
	Agregado grueso		0,38%	0,14%	1,35%	0,62%		
Humedad natural de la limalla			0,58%	0,61%	0,63%	0,61%	--	--
Densidad del cemento hidráulico (g/cm³)			3,02	3,05	3,03	3,03	INVE-307-07	ASTM C188-09, NTC 221-99
Densidad de la limalla (g/cm³)			5,9	5,83	5,94	5,89	--	--
Gravedad específica y absorción de agregados finos (23/23°C)	Aparente (g/cm³)		2,64	2,51	2,62	2,59	INVE-222-07	ASTM C128-07a, NTC 237-95
	Bulk S.S.S. (g/cm³)		2,49	2,46	2,5	2,48		
	Bulk (g/cm³)		2,41	2,42	2,43	2,42		
	Absorción		3,63%	1,40%	3,04%	2,69%		
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos (23/23°C)	Aparente (g/cm³)		2,57	2,61	2,58	2,59	INVE-223-07	ASTM C127-07, NTC 176-95
	Bulk S.S.S. (g/cm³)		2,55	2,58	2,56	2,56		
	Bulk (g/cm³)		2,53	2,56	2,54	2,54		
	Absorción		0,62%	0,84%	0,62%	0,69%		
Masa unitaria (g/cm3) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos.	Agregado fino	Suelta	1,41	1,39	1,41	1,40	INVE-217-07	ASTM C29M-09, NTC 92-95
		Compacta	1,52	1,58	1,57	1,56		
		Vacíos MUC	37,19%	34,71%	35,12%	35,67%		
	Agregado grueso	Suelta	1,49	1,53	1,51	1,51		
		Compacta	1,58	1,65	1,60	1,61		
		Vacíos MUC	37,80%	35,04%	37,01%	36,62%		
Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados	Agregado fino		1,86%	2,02%	1,68%	1,85%	INVE-211-07	ASTM C142-97 NTC 589-00
	Agregado grueso		0,10%	0,15%	0,19%	0,15%		
Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos (Color de referencia según placa orgánica)			2	2	2	2	INVE-212-07	ASTM C-40-04, NTC 127-00
Resistencia. al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles	Gradación "B", Carga abrasiva : 11 esferas (% de desgaste)		24,71%	25,69%	25,55%	25,32%	INVE-218-07	ASTM C131-06, NTC93-95 y NTC98-95
Equivalente de arena de suelos y agregados finos			87,80%	89,61%	92,50%	89,97%	INVE-133-07	ASTM D2419-09
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados			64,66%	65,52%	64,70%	64,96%	INVE-227-07	ASTM D5821-01
Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados.	Índice de aplanamiento		10,74%				INVE-230-07	ASTM D4791-05
	Índice de alargamiento		18,05%					

Fuente: Propia

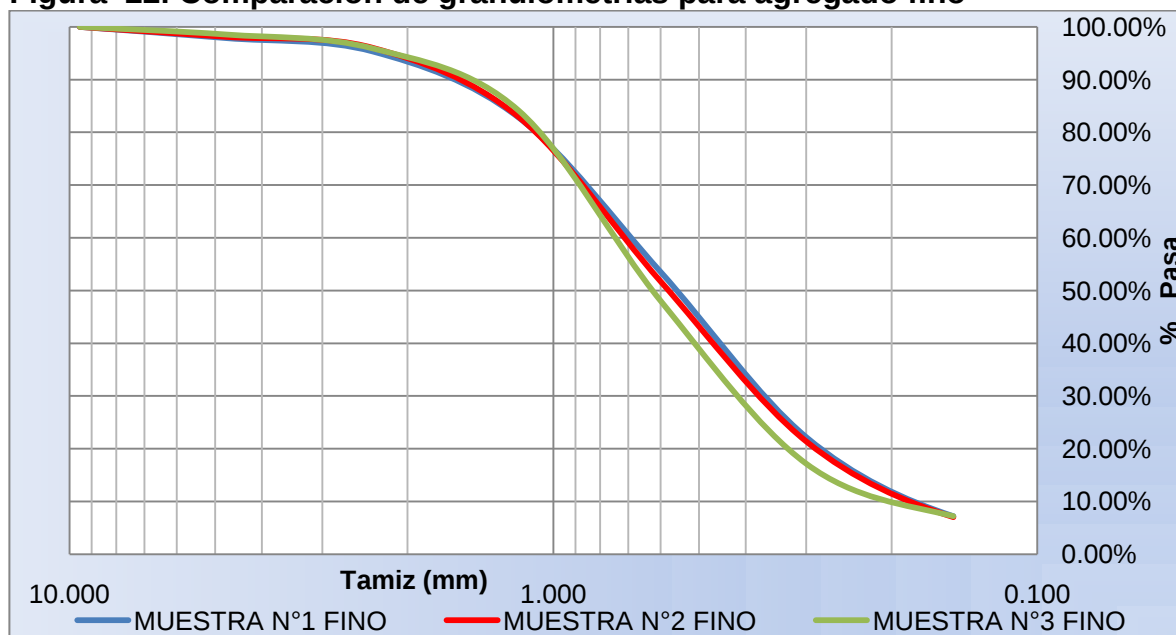
6.2.1 Análisis granulométrico de los agregados. Por medio de este ensayo se determinan, además de la distribución cuantitativa de partículas según su tamaño, factores importantes como el tamaño máximo (TM), tamaño máximo nominal (TMN), la cantidad de finos (material que pasa el tamiz N°200 “75µm”) y el módulo de finura, que influyen directamente en la proporción de agregados para la producción de mezclas de concreto... Véase numeral 4.7.2... Por consiguiente, se registran a continuación los respectivos resultados, ordenados según el tipo de agregado (fino y grueso respectivamente).

Tabla 27. Resumen granulométrico para agregado fino

MUESTRA N°		1		2		3	
M ₀ =		2800,0 g		3000,0 g		3000,0 g	
M ₁ =		2691,30 g		2890,70 g		2894,38 g	
Tamiz	Tamiz (mm)	% Retenido Acumulado	%Pasa	% Retenido Acumulado	%Pasa	% Retenido Acumulado	%Pasa
3/8"	9,525	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%
N° 4	4,750	2,11%	97,89%	1,88%	98,12%	1,44%	98,56%
N° 8	2,360	4,67%	95,33%	3,98%	96,02%	4,09%	95,91%
N° 16	1,180	17,18%	82,82%	17,07%	82,93%	15,86%	84,14%
N° 30	0,600	46,47%	53,53%	48,28%	51,72%	51,97%	48,03%
N° 50	0,300	77,80%	22,20%	78,62%	21,38%	82,86%	17,14%
N° 100	0,149	92,78%	7,22%	92,96%	7,04%	92,80%	7,20%
N° 200	0,075	96,01%	3,99%	96,20%	3,80%	96,24%	3,76%
Fondo	0,000	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%

Fuente: Propia

Figura 22. Comparación de granulometrías para agregado fino



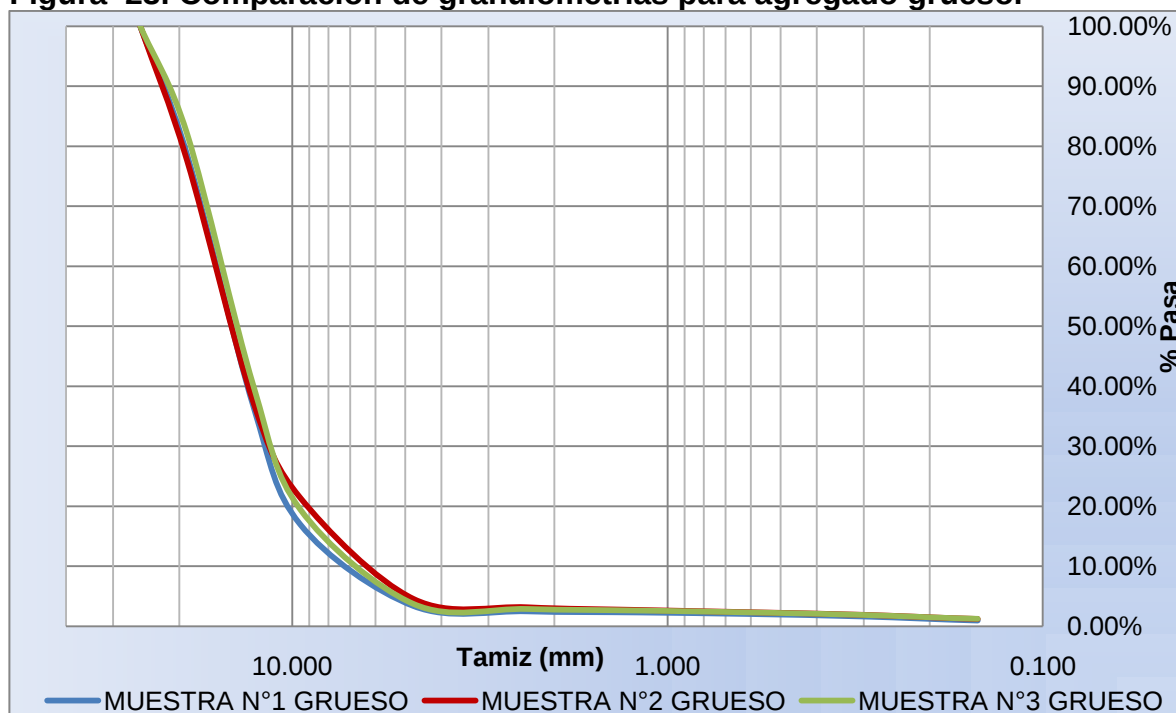
Fuente: Propia

Tabla 28. Resumen granulométrico para agregado grueso

MUESTRA N°		1		2		3	
M ₀ =		3160,0 g		2870,0 g		3352,50 g	
M ₁ =		3142,0 g		2846,50 g		3324,40 g	
Tamiz	Tamiz (mm)	% Retenido Acumulado	%Pasa	% Retenido Acumulado	%Pasa	% Retenido Acumulado	%Pasa
1"	25,400	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,050	21,43%	78,57%	22,43%	77,57%	17,94%	82,06%
1/2"	12,700	63,26%	36,74%	62,62%	37,38%	59,84%	40,16%
3/8"	9,525	82,99%	17,01%	78,58%	21,42%	80,52%	19,48%
N° 4	4,750	96,62%	3,38%	95,47%	4,53%	96,30%	3,70%
N° 8	2,360	97,50%	2,50%	96,86%	3,14%	97,15%	2,85%
N° 16	1,180	97,69%	2,31%	97,32%	2,68%	97,41%	2,59%
N° 30	0,600	97,95%	2,05%	97,69%	2,31%	97,72%	2,28%
N° 50	0,300	98,36%	1,64%	98,13%	1,87%	98,14%	1,86%
N° 100	0,149	99,04%	0,96%	98,81%	1,19%	98,79%	1,21%
N° 200	0,075	99,39%	0,61%	99,14%	0,86%	99,11%	0,89%
Fondo	0,000	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%

Fuente: Propia

Figura 23. Comparación de granulometrías para agregado grueso.



Fuente: Propia

Tabla 29. Estimación del TM, TMN y Modulo de Finura.

DESCRIPCIÓN		MUESTRA						TOTAL	
		1		2		3			
Tamaño Máximo	TM	1"	25,4mm	1"	25,4mm	1"	25,4mm	1"	25,4mm
Tamaño Máximo Nominal	TMN	1"	25,4mm	1"	25,4mm	1"	25,4mm	1"	25,4mm
Módulo de Finura	Mf	2,41		2,43		2,49		2,44	

Fuente: Propia

6.3 DISEÑO DE MEZCLA

Por medio este diseño, se estiman las cantidades relativas de agregados bajo condiciones de seguridad, técnicas y de factibilidad económica, necesarias para producir un 1m³ concreto adicionado con limalla, que satisfaga sus requerimientos particulares de uso... Véase ANEXO C...

6.4 RESULTADOS DE PRUEBAS DEL CONCRETO

Dentro de las pruebas realizadas al concreto, en estado fresco y endurecido respectivamente, se encuentran, la estimación del asentamiento con el fin de verificarlo respecto al valor de diseño y realizar los ajustes necesarios a la mezcla, el peso unitario de las mezclas de concreto, la resistencia a la compresión máxima de cada una de las muestras –teniendo en cuenta edades del concreto de 7, 14 y 28 días– y el módulo de elasticidad de las diferentes mezclas... Véase ANEXO D...

Tabla 30. Resumen consolidado de pruebas del concreto

Limalla	Mezcla N°	7 DÍAS			14 DÍAS			28 DÍAS			
		Δ (cm)	Peso Esp. (kg/m ³)	f _{C^{PROM}} (MPa)	Δ (cm)*	Peso Esp. (kg/m ³)	f _{C^{PROM}} (MPa)	Δ (cm)*	Peso Esp. (kg/m ³)	f _{C^{PROM}} (MPa)	E _{PROM} (MPa)
3%	1	10,10	2501,10	15,35	10,30	2451,83	19,43	10,30	2439,96	22,02	9975,51
	2	9,10	2460,28	17,29	10,10	2416,99	20,45	9,70	2455,28	25,17	11192,17
	3	9,60	2451,28	18,38	8,50	2374,11	20,68	10,00	2457,46	27,16	11418,37
	4	10,80	2409,91	16,88	9,40	2367,09	19,14	8,20	2420,77	26,89	9869,64
	5	9,90	2394,31	13,58	9,90	2386,49	16,84	10,10	2427,99	23,21	11229,40
4%	1	10,00	2450,89	17,95	10,50	2445,74	20,10	9,60	2496,50	29,12	11748,05
	2	9,60	2454,01	19,32	10,00	2432,29	22,27	10,20	2462,54	30,47	12263,84
	3	9,80	2412,84	17,68	9,90	2434,07	21,76	10,90	2452,05	29,34	11603,76
	4	9,70	2413,66	17,03	10,10	2415,71	19,85	10,00	2414,44	27,02	11095,90
	5	9,90	2406,96	13,33	9,00	2418,10	19,24	10,20	2399,60	24,63	11078,95
5%	1	10,30	2456,82	17,93	9,00	2446,74	20,81	10,30	2486,81	23,06	10149,46
	2	10,10	2431,95	19,12	9,70	2410,29	21,54	10,00	2485,24	28,81	12012,26
	3	10,00	2422,06	17,94	9,80	2418,05	21,45	9,90	2426,14	28,63	10802,13

Continuación tabla 30.

5%	4	9,80	2404,23	17,51	10,00	2440,73	20,73	10,70	2451,68	28,06	12304,95
	5	9,70	2377,13	14,10	11,00	2401,30	18,61	9,50	2422,24	25,06	11201,33
0%	1	9,30	2436,94	16,67	10,00	2426,83	18,67	9,80	2433,10	21,39	12394,92
	2	9,50	2414,74	17,02	10,60	2382,31	19,03	10,40	2412,04	22,17	11854,50
	3	8,90	2383,89	14,13	9,90	2393,99	18,21	10,10	2412,05	19,95	11267,44
	4	10,40	2393,11	12,54	9,50	2406,37	16,53	9,70	2358,54	18,87	9876,81
	5	9,50	2330,36	12,41	10,00	2368,30	14,25	10,10	2345,22	17,31	10339,99

Fuente: propia

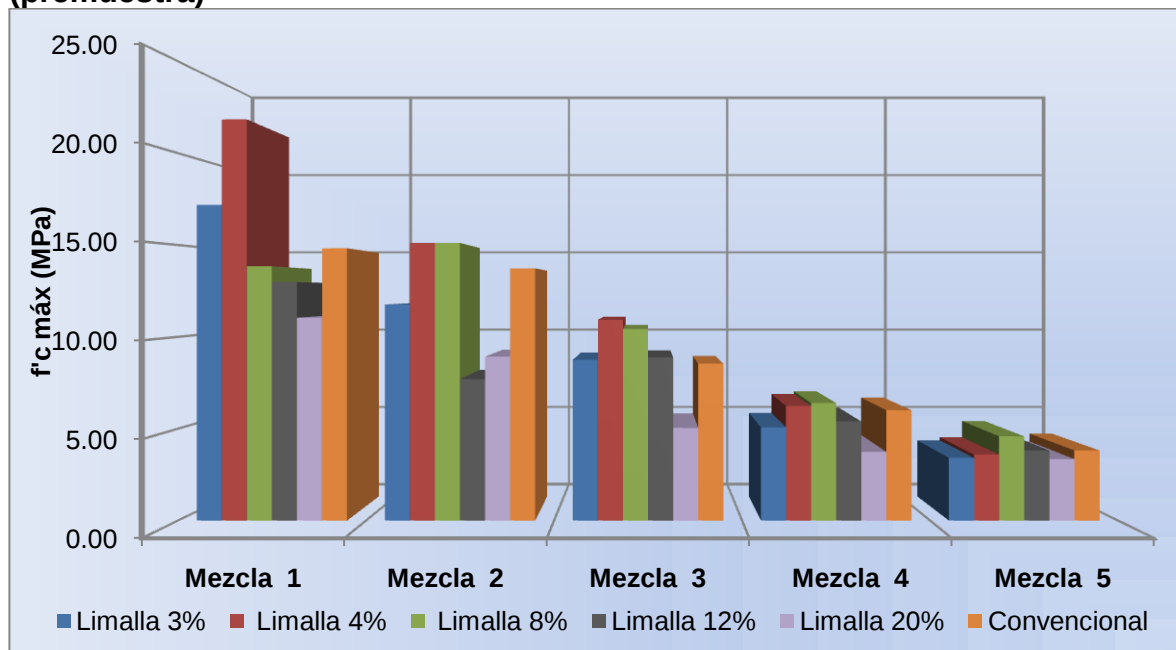
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Factores como la seguridad, las especificaciones técnicas y la factibilidad económica, son el principal interés del presente estudio con el fin de dar hincapié a la producción de mezclas de concreto adicionadas con limalla. En el capítulo anterior se registraron los resultados de los diferentes ensayos relacionados con la producción de dichas mezclas, por lo tanto, en este capítulo se realiza un examen de éstos, verificando que se ajusten a los requerimientos mínimos establecidos por los organismos de normalización nacional e internacional y tendiendo hacia la estimación del contenido óptimo de limalla.

7.1 FASE PRELIMINAR (PREMUESTRA)

Teniendo en cuenta la resistencia máxima a la compresión para cada una de las mezclas evaluadas durante esta fase, se puede evidenciar que el porcentaje de adición de limalla, el cual proporciona la mayor resistencia ante las demás adiciones, corresponde al 4%. Por lo tanto, se espera que el porcentaje óptimo de limalla obtenido al final de este estudio, se encuentre cercano a dicho valor (Véase *Figura 24. Comparación de la resistencia a la compresión a los 28 días (premuestra)*)

Figura 24. Comparación de la resistencia a la compresión a los 28 días (premuestra)



Fuente: Propia

Analizando los resultados obtenidos durante esta fase, se evidencia una variabilidad considerable de la resistencia máxima a la compresión de las muestras convencionales, de las cuales se esperaba un comportamiento similar. Lo anterior se atribuye a diversos factores como la dosificación de materiales sin realizar un diseño de mezcla previo, la falta de control de la calidad de los mismos y la falta de los ajustes en la cantidad de agua de mezclado. No obstante, al tratarse de una fase experimental, se requiere únicamente analizar cuál de los porcentajes de limalla adicionados presenta el mejor comportamiento, y de tal manera definir un rango de adiciones de limalla, dentro del cual se encuentre el porcentaje óptimo, disminuyendo el grado de incertidumbre dentro de la ejecución de pruebas definitivas y estandarizadas durante la fase a seguir. Por lo tanto, dicho rango debe estar entre 3% y 8% de adición de limalla.

7.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Dentro de los resultados de los ensayos realizados a cada uno de los materiales, se encuentran ciertos valores rutinarios que simplemente describen una característica del mismo, pero son necesarios para el diseño de mezcla; sin embargo hay otros a los cuales es necesario realizar una comparación respecto a la normatividad establecida para la elaboración de mezclas de concreto, con el fin de realizar los ajustes necesarios y garantizar la calidad de los materiales y por ende la de dichas mezclas (Véase Tabla 31. *Requisitos de los ensayos de caracterización de materiales*)

Tabla 31. Requisitos de los ensayos de caracterización de materiales

ENSAYO		RESULTADO	REQUISITO	REFERENCIA
Densidad del cemento hidráulico (g/cm ³)		3,03	3,10 - 3,15	Sánchez de Guzmán ⁴²
Absorción de agregados finos (23/23°C)		2,69%	4% Máx	INV, ART. 630-07*
Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados	Agregado fino	1,85%	3,0% Máx	NTC 174-00
	Agregado grueso	0,15%	0,25% Máx	INV, ART. 630-07
Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos (Color de referencia según placa orgánica)		2	3 Máx	INV, ART. 630-07
Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles	Gradación "B", Carga abrasiva : 11 esferas (% de desgaste)	25,32%	40% Máx	INV, ART. 630-07

⁴² SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 5 ed. Bogotá D.C.: Bhandar editores LTDA., 2001. p. 41

* Artículos de las especificaciones de las normas INVIAS

Continuación tabla 31.

Equivalente de arena de suelos y agregados finos		89,97%	60% Min	INV, ART. 630-07
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados		64,96%	60% Min	INV, ART. 500-07
Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados.	Índice de aplanamiento	10,74%	25% Máx	INV, ART. 630-07
	Índice de alargamiento	18,05%	25% Máx	

Fuente: propia.

7.2.1 Análisis granulométrico de los agregados. Es importante destacar en este punto que la granulometría de los agregados afecta directamente factores de la mezcla como la trabajabilidad, bombeabilidad, contracción, economía, durabilidad entre otros. Por ejemplo, el uso de arenas muy finas puede elevar los costos pues presentan un costo elevado respecto a otros tipos de arena, por otra parte, si se usan arenas muy gruesas, se producen mezclas ásperas y no operables.

Por medio de los requisitos granulométricos para agregados gruesos y finos establecidos por la norma NTC 174 y registrados en la Tabla 20 y Tabla 21 respectivamente...Véase numeral 5.4.8... se evidencia que los agregados utilizados para la ejecución de los ensayos, cumplen a cabalidad con dicha especificación, y por tanto garantizan una distribución tal que proporcione un alto grado de confiabilidad de los materiales respecto a los factores mencionados anteriormente (Véase Figura 25. Requisito granulométrico para agregado fino y

Figura 26. Requisito granulométrico para agregado grueso)

Figura 25. Requisito granulométrico para agregado fino

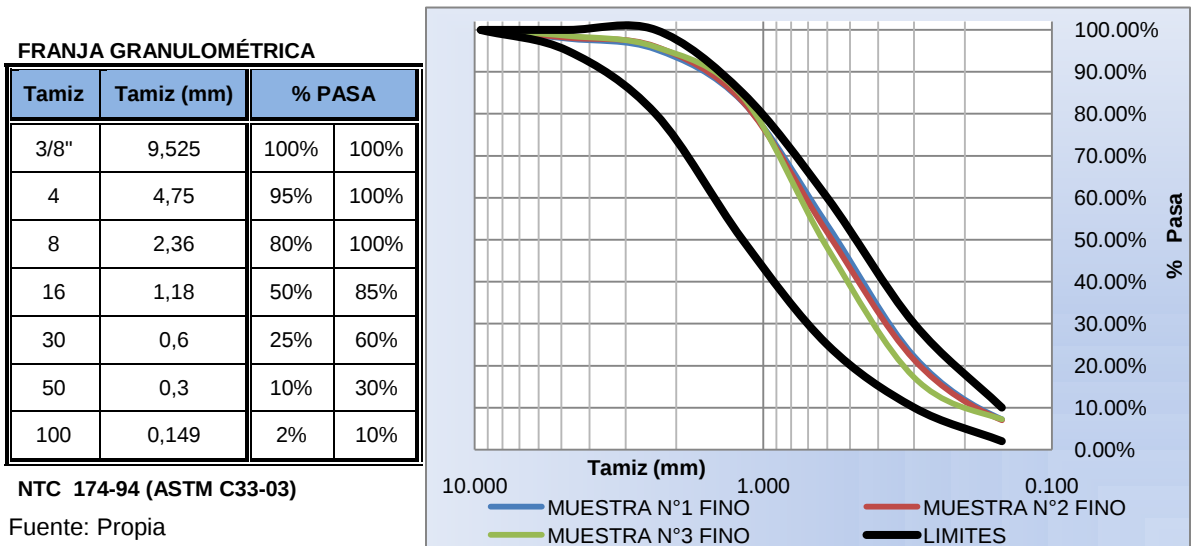
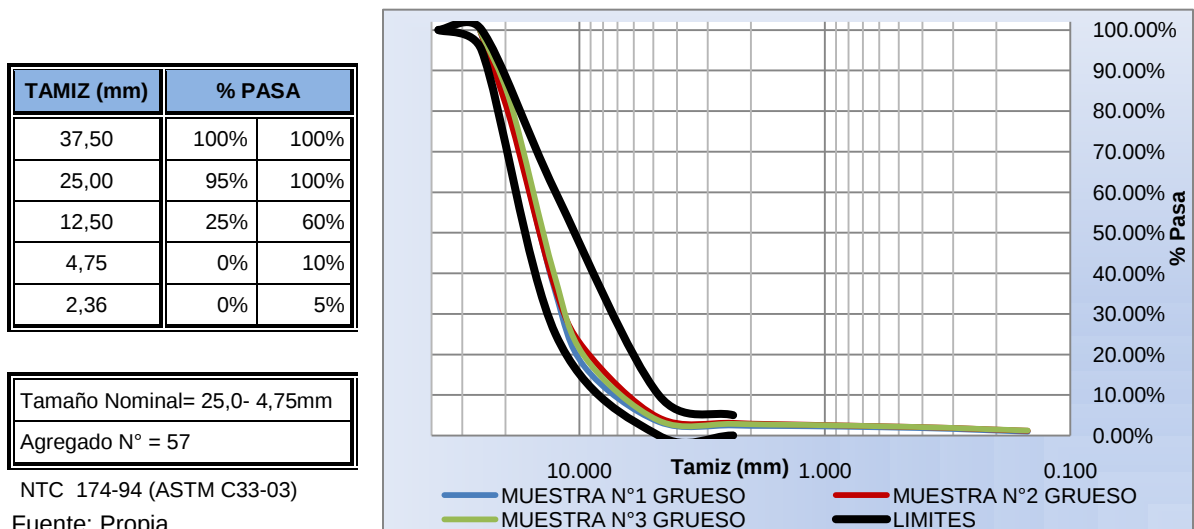


Figura 26. Requisito granulométrico para agregado grueso



Consecuentemente, según los resultados de gradación obtenidos y registrados en la *Tabla 29*, se evidencia un tamaño máximo nominal “TMN” y un tamaño máximo “TM” del agregado igual a 1” respectivamente; lo anterior describe un agregado de tipo muy común en el mercado y de fácil acceso. Por otra parte, tanto el agregado grueso como el agregado fino cumplen satisfactoriamente con los requerimientos respecto al contenido máximo de material que pasa el tamiz NTC 75 μ m, pues al comparar el resultado obtenido en cada muestra de agregado fino ningún valor supera el 5% establecido por la norma, e igualmente en el agregado grueso puesto que ninguna muestra contiene más del 1% de material que pasa dicho tamiz.

Finalmente, teniendo en cuenta el módulo de finura estimado en la misma tabla (MF=2,44), se evidencia que dicho valor se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la norma NTC 174 (no menor de 2,3 ni mayor de 3,1) y por tanto se puede concluir que el agregado fino se define como una arena de finura media.

7.2.2 Densidad del cemento hidráulico. El ingeniero Diego Sánchez de Guzmán, estipula dos rangos para la densidad del cemento, uno de 3,10 g/cm³ a 3,15 g/cm³ cuando es un cemento portland en condiciones normales sin adiciones distintas al yeso y el otro de 3,00 g/cm³ a 3,10 g/cm³ con adiciones.

La densidad obtenida en el proyecto fue de 3,03 g/cm³ (Véase *Tabla 31. Requisitos de los ensayos de caracterización de materiales*) que entra en el segundo rango de densidad, es decir, es un cemento con adiciones. No obstante la densidad del cemento puede variar con respecto a otras marcas distribuidoras

de cemento, en este caso HOLCIM provee su cemento con este peso específico por razones internas. Aun así la densidad del cemento no es un indicador clave de su calidad, pero si puede proporcionar casi que con seguridad, el contenido de adiciones en el mismo.

7.2.3 Absorción de los agregados. Según la *Tabla 31*, se evidencia una capacidad de absorción del agregado fino de 2,69% el cual se encuentra dentro de la especificación, la cual reglamenta un valor máximo de 4% para la producción de mezclas de concreto estructural; es importante que la magnitud de este aspecto se encuentre dentro de los valores establecidos puesto que la absorción es tal vez el parámetro que más influye en la consistencia del concreto, además, a mayor absorción se incrementa de manera directa la porosidad y por ende la aparición de fisuras en el concreto endurecido.

En el caso del agregado grueso, las especificaciones no estipulan ningún rango de aceptación, pues es evidente que la absorción es menor respecto al agregado fino, debido a que la superficie específica es mayor para las arenas. Empero, la estimación de este parámetro adquiere su aplicación directa en el ajuste para la estimación de agua de mezclado.

7.2.4 Partículas delezables de los agregados. La determinación de este factor es de vital importancia para determinar las partículas que pueden afectar de manera perjudicial al concreto, que al estar presentes en el hormigón pueden disminuir la resistencia del mismo o su durabilidad (en casos de estar expuestos a la abrasión).

Con respecto al resultado obtenido y el requisito estipulado en la ASTM C-33, el agregado fino no presenta estas partículas nocivas por encima del porcentaje permisible que desmejoran la resistencia del concreto, de igual forma, se analiza lo mismo para el agregado grueso.

Especificar los resultados obtenidos de este ensayo son de suma importancia para determinar una mezcla de concreto, que después de endurecida no sea afectada por los porcentajes altos de dichas partículas que afectan las características físicas importantes de cualquier tipo de concreto (resistencia y durabilidad).

7.2.5 Contenido aproximado de materia orgánica. Teniendo como referencia los colores de la placa orgánica y los parámetros establecidos en la norma ASTM-C-40-04, la cual considera que el agregado fino contiene componentes orgánicos posiblemente perjudiciales, cuando el color de la solución es más oscuro que el color normal de referencia o que la placa orgánica No.3 (Ámbar). En particular, se evidencia que el agregado fino utilizado en el ensayo registra una buena calidad

en cuanto a la medición del parámetro en cuestión, pues el color que presenta la mezcla después del ensayo corresponde a la placa orgánica N°2 (Amarillo oscuro), ubicándose por debajo del valor máximo establecido. La estimación de este parámetro es importante puesto que la presencia de altos contenidos de materia orgánica en los agregados, puede ocasionar alteraciones negativas en aspectos directos de la fabricación de mezclas de concreto como es la hidratación del cemento y el fenómeno de retracción y fraguado de la mezcla.

Se aclara que el ensayo describe el método para determinar las porciones de materia orgánica no visible adheridas a las partículas del agregado, por lo tanto es necesario remover previamente del mismo las porciones de material perjudicial, que pueden ser fácilmente detectadas, como ramas o raíces.

7.2.6 Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles. La dureza de los agregados es importante para la realización de concretos sometidos al desgaste por abrasión, estos deben de ser duros para dar resultados óptimos al usarlos como elementos sometidos a este desgaste.

Este ensayo es una manera indirecta para determinar esta propiedad; el requisito exigido es de un 40% máximo con el cual se puede determinar si los resultados obtenidos cumplen o no con lo estipulado. Este agregado cumplió con lo exigido, donde se analiza su tranquilo uso en los concretos sujetos a abrasión excesiva y constante.

7.2.7 Equivalente de arena de suelos y agregados finos. Por medio del Artículo 630-07 de las especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías, se establece un equivalente de arena mínimo (60%) para producción de concreto estructural, parámetro el cual es superado en un 50% por el resultado obtenido para el agregado fino utilizado en el ensayo (89,97%). Por lo tanto, el agregado fino garantiza, de manera satisfactoria, una limitación del contenido de finos arcillosos (perjudiciales) dentro de los parámetros admisibles.

7.2.8 Caras fracturadas. Es primordial que los agregados a utilizar sean partículas angulosas y con textura superficial tal, que ofrezcan un entramamiento y mayor fricción para aumentar la resistencia del concreto. Aunque este ensayo es sencillo, resulta algo complicado la clasificación de las partículas del material en fracturadas, ya que en algunas de estas no se presentaba a simple vista este fenómeno.

Las caras fracturadas de los agregados son importantes, debido a que su incidencia en la resistencia del concreto es fundamental. El agregado grueso demostró estar por encima del requisito exigido por las especificaciones, teniendo

en cuenta que este ensayo es subjetivo, su resultado puede ser variable, aunque se realizó con extrema sutileza para evitar incertidumbre visual.

7.2.9 Índice de aplanamiento y alargamiento. Los índices de aplanamiento y alargamiento sirven como estimativo en cierto modo de la calidad de un agregado. Las partículas planas y alargadas son problemáticas debido a su poca durabilidad, además pueden provocar disminución en la trabajabilidad ya que muy fácilmente pueden orientarse de manera preferencial en un solo plano (de manera que el agua y el espacio poroso pueden acumularse debajo de ellas) y dificultan la labor de compactación por su entramamiento pobre. Lo requerido para el concreto es un 25% máximo, donde el agregado grueso muestra menos de la mitad de lo requerido, por ende, es satisfactorio ya que previene los efectos anteriormente descritos en el hormigón.

7.3 DISEÑO DE MEZCLA

La metodología del diseño de mezcla y los valores obtenidos se respaldan por medio del comité ACI 211, por lo tanto no es relevante realizar algún tipo de análisis al procedimiento y las proporciones estimadas respecto al volumen y masa total de agregados, cemento y la cantidad de agua de mezclado con sus respectivos ajustes. Sin embargo, el diseño adquiere un grado de incertidumbre desde el momento en que se establecen las proporciones de adición de limalla, pues al no existir una especificación para determinarlas –siendo este el objetivo principal del trabajo– se hace necesario estimarlas de manera experimental y comprobar, por medio de ensayos, el comportamiento de las mezclas ante los diferentes porcentajes de adiciones.

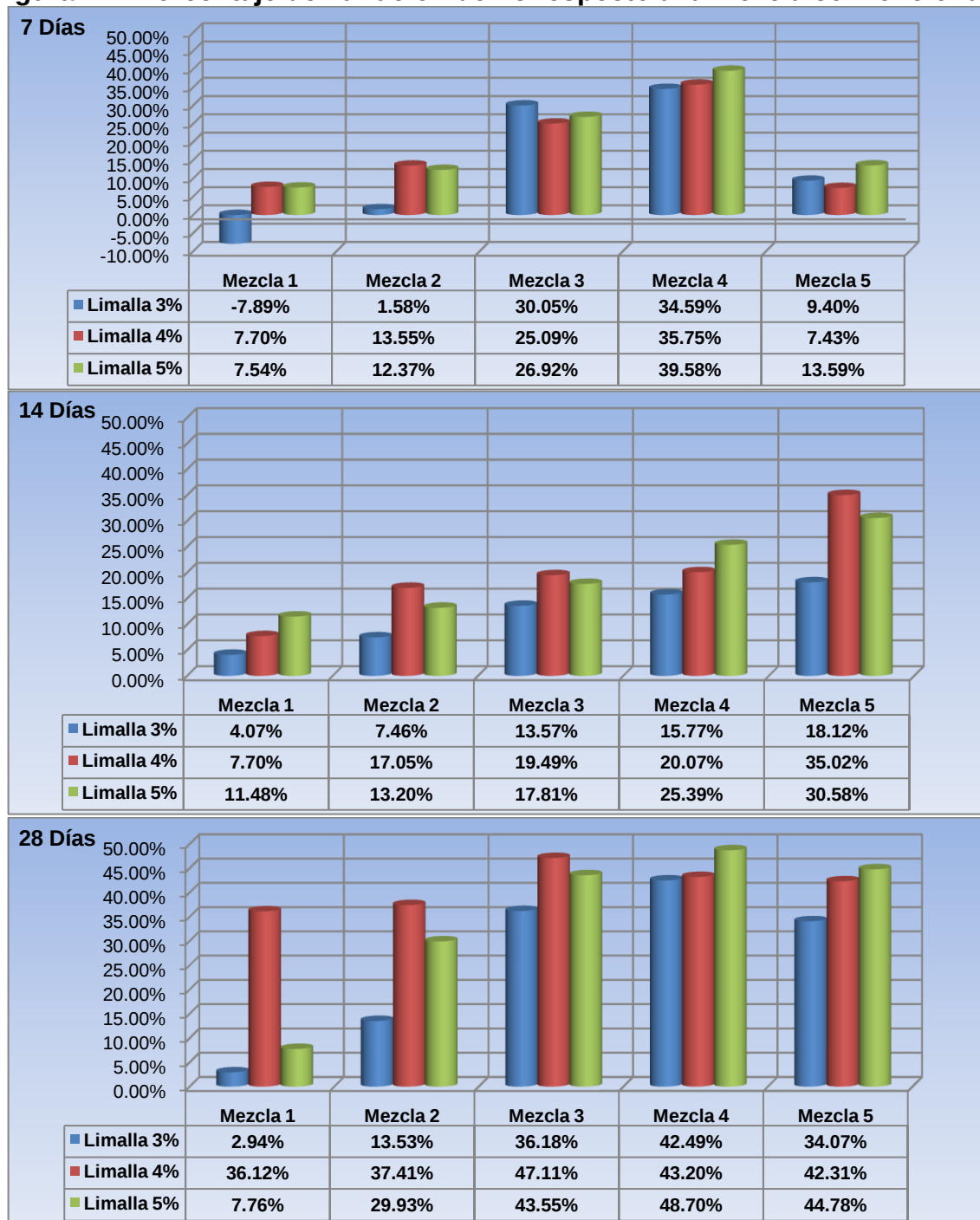
Por otra parte, debido a los cambios diarios respecto a la humedad de los agregados, se hace necesario realizar los ajustes del agua de mezclado siempre que se proceda a elaborar las mezclas de concreto, pues el valor de la humedad no permanece constante, a no ser que el agregado se encuentre totalmente seco, estado el cual se alcanza únicamente por medio del laboratorio.

7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS DEL CONCRETO

Los resultados de las pruebas de compresión ejecutadas a los especímenes elaborados, son tal vez el punto de mayor interés del presente estudio, pues al comparar los resultados de las muestras adicionadas con limalla, con las muestras convencionales de concreto, se espera que las primeras describan una mayor resistencia ante la aplicación de esfuerzos de compresión.

Por tanto, se requiere analizar el porcentaje de variación de dicha resistencia para cada tipo de mezcla con adición de limalla respecto a la mezcla convencional correspondiente, es decir de proporciones similares pero en ausencia del material adicionado (Véase ANEXO E).

Figura 27. Porcentaje de variación de f'_c respecto a la mezcla convencional.

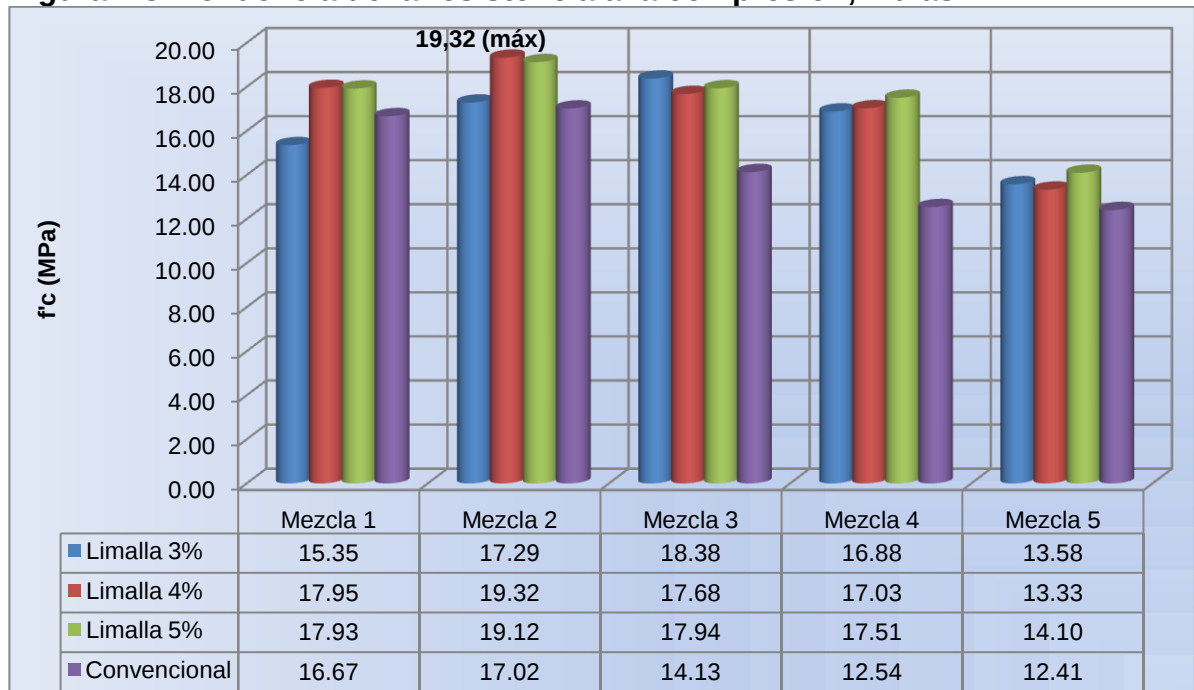


Fuente: Propia

7.4.1 Resistencia a la compresión del concreto, 7 días. Al analizar los resultados obtenidos para esta edad del concreto, se evidencia un valor máximo de resistencia a la compresión de 19,32 MPa, correspondiente a la mezcla dos (M2) con porcentaje de adición de limalla de 4%, superando a la mezcla convencional correspondiente en 13.55% de la resistencia alcanzada por esta, y en más del 50% a la resistencia a la compresión teórica según la edad ($0.6f'_c$).

Por otra parte, se observa una aumento máximo de la resistencia en la mezcla cuatro (M4) con 5% de adición de limalla, de 39,58% respecto a la mezcla convencional correspondiente, y una disminución de -7,89% (valor más crítico) en la mezcla uno (M1) con 3% de adición respecto a la mezcla convencional.

Figura 28. Tendencia de la resistencia a la compresión, 7 días



Fuente: Propia

En cuanto al grado de control en la producción del concreto, con base en los valores de la *Tabla 32* y teniendo en cuenta los valores de desviación estándar para cada una de las mezclas, el grado de control es “Muy Bueno” puesto que más del 90% de las desviaciones se encuentra por debajo de 1,7MPa. Sin embargo, al tener en cuenta el coeficiente de variación, el mismo grado de control se hace aceptable, empero, acorde con el número de muestras elaboradas para cada mezcla según el porcentaje de adición, el coeficiente de variación carece de

importancia y se puede establecer como grado de control de producción definitivo “Muy bueno”.

La tendencia de la resistencia en cada una de las mezclas según el porcentaje de adición de limalla se puede evidenciar gráficamente por medio de la *Figura 28*.

Tabla 32. Normas para el control del concreto

PRODUCCIÓN GENERAL-VARIACIÓN TOTAL					
Clase de Operación	Desviación estándar para diferentes grados de control en kg/cm ² (Coeficiente de variación para diferentes grados de control en %)				
	Excelente	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en campo	Menor de 25 (Menor de 10)	25 - 35 (-)	35 - 40 (10 - 15)	40 - 50 (15 - 20)	Mayor de 50 (Mayor de 20)
Mezclas de prueba de laboratorio	Menor de 15 (Menor de 5)	15 - 17 (-)	17 - 20 (5 - 7)	20 - 25 (7 - 10)	Mayor de 25 (Mayor de 10)

Fuente: Adaptado de COMITÉ ACI-704. Control de calidad del concreto.

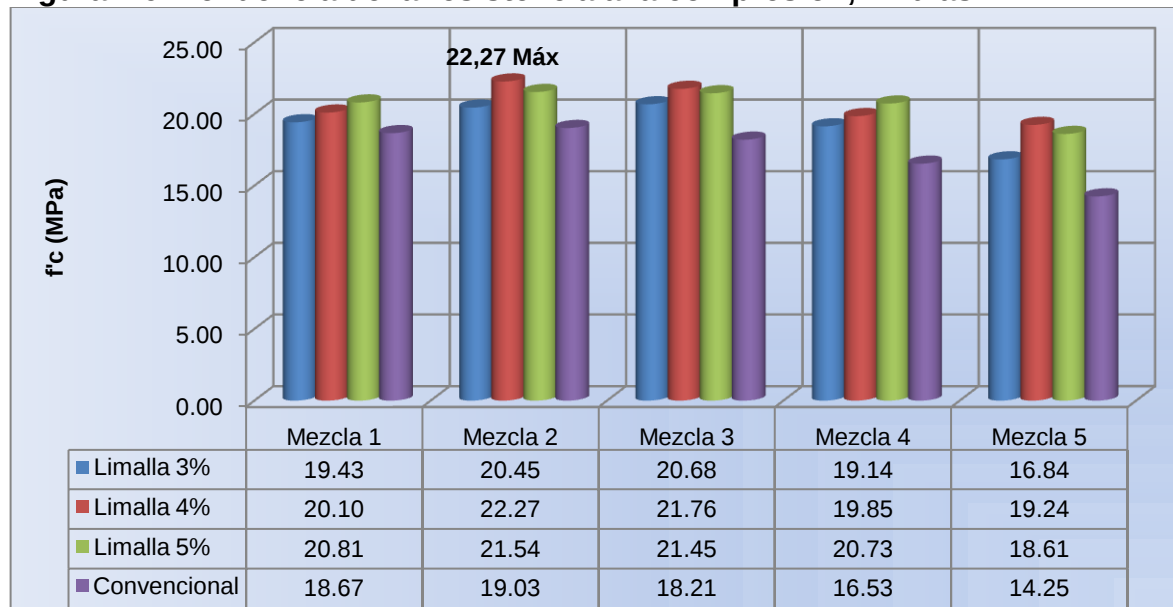
7.4.2 Resistencia a la compresión del concreto, 14 días. Al analizar los resultados obtenidos para esta edad del concreto, se evidencia un valor máximo de resistencia a la compresión de 22.27 MPa, correspondiente a la mezcla dos (M2) con porcentaje de adición de limalla de 4%, superando a la mezcla convencional correspondiente en 17.05% de la resistencia alcanzada por esta, y en más del 30% a la resistencia a la compresión teórica según la edad (0.8f_c).

Por otra parte, se observa un aumento máximo de la resistencia en la mezcla cinco (M5) con 4% de adición de limalla, de 35.02% respecto a la mezcla convencional correspondiente, en general se presenta un aumento de la resistencia en todas las mezclas adicionadas respecto a las convencionales.

En cuanto al grado de control en la producción del concreto, con base en los valores de la *Tabla 32* y teniendo en cuenta los valores de desviación estándar para cada una de las mezclas, el grado de control es “Bueno” puesto que más del 90% de las desviaciones se encuentra por debajo de 2 MPa. Sin embargo, al tener en cuenta el coeficiente de variación, el mismo grado de control se hace aceptable, empero, acorde con el número de muestras elaboradas para cada mezcla según el porcentaje de adición, el coeficiente de variación carece de importancia y se puede establecer como grado definitivo de control de producción “Bueno”.

La tendencia de la resistencia en cada una de las mezclas según el porcentaje de adición de limalla se puede evidenciar gráficamente por medio de la *Figura 29*.

Figura 29. Tendencia de la resistencia a la compresión, 14 días



Fuente: Propia

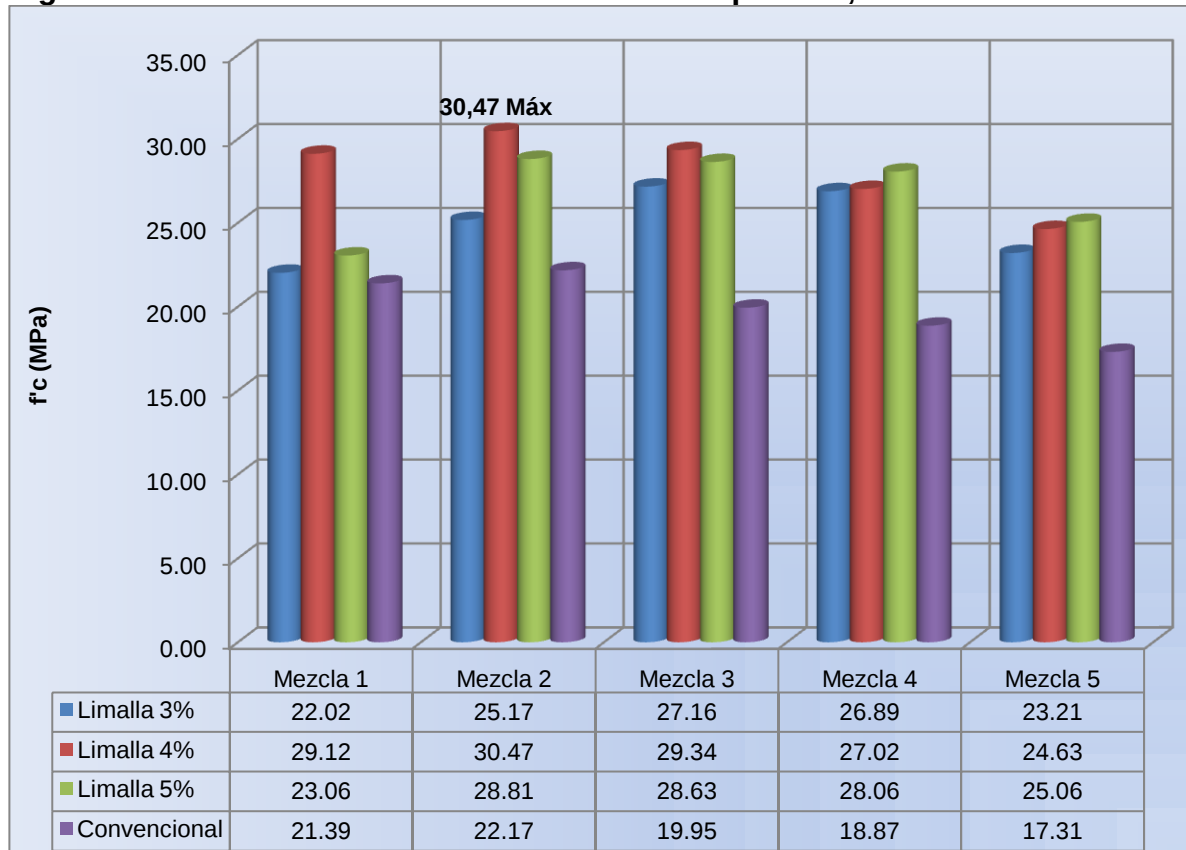
7.4.3 Resistencia a la compresión del concreto, 28 días. Al analizar los resultados obtenidos para esta edad del concreto, se evidencia un valor máximo de resistencia a la compresión de 30.47 MPa, correspondiente a la mezcla dos (M2) con porcentaje de adición de limalla de 4%, superando a la mezcla convencional correspondiente en 37.41% de la resistencia alcanzada por esta, y en más del 45% a la resistencia a la compresión de diseño (f'_c).

Por otra parte, se observa un aumento máximo de la resistencia en la mezcla cuatro (M4) con 5% de adición de limalla, de 48,7% respecto a la mezcla convencional correspondiente, en general se presenta un aumento de la resistencia en todas las mezclas adicionadas respecto las convencionales.

En cuanto al grado de control en la producción del concreto, con base en los valores de la *Tabla 32* y teniendo en cuenta los valores de desviación estándar para cada una de las mezclas, el grado de control es “Bueno” puesto que más del 75% de las desviaciones se encuentra por debajo de 2 MPa. Sin embargo, al tener en cuenta el coeficiente de variación, el mismo grado de control se hace aceptable, empero, acorde con el número de muestras elaboradas para cada mezcla según el porcentaje de adición, el coeficiente de variación carece de importancia y prevalece el factor estipulado por la desviación estándar, por ende se puede establecer como grado definitivo de control de producción “Bueno”.

La tendencia de la resistencia en cada una de las mezclas según el porcentaje de adición de limalla se puede evidenciar gráficamente por medio de la *Figura 30*.

Figura 30. Tendencia de la resistencia a la compresión, 28 días



Fuente: Propia

7.5 PESO UNITARIO DEL CONCRETO

Teniendo en cuenta los resultados de peso unitario en estado endurecido para cada una de las mezclas de ensayo, para edades de 7, 14 y 28 días respectivamente, se evidencia que más del 90% de las muestras se encuentran dentro del rango establecido para mezclas de concreto normal presentando una variación menor a 3% en la totalidad de las muestras... Véase numeral 4.1.3 y ANEXO D...

Ante adiciones no mayores al 5% de limalla, el peso unitario de éste tipo de concreto no difiere de manera significativa respecto al concreto convencional. Por lo tanto el peso (masa) de una estructura construida con concreto adicionado será igual o similar al peso de una estructura construida en concreto convencional.

7.6 ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS MUESTRAS.

Haciendo una comparación del módulo de elasticidad de cada una de las mezclas con el módulo de elasticidad obtenido por medio de la *Ecuación 7*⁴³ se evidencia que en la totalidad de las mezclas relativas al proyecto se disminuye este valor en más del 40% con respecto a la norma sismo resistente del 2010 (NSR10)... Véase *Tabla 33 y Figura 31*...

Tabla 33. Comparación del módulo de elasticidad obtenido con los esperados por medio de ecuaciones teóricas propuestas.

Limalla	Mezcla	E1 (MPa)*	E2 (MPa)**	E3 (MPa)***
3%	1	9975,51	22170,02	8844,42
	2	11192,17	23519,11	9382,62
	3	11418,37	24308,94	9697,71
	4	9869,64	24277,08	9685,01
	5	11229,4	23089,14	9211,09
4%	1	11748,05	25266,41	10079,69
	2	12263,84	25827,58	10303,56
	3	11603,76	25232,73	10066,25
	4	11095,9	23948,25	9553,82
	5	11078,95	23036,45	9190,07
5%	1	10149,46	21787,19	8691,7
	2	12012,26	25182,46	10046,19
	3	10802,13	25058,31	9996,67
	4	12304,95	24639,75	9829,69
	5	11201,33	23410,96	9339,48
0%	1	12394,92	21403,52	8538,64
	2	11854,5	22269,87	8884,26
	3	11267,44	21041,41	8394,18
	4	9876,81	20421,31	8146,8
	5	10339,99	19623,45	7828,5

* E1: Módulo de elasticidad obtenido en el proyecto

** E2: Módulo de elasticidad esperado con la Ecuación 7 (NSR-10)

*** E3: Módulo de elasticidad esperado con la Ecuación 8 (Porrás Álvarez y Torrado Gómez)

Fuente: Propia

⁴³ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10. Bogotá D.C.: El ministerio, 2010. p364.

$$E_c = 4700\sqrt{f'c}$$

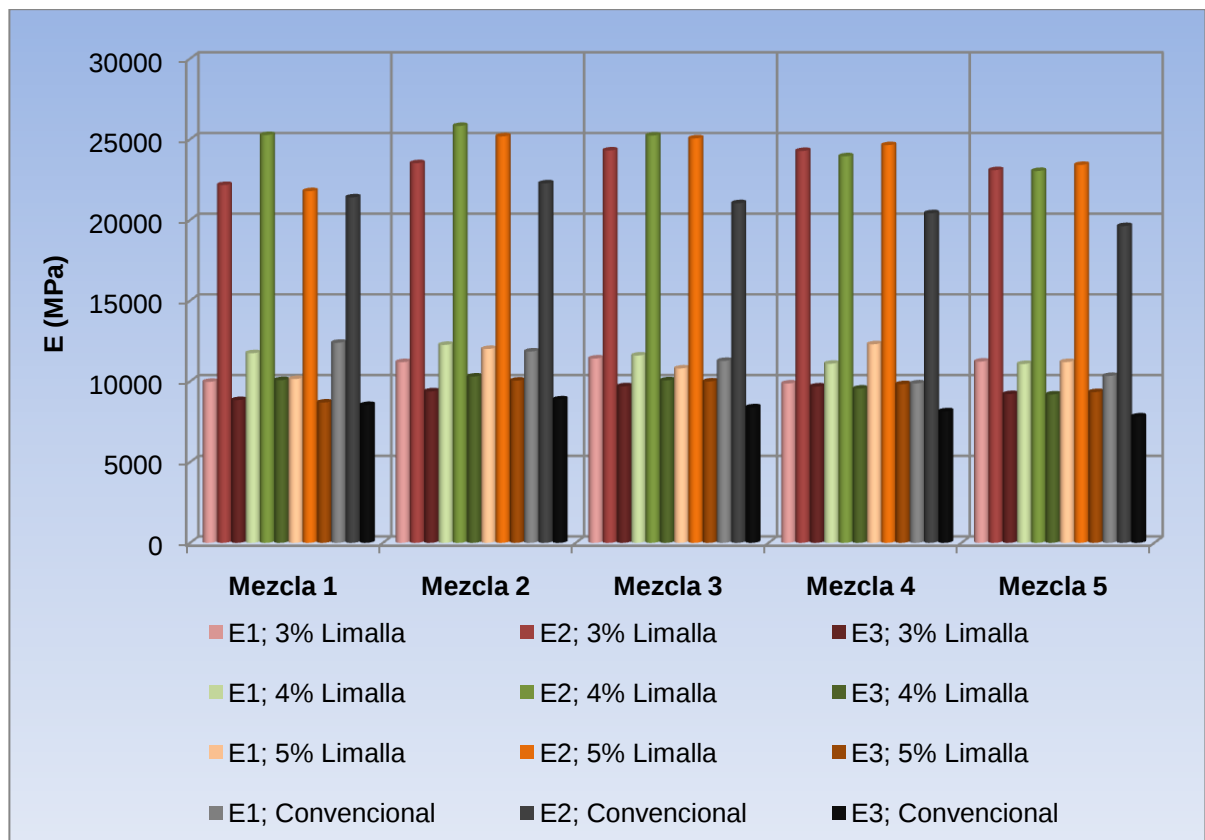
Ecuación 7

$$E_c = 1875\sqrt{f'c}$$

Ecuación 8

Dónde: **E_c**= Módulo de elasticidad estático del concreto (MPa).
f'c= Resistencia a la compresión del concreto (MPa).

Figura 31. Variación del módulo de elasticidad obtenido respecto a los valores esperados.



* E1: Módulo de elasticidad obtenido en el proyecto

** E2: Módulo de elasticidad esperado con la Ecuación 7 (NSR-10)

** E3: Módulo de elasticidad esperado con la Ecuación 8 (Porrás Álvarez y Torrado Gómez)

Fuente: Propia

Por otra parte, al analizar la variabilidad del módulo de elasticidad obtenido para las mezclas del proyecto respecto a los valores calculados por medio de la *Ecuación 8*, obtenida de manera experimental por medio de un estudio realizado anteriormente en la región⁴⁴ (por parte de la Universidad Pontificia Bolivariana), se observa que en la totalidad de las mezclas aumenta dicho valor, es decir, el 100% de los valores del módulo de elasticidad obtenido en el proyecto, se encuentra por encima del estimado por medio de la ecuación mencionada; por ende se garantizaría el uso de concreto adicionado con limalla en la mayoría de las estructuras ...Véase ANEXO F...

Sin embargo, teniendo en cuenta la contrariedad de los resultados, se hace necesario realizar estudios complementarios tendientes a estimar la variación del módulo de elasticidad en la región.

7.7 FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO.

La factibilidad de cualquier tipo de proyecto está ligada directamente en los costos de los materiales presupuestados para su ejecución. Como explica el profesor Miranda⁴⁵ en su obra de gestión de proyectos, los objetivos de cualquier estudio de factibilidad se pueden resumir en la verificación de la existencia de un mercado potencial o de una necesidad no satisfecha, la demostración de la viabilidad y disponibilidad de los recursos materiales, humanos, administrativos y financieros, y la corroboración de las ventajas desde el punto de vista financiero, económico, social o ambiental de asignar recursos hacia la producción de un bien o la prestación de un servicio.

Por consiguiente, ante un mercado potencial demandado por la industria de la construcción, respecto al uso de mezclas de concreto, este proyecto está encaminado hacia los tres objetivos mencionados anteriormente. Por lo tanto se presenta a continuación un análisis económico resumido.

Analizando el precio total para la fabricación de un metro cúbico (1m³) de concreto adicionado con el porcentaje óptimo de limalla se evidencia una disminución cercana al 8% de los costos de producción respecto a la mezcla convencional de características similares. Además se observa que presenta mayor relevancia la disminución de la cantidad de cemento respecto a la disminución de agregados planteada en un principio, sin embargo, los resultados obtenidos garantizan la viabilidad de la producción de mezclas con adición de limadura de acero.

⁴⁴ PORRAS ÁLVAREZ, Natalia Andrea y TORRADO GÓMEZ, Luz Marina. Determinación de las ecuaciones del módulo de elasticidad estático y dinámico del concreto producido en Bucaramanga y su área metropolitana. Bucaramanga, 2009, p98. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. Escuela de Ingenierías.

⁴⁵ MIRANDA MIRANDA, Juan José. Gestión de proyectos: evaluación financiera económica social ambiental. 6 ed. Bogotá D.C.: MM editores, 2010. p. 14-15.

Tabla 34. Precios unitarios para mezclas de concreto producido en obra

ÍTEM	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (\$/kg)
AGUA	lt	\$ 20,00
CEMENTO BOYACÁ	kg	\$ 356,00
AGREGADO GRUESO	m ³	\$ 60000,00
AGREGADO FINO	m ³	\$ 42000,00
LIMALLA	kg	\$ 300,00
MEZCLADORA	día	\$ 55100,00
AYUDANTE ALBAÑILERÍA	hh*	\$ 5183,00
OFICIAL ALBAÑILERÍA	hh	\$ 9468,00

Fuente**

Tabla 35. Análisis de precio unitario para 1 m³ de concreto con limalla producido en obra

MEZCLA 2 - LIMALLA 4% (f'c =30,47 MPa)				
ÍTEM	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Aire	---	---	\$----	\$----
Agua	lt	195	\$ 20,00	\$ 3.900,00
Cemento gris	kg	335,52	\$ 356,00	\$ 119.445,12
Agregado grueso	m ³	0,452	\$ 60000,00	\$ 27.120,00
Agregado fino	m ³	0,216	\$ 42000,00	\$ 9.072,00
Limalla	kg	72,48	\$ 300,00	\$ 21.744,00
Mezcladora	día	0,06	\$ 55100,00	\$ 3.306,00
Ayudante albañilería	hh	2	\$ 5183,00	\$ 10.366,00
Oficial albañilería	hh	0,5	\$ 9468,00	\$ 4.734,00
			TOTAL=	\$ 199.687,12

Fuente: propia

* Horas hombre.

** Promedio de precios de diferentes ferreterías de la región.

Tabla 36. Análisis de precio unitario para 1 m³ de concreto convencional producido en obra

CONVENCIONAL COMERCIAL (f'c= 30,47 MPa)				
ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Aire				
Agua	lt	195	\$ 20,00	\$ 3.900,00
Cemento gris	kg	452,56	\$ 356,00	\$ 161.111,36
Agregado grueso	m ³	0,417	\$ 60000,00	\$ 25.020,00
Agregado fino	m ³	0,224	\$ 42000,00	\$ 9.408,00
Limalla	kg	0	\$ 300,00	\$ 0,00
Mezcladora	día	0,06	\$ 55100,00	\$ 3.306,00
Ayudante albañilería	hh	2	\$ 5183,00	\$ 10.366,00
Oficial albañilería	hh	0,5	\$ 9468,00	\$ 4.734,00
			TOTAL=	\$ 217.845,36

Fuente: propia

8. CONCLUSIONES

De manera general, se concluye por medio de la ejecución de este trabajo que la adición de limalla a las mezclas convencionales de concreto, proporciona un aumento significativo de la resistencia a la compresión del mismo. La máxima resistencia se logra adicionando **4% de limalla** respecto al peso de la mezcla y haciendo uso de la proporción óptima de agregados, la cual consta de **65%** de agregado grueso (**grava**), **31%** de agregado fino (**arena**) y el porcentaje de limadura anteriormente mencionado, proporciones correspondientes a la mezcla número dos (**M2**) del respectivo diseño de mezcla. Por ende, se garantizan resultados óptimos con el uso de residuos industriales (limalla) no biodegradables y altamente perjudiciales con el medio ambiente, en la fabricación de mezclas de concreto, se mitigan los efectos negativos que surgen de la mala disposición de dicho residuo y se reduce de cierta manera la explotación desconsiderada de recursos naturales tendientes a la obtención de agregados pétreos y material cementante.

Se realizaron las pruebas físico-mecánicas tendientes a la caracterización de los materiales utilizados en la producción de las diferentes mezclas de concreto, los resultados obtenidos permiten deducir que la calidad de éstos, en general es excelente, debido a que se encuentran dentro de los parámetros establecidos por los organismos de normatividad nacional e internacional. Por lo tanto, se garantiza que el uso (controlado por medio de un diseño previo) de estos materiales proporciona una buena calidad respecto a factores físicos y mecánicos de las mezclas producidas.

Por medio de los procedimientos establecidos por las diferentes normas, se elaboraron 285 especímenes de concreto distribuidos en porcentajes de adición de limalla de 3%, 4%, 5% y 0% respectivamente y se realizaron las pruebas pertinentes del concreto en estado fresco y endurecido para edades de 7, 14 y 28 días. De tal manera se logró evidenciar el comportamiento de las diferentes mezclas frente a los factores mencionados.

Se determinó que más del 90% de las mezclas adicionadas con limalla presentan un aumento de la resistencia a la compresión respecto a las mezclas convencionales correspondientes. En el mejor de los casos, este aumento fue del 48.7% para la mezcla número cuatro (M4) con adición de limalla del 5%. Para el caso de la máxima resistencia alcanzada a los 28 días, el aumento de ésta respecto a la mezcla convencional fue de 37.41% logrado por medio de la mezcla número dos (M2) con adición de limalla del 4%. Se considera que la adición de

limalla es viable en aras de aumentar la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto.

El grado de control en la producción de las mezclas de concreto, en general es bueno puesto que en la mayoría de los casos la desviación estándar se encuentra por debajo de 2 MPa. Se evidenció que este grado no puede ser estimado teniendo en cuenta el coeficiente de variación debido a que éste proporciona un grado de confiabilidad bajo respecto al número de muestras correspondientes a cada mezcla.

Según el análisis de la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días, se pudo estimar que el porcentaje óptimo de adición de limalla, respecto a los demás porcentajes trabajados durante este estudio, corresponde al **4%** puesto que proporcionó un valor máximo de resistencia equivalente a 30,47MPa comparado con un esfuerzo de 22,17MPa resistido por la mezcla convencional correspondiente. Además, con la adición de dicho porcentaje en proporciones correspondientes a la mezcla número dos (M2), se logró un comportamiento de la resistencia similar al de las mezclas convencionales de concreto -establecido teóricamente ($0,6f'_c$; $0,8f'_c$ y f'_c para 7, 14 y 28 días respectivamente).

Respecto a las características físicas del concreto adicionado con limalla, teniendo en cuenta el porcentaje óptimo de dicha adición, se concluye que este residuo no afecta negativamente ninguna de estas, pues en el caso de la operabilidad, trabajabilidad y consistencia de la mezcla, relacionadas directamente por medio de la absorción de los materiales, se presenta un comportamiento igual que con las mezclas convencionales debido a que la limalla presenta una absorción casi nula. De manera consecuente, se determinó que el peso específico para mezclas con adiciones de limalla en porcentajes no superiores al 5% no se altera respecto a las mezclas convencionales, caracterizando al concreto adicionado como un “concreto normal” teniendo como referencia el peso (masa) por unidad de volumen de la mezcla.

De acuerdo a la factibilidad económica de la producción de mezclas con adición de limalla, se estimó una disminución superior al 8% de los costos de fabricación respecto a mezclas convencionales elaboradas por medio de un diseño de mezcla que garantice una resistencia igual a la máxima alcanzada con la mezcla óptima de adición de limalla (mencionada anteriormente). Por consiguiente, se determina que el uso de limalla en la fabricación de mezclas de concreto es viable, teniendo en cuenta la relación costo-beneficio durante su producción y donde el factor de mayor relevancia para el uso de este tipo de concreto sea la resistencia a la compresión.

Por otra parte, analizando las cantidades relativas para producir un concreto adicionado con el porcentaje óptimo de limalla frente a las cantidades necesarias para producir un concreto convencional, diseñados para características físicas y de resistencia a la compresión similares, se concluye que presenta más relevancia la disminución de la cantidad de cemento frente a la disminución de la cantidad de agregados pétreos, lo cual resulta favorable ante factores ambientales y de factibilidad económica, pues aparte de cumplir con el objetivo planteado de disminuir la cantidad de agregados, se disminuye la cantidad de material cementante el cual presenta un costo más elevado en el mercado y requiere para su producción además de la explotación de recursos naturales, la implementación de procesos industrializados que pueden generar contaminación.

La inclusión al mercado en la industria de la construcción del nuevo tipo de concreto desarrollado durante este estudio, proporciona gran empatía respecto al afán de la sociedad por mitigar los efectos de la contaminación en el planeta. Sin embargo es necesario realizar algunos estudios complementarios que no fueron objeto de estudio en el presente trabajo de grado.

9. RECOMENDACIONES

Durante la fabricación de mezclas de concreto adicionadas con limalla, con el fin de garantizar buenos resultados en cuanto a la resistencia a la compresión, se recomienda mantener la relación agua-cemento (A/C) especificada en el diseño de mezcla por medio de un control exhaustivo de las correcciones necesarias respecto a la cantidad de agua de mezclado, pues a raíz de los cambios – continuos– de humedad en los agregados se presentan alteraciones considerables de la misma afectando de manera directa factores como la consistencia de la mezcla y por ende le resistencia anteriormente mencionada.

Se recomienda dar continuidad a la investigación por medio de nuevos trabajos de grado, con la salvedad que en estos se estudie el comportamiento de las mezclas de concreto ante la adición de un solo porcentaje de limalla y tres tipos de mezcla diferentes por cada trabajo de modo que se aumente significativamente el número de muestras por cada tipo de mezcla. De esta manera, al realizar un consolidado de los resultados obtenidos en diferentes trabajos de grado, se lograría un tamaño muestral significativamente amplio que permita un análisis estadístico profundo y confiable de los mismos.

Respecto a la variación de las características físico-mecánicas ante el envejecimiento del concreto adicionado con limalla, se recomienda realizar los estudios necesarios, tendientes a identificar cambios importantes en factores como la resistencia a la compresión y la apariencia del concreto (uniformidad, color, acabado y textura) después de haber sometido las muestras a la intemperie durante lapsos de tiempo diferentes (durabilidad).

Se recomienda realizar estudios complementarios para evaluar la variación de la resistencia a la flexión y la tracción del concreto adicionado con limadura de acero respecto al convencional. Igualmente, se exhorta a la medida del cortante en vigas reforzadas, fabricadas con el concreto propuesto en este trabajo, con el fin de verificar si es posible una disminución del acero de refuerzo (estribos) ante el aumento de la resistencia a la compresión –respecto a mezclas convencionales– mostrado por dicho concreto.

Por otra parte, se recomienda medir los efectos de la adición de limalla en la retracción del concreto (contracción que presenta por efectos del fraguado) y estimar si aumenta o disminuye en relación con las mezclas convencionales, pues dicha característica presenta gran importancia –por ejemplo– en la producción de

concreto para vigas preesforzadas, donde es indispensable minimizar dicha característica.

Finalmente, teniendo en cuenta la disminución del módulo de elasticidad estático del concreto convencional evidenciada en un trabajo de grado anterior (PORRAS ÁLVAREZ, Natalia Andrea y TORRADO GÓMEZ, Luz Marina) y la disminución del mismo registrada con el presente estudio, se recomienda ejecutar ensayos de medición del módulo de elasticidad tanto a muestras convencionales de concreto como a muestras adicionadas con limalla (fabricadas con los agregados comúnmente utilizados en la región), por medio de procedimientos alternos – diferentes al utilizado en este estudio–, en diferentes laboratorios con el fin de verificar la variación respecto a las formulas establecidas por el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 y establecer la correspondencia con el cálculo de dicho modulo en la región.

Si después de la comparación de resultados se ratifica tal disminución, se hace necesario tomar las correcciones para el diseño de estructuras (en general) donde se involucre el módulo de elasticidad; de lo contrario, si se comprueba que el valor de dicho módulo para las diferentes pruebas ensayadas es igual o mayor al establecido, se deben calibrar los equipos utilizados (en este estudio) para la medición del mismo y que generaron el error.

BIBLIOGRAFÍA

A. ROBB, Luis. Diccionario para ingenieros: español-inglés e inglés-español. 2 ed. México: continental SA., 1997. 664p.

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 y NAVAS VILLAMIZAR, Néstor. Optimización de un concreto de 3000 PSI mejorando la resistencia a la compresión adicionando viruta de acero. Bucaramanga, 2007, 130 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. Escuela de Ingenierías.

CHAN YAM, José Luis; Carcaño, Romel Solís y MORENO, Eric Iván. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto [online]. 2003. Disponible en Internet: <<http://www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen7/influencia.pdf>>

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10. Bogotá D.C.: El ministerio, 2010. 1625p.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Manual de tecnología del concreto (sección 3): Concreto en estado endurecido. 1 ed. México: Limusa, 1994. 382 p.

DELGADO RÚGELES, Edgar y DELGADO RÚGELES, Rafael. Mejoramiento de la resistencia a la flexión del concreto con adición de viruta de acero con porcentajes de 6, 8, 10, 12% y 14% respecto al agregado fino de la mezcla. Bucaramanga, 2008, 80 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. Escuela de Ingenierías.

FERREIRA DÍAZ, Juan Sebastián. Aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto. Bucaramanga, 2008, 117 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. Escuela de Ingenierías.

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. Bucaramanga, 2008, 72 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. Escuela de Ingenierías.

GARCÍA CÓRDOVA, Heyner y SARMIENTO GUTIÉRREZ, Jhon. 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. Bucaramanga, 2008, 68 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. Escuela de Ingenierías.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Cemento portland: Clasificación y nomenclatura. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1966. 2 p. (NTC 30)

_____. _____. Especificaciones físicas y mecánicas. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1982. 6 p. (NTC 121)

_____. _____. Especificaciones químicas. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1982. 5 p. (NTC 321)

_____. Ingeniería civil y arquitectura: Agua para la elaboración de concreto. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. 6 p. (NTC 3459)

_____. _____. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. 17 p. (NTC 1377)

_____. _____. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. 11 p. (NTC 673)

_____. _____. Especificaciones de los agregados para concreto. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. 21 p. (NTC 174)

_____. _____. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1992. 4 p. (NTC 396)

_____. _____.: Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2006. 9 p. (NTC 4025)

_____. _____.: Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1994. 4 p. (NTC 1776)

INSTITUTO DEL CONCRETO. Tecnología y propiedades. 2 ed. Bogotá D.C.: Asocreto, 1997. 215 p.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 9 p. (I.N.V.E-213-07)

_____. Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 3 p. (I.N.V.E-212-07)

_____. Densidad BULK (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 8 p. (I.N.V.E-217-07)

_____. Densidad del cemento hidráulico. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 4 p. (I.N.V.E-307-07)

_____. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 4 p. (I.N.V.E-211-07)

_____. Equivalente de arena de suelos y agregados finos. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 15 p. (I.N.V.E-133-07)

_____. Gravedad específica y absorción de agregados finos. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 8 p. (I.N.V.E-222-07)

_____. Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 12 p. (I.N.V.E-230-07)

_____. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 5 p. (I.N.V.E-227-07)

_____. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles. Bogotá D.C.: INVIAS, 2007. 6 p. (I.N.V.E-218-07)

KOSMATKA, Steven H., et al. Diseño y control de mezclas de concreto. 1 ed. Illinois: PCA, 2004. 456 p.

LOVE, T. W. El concreto en la construcción. 2 ed. México: Trillas, 2006. 173 p.

MEJÍA DE GUTIÉRREZ R.; Bernal S. y RODRÍGUEZ E. Nuevos Concretos para el Aprovechamiento de un Sub-Producto Industrial. En: Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (9: 8, Octubre: Habana, Cuba). IBEROMENT 2006. Disponible en: <<http://calima.univalle.edu.co/scf/archivo/IberometIX/articulos/comision10/IBMC10-04.pdf>>.

MIRANDA MIRANDA, Juan José. Gestión de proyectos: evaluación financiera económica social ambiental. 6 ed. Bogotá D.C.: MM editores, 2010. 438 p.

MIRAVETE, Antonio. Los nuevos materiales en la construcción. 2 ed. Barcelona: Reverte SA., 1995. 394 p.

PAYÁ, Miguel. Hormigón pretensado. 18 ed. Barcelona: Ediciones CEAC SA., 1987. 191 p.

PORRAS ÁLVAREZ, Natalia Andrea y TORRADO GÓMEZ, Luz Marina. Determinación de las ecuaciones del módulo de elasticidad estático y dinámico del concreto producido en Bucaramanga y su área metropolitana. Bucaramanga, 2009, 198 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. Escuela de Ingenierías.

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Concretos y morteros: Manejo y colocación en obra. 2 ed. Bogotá: Asocreto, 1998. 174p.

_____. Tecnología del concreto y del mortero. 5 ed. Bogotá D.C.: Bhandar editores LTDA., 2001. 349 p.

SANTACRUZ M., Andrés. Concretos ultrarresistentes: hacer realidad la creatividad de los diseñadores de puentes. En: Noticreto: tecnología de materiales. Vol. 1, No. 67 (mayo. 2003); p. 54 – 59.

SUAREZ GONZÁLEZ, Omar y VARGAS RINCÓN, Angélica. 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. Bucaramanga, 2008, 103 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. Escuela de Ingenierías.

WU, Wei; ZHANG Weide y MA Guowei. Optimum Content of Copper Slag as a Fine Aggregate in High Strength Concrete [online]. 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved. Materials and Design 31 (2010) 2878–2883. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 639798 Singapore, Singapore; School of Civil and Resource Engineering, University of Western Australia, 35 Stirling Highway, Crawley WA6009, Australia: Available from Internet: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=1440915698&_sort=r&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=93ded295c07ffc1b5c744f33c4f64a0b>.

ANEXO A. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN “PREMUESTRA”

Tabla A1. Resistencia a la compresión, adición de limalla de 3%, 4% y 0%.

Limalla	Edad (días)	% Grueso	% Fino	ϕ (cm)	F (kN)	A (mm ²)	σ (MPa)	Limalla	Edad (días)	% Grueso	% Fino	ϕ (cm)	F (kN)	A (mm ²)	σ (MPa)
3%	3	70	27	14,96	130,00	17577,34	7,40	4%	7	80	16	15,77	184,50	19532,29	9,45
		60	37	14,56	60,50	16649,94	3,63			70	26	15,00	240,20	17671,46	13,59
		50	47	15,70	67,90	19359,28	3,51			60	36	14,63	173,50	16810,42	10,32
		40	57	15,30	43,10	18385,39	2,34			50	46	14,97	91,30	17600,84	5,19
		30	67	14,73	22,30	17041,01	1,31			40	56	14,93	63,00	17506,91	3,60
		20	77	15,13	25,70	17979,09	1,43			30	66	15,33	54,00	18457,56	2,93
	14	70	27	14,67	173,40	16902,47	10,26		21	80	16	14,67	201,30	16902,47	11,91
		60	37	15,70	167,30	19359,28	8,64			70	26	15,87	392,30	19780,79	19,83
		50	47	15,63	110,30	19187,03	5,75			60	36	14,70	221,30	16971,67	13,04
		40	57	15,07	62,00	17836,78	3,48			50	46	15,73	178,80	19433,33	9,20
		30	67	15,50	39,50	18869,19	2,09			40	56	14,70	68,20	16971,67	4,02
		20	77	14,70	37,00	16971,67	2,18			30	66	15,30	70,00	18385,39	3,81
	28	70	27	14,67	290,50	16902,47	17,19		28	80	16	15,73	305,20	19433,33	15,70
		60	37	15,30	216,20	18385,39	11,76			70	26	15,06	389,00	17813,11	21,84
		50	47	14,80	150,50	17203,36	8,75			60	36	14,97	266,10	17600,84	15,12
		40	57	14,91	88,60	17460,04	5,07			50	46	15,06	194,60	17813,11	10,92
		30	67	15,20	61,90	18145,84	3,41			40	56	15,43	116,60	18699,14	6,24
		20	77	15,59	65,00	19088,95	3,41			30	66	15,47	67,60	18796,22	3,60
0%	28	80	20	14,70	220,90	16971,67	13,02	0%	28	80	20	14,80	276,50	17203,36	16,07
		70	30	15,31	180,10	18409,43	9,78			70	30	15,40	395,70	18626,50	21,24
		60	40	15,35	201,00	18505,75	10,86			60	40	15,53	287,50	18942,30	15,18
		50	50	15,51	105,10	18893,55	5,56			50	50	15,77	233,10	19532,29	11,93
		40	60	15,40	98,30	18626,50	5,28			40	60	14,80	121,30	17203,36	7,05
		30	70	15,00	54,70	17671,46	3,10			30	70	15,53	76,80	18942,30	4,05

Fuente: Propia

Tabla A2. Resistencia a la compresión, adición de limalla de 8%, 12% y 0%.

Limalla	Edad (días)	% Grueso	% Fino	ϕ (cm)	F (kN)	A (mm ²)	σ (MPa)	Limalla	Edad (días)	% Grueso	% Fino	ϕ (cm)	F (kN)	A (mm ²)	σ (MPa)
8%	7	80	12	15,00	125,00	17671,46	7,07	12%	3	80	8	14,60	70,60	16741,55	4,22
		70	22	15,73	145,20	19433,33	7,47			70	18	14,70	69,50	16971,67	4,10
		60	32	15,50	140,20	18869,19	7,43			60	28	15,40	53,20	18626,50	2,86
		50	42	15,00	63,60	17671,46	3,60			50	38	15,67	36,50	19285,37	1,89
		40	52	15,00	63,90	17671,46	3,62			40	48	15,70	34,80	19359,28	1,80
		30	62	15,00	42,90	17671,46	2,43			30	58	15,73	24,30	19433,33	1,25
	18	80	12	15,67	194,70	19285,37	10,10		14	80	8	15,33	172,30	18457,56	9,33
		70	22	15,43	251,20	18699,14	13,43			70	18	15,63	184,80	19187,03	9,63
		60	32	14,97	226,30	17600,84	12,86			60	28	15,00	155,50	17671,46	8,80
		50	42	15,30	163,50	18385,39	8,89			50	38	14,93	87,10	17506,91	4,98
		40	52	15,03	103,50	17742,22	5,83			40	48	14,73	65,30	17041,01	3,83
		30	62	15,33	79,60	18457,56	4,31			30	58	15,50	55,30	18869,19	2,93
	28	80	12	14,86	146,60	17343,13	8,45		28	80	8	15,00	251,10	17671,46	14,21
		70	22	15,73	269,00	19433,33	13,84			70	18	14,90	226,30	17436,62	12,98
		60	32	15,73	293,70	19433,33	15,11			60	28	15,47	144,70	18796,22	7,70
		50	42	15,30	191,80	18385,39	10,43			50	38	14,73	151,30	17041,01	8,88
		40	52	14,40	104,20	16286,02	6,40			40	48	14,73	92,00	17041,01	5,40
		30	62	14,50	75,70	16513,00	4,58			30	58	15,03	67,70	17742,22	3,82
0%	28	80	20	14,86	170,80	17343,13	9,85	0%	28	80	20	15,00	307,60	17671,46	17,41
		70	30	14,80	308,60	17203,36	17,94			70	30	15,30	216,40	18385,39	11,77
		60	40	15,43	305,60	18699,14	16,34			60	40	15,33	221,90	18457,56	12,02
		50	50	14,66	169,90	16879,43	10,07			50	50	15,30	132,10	18385,39	7,19
		40	60	15,56	119,40	19015,56	6,28			40	60	14,70	114,30	16971,67	6,73
		30	70	15,80	77,90	19606,68	3,97			30	70	15,40	66,60	18626,50	3,58

Fuente: Propia

Tabla A3. Resistencia a la compresión, adición de limalla 20% y 0%

Limalla	Edad (días)	% Grueso	% Fino	ϕ (cm)	F (kN)	A (mm ²)	σ (MPa)
20%	7	70	10	15,70	126,30	19359,28	6,52
		60	20	15,40	93,80	18626,50	5,04
		50	30	15,43	59,70	18699,14	3,19
		40	40	14,90	37,80	17436,62	2,17
		30	50	14,77	34,80	17133,69	2,03
		20	60	15,00	29,60	17671,46	1,68
	18	70	10	15,00	122,10	17671,46	6,91
		60	20	15,00	107,70	17671,46	6,09
		50	30	14,90	62,40	17436,62	3,58
		40	40	15,70	57,70	19359,28	2,98
		30	50	15,70	44,50	19359,28	2,30
		20	60	14,70	31,30	16971,67	1,84
	28	70	10	15,63	211,80	19187,03	11,04
		60	20	15,60	170,50	19113,45	8,92
		50	30	15,40	93,90	18626,50	5,04
		40	40	15,20	67,80	18145,84	3,74
		30	50	14,70	56,80	16971,67	3,35
		20	60	14,93	51,30	17506,91	2,93
0%	28	70	10	15,03	237,40	17742,22	13,38
		60	20	15,30	261,80	18385,39	14,24
		50	30	15,40	148,20	18626,50	7,96
		40	40	14,53	78,40	16581,40	4,73
		30	50	15,47	83,10	18796,22	4,42
		20	60	15,00	61,00	17671,46	3,45

Fuente: Propia

ANEXO B. NORMATIVIDAD TÉCNICA Y ESPECIFICACIONES

ENSAYO	NORMA (INVIAS)	CORRESPONDENCIA
Análisis granulométrico de agregados gruesos	INVE-213-07	ASTM C136-06, NTC 77-94
Humedad natural	--	NTC 1776-94, ASTM C566-04
Humedad natural de la limalla	--	--
Densidad del cemento hidráulico	INVE-307-07	ASTM C188-09, NTC 221-99
Densidad de la limalla	--	--
Finura del cemento portland método del aparato Blaine	INVE-302-07	ASTM C204-07, NTC 33-97
Gravedad específica y absorción de agregados finos	INVE-222-07	ASTM C128-07a, NTC 237-95
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos	INVE-223-07	ASTM C127-07, NTC 176-95
Densidad Bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos	INVE-217-07	ASTM C29M-09, NTC 92-95
Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados	INVE-211-07	ASTM C142-97(2004), NTC 589-00
Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos	INVE-212-07	ASTM C40-04, NTC 127-00
Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles	INVE-218-07	ASTM C131-06, NTC 93-95 y NTC 98-95
Equivalente de arena de suelos y agregados finos	INVE-133-07	ASTM D2419-09
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	INVE-227-07	ASTM D5821-01(2006)
Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras	INVE-230-07	--
Cemento portland. Clasificación y nomenclatura	ART. 501-07	ASTM C150M-09, NTC 30-66
Cemento portland. Especificaciones físicas y mecánicas	ART. 501-07	ASTM C150M-09, NTC 121-82
Cemento portland. Especificaciones químicas	ART. 501-07	ASTM C150M-09, NTC 321-82
Agua para la elaboración de concreto	INVE-417-07 y ART. 500-07	ASTM C1602M-06, NTC 3459-94
Especificaciones de los agregados para concreto	ART. 630-07	ASTM C33M-08, NTC 174-00
Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio	INVE-402-07	ASTM C192M-07, NTC 1377-94
Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto	INVE-404-07	ASTM C143M-10, NTC 396-92
Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto	INVE-410-07	ASTM C39M-09a, NTC 673-00
Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión	--	ASTM C469-02e1, NTC 4025-06

Fuente: Propia

ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLA PARA LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO ADICIONADO CON LIMALLA

DATOS DE LOS MATERIALES

Propiedades	Agregado Grueso	Agregado Fino	Limalla
Peso Específico (kg/m ³)	2590	2590	5890
Absorción (%)	0,69	2,69	0,15
Masa Unitaria Suelta (kg/m ³)	1510	1403	--
Humedad (%)	0,62	7,99	0,61
Masa Unitaria Compacta (kg/m ³)	1610	1557	--
Tamaño Máximo (mm)	25,4	--	--
Tamaño Máximo Nominal (mm)	25,4	--	--

C.1. Asentamiento:

$\Delta = 10 \text{ cm}$

C.2. Volumen de aire.

TMN = 1 "

Aire = Natural

Agregado grueso TMN		Porcentaje de aire atrapado (%)	Porcentaje promedio total de aire incluido recomendado para los grados de exposición mostrados		
Pulgadas	mm		Suave	Medio	Severo
3/8	9,525	3	4,5	6	7,5
1/2	12,7	2,5	4	5,5	7
3/4	19,05	2	3,5	5	6
1	25,4	1,5	3	4,5	6
1 1/2	38,1	1	2,5	4,5	5,5
2	50,8	0,5	2	4	5
3	76,2	0,3	1,5	3,5	4,5
6	152,4	0,2	1	3	4

% aire = 1,50%

Vol. aire = 0,015 m³

C.3. Volumen de agua.

CONDICIONES DEL CONTENIDO DE AIRE	Asentamiento (cm)	Agua en kg/m3 de concreto para los TMN del agregado indicado (mm)							
		10	12,5	20	25	40	50	70	150
CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO	3 – 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 – 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 – 18	240	230	210	205	185	180	170	150
	Cantidad aproximada de aire atrapado (%)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
CONCRETO CON AIRE INCLUIDO	3 – 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 – 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 – 18	215	205	190	185	170	165	160	145
	Promedio recomendable de contenido de aire (%)	8.0	7.0	6.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0

Agregado grueso TMN		Asentamiento 3-5cm		Asentamiento 8-10cm		Asentamiento 15-18cm	
		Sin aire inc.	Con Aire inc.	Sin aire inc.	Con Aire inc.	Sin aire inc.	Con Aire inc.
Pulgadas	mm	Masa Agua	Masa Agua	Masa Agua	Masa Agua	Masa Agua	Masa Agua
3/8	9,525	205,95	180,95	226,90	201,90	241,90	216,90
1/2	12,7	199,60	174,73	214,60	189,73	229,47	204,60
3/4	19,05	186,90	166,27	201,90	181,27	212,53	191,90
1	25,4	179,60	159,60	194,60	174,60	204,60	184,60
1 1/2	38,1	162,53	146,90	177,53	161,90	187,53	171,90
2	50,8	154,60	139,80	169,60	154,80	179,60	164,80
3	76,2	143,45	133,84	158,45	148,84	168,45	158,84
6	152,4	124,40	119,55	139,40	134,55	149,40	144,55

Masa Agua = 194,6 kg
Vol. Agua = 0,1946 m3

C.4. Volumen de Cemento

$f'c =$ 21 MPa

Resistencia a la compresión MPa	Concreto sin inclusor de aire	Concreto con inclusor de aire
	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

Relación a/c = 0,58

Masa Cemento = 335,52 kg

$\gamma_c =$ 3033,33 kg/m³

Vol. Cemento = 0,111 m³

C.5. Volumen de Agregados.

Vol. agregados = 0,680 m³

Mezcla	% Grueso	% Fino	% Limalla	Peso (kg)	Peso Grueso	Peso Fino	Peso Limalla	Vol. Grueso	Vol. fino	Vol. Limalla	Vol total (m3)
1	70,0%	27,0%	3,0%	1790,75	1253,53	483,50	53,72	0,484	0,187	0,009	0,680
2	65,0%	32,0%	3,0%	1790,75	1163,99	573,04	53,72	0,449	0,221	0,009	0,680
3	60,0%	37,0%	3,0%	1790,75	1074,45	662,58	53,72	0,415	0,256	0,009	0,680
4	55,0%	42,0%	3,0%	1790,75	984,92	752,12	53,72	0,380	0,290	0,009	0,680
5	50,0%	47,0%	3,0%	1790,75	895,38	841,65	53,72	0,346	0,325	0,009	0,680

$\gamma_{grueso} =$ 2590 kg/m³

$\gamma_{fino} =$ 2590 kg/m³

$\gamma_{limalla} =$ 5890 kg/m³

Continuación Tabla B.5. "Volumen de Agregados"

Mezcla	% Grueso	% Fino	% Limalla	Peso (kg)	Peso Grueso	Peso Fino	Peso Limalla	Vol Grueso	Vol fino	Vol Limalla	Vol total (m3)
1	70,0%	26,0%	4,0%	1801,02	1260,71	468,26	72,04	0,487	0,181	0,012	0,680
2	65,0%	31,0%	4,0%	1801,02	1170,66	558,32	72,04	0,452	0,216	0,012	0,680
3	60,0%	36,0%	4,0%	1801,02	1080,61	648,37	72,04	0,417	0,250	0,012	0,680
4	55,0%	41,0%	4,0%	1801,02	990,56	738,42	72,04	0,382	0,285	0,012	0,680
5	50,0%	46,0%	4,0%	1801,02	900,51	828,47	72,04	0,348	0,320	0,012	0,680

Mezcla	% Grueso	% Fino	% Limalla	Peso (kg)	Peso Grueso	Peso Fino	Peso Limalla	Vol Grueso	Vol fino	Vol Limalla	Vol total (m3)
1	70,0%	25,0%	5,0%	1811,40	1267,98	452,85	90,57	0,490	0,175	0,015	0,680
2	65,0%	30,0%	5,0%	1811,40	1177,41	543,42	90,57	0,455	0,210	0,015	0,680
3	60,0%	35,0%	5,0%	1811,40	1086,84	633,99	90,57	0,420	0,245	0,015	0,680
4	55,0%	40,0%	5,0%	1811,40	996,27	724,56	90,57	0,385	0,280	0,015	0,680
5	50,0%	45,0%	5,0%	1811,40	905,70	815,13	90,57	0,350	0,315	0,015	0,680

Mezcla	% Grueso	% Fino	% Limalla	Peso (kg)	Peso Grueso	Peso Fino	Peso Limalla	Vol Grueso	Vol fino	Vol Limalla	Vol total (m3)
1	70,0%	30,0%	0,0%	1760,66	1232,46	528,20	0,00	0,476	0,204	0,000	0,680
2	65,0%	35,0%	0,0%	1760,66	1144,43	616,23	0,00	0,442	0,238	0,000	0,680
3	60,0%	40,0%	0,0%	1760,66	1056,39	704,26	0,00	0,408	0,272	0,000	0,680
4	55,0%	45,0%	0,0%	1760,66	968,36	792,30	0,00	0,374	0,306	0,000	0,680
5	50,0%	50,0%	0,0%	1760,66	880,33	880,33	0,00	0,340	0,340	0,000	0,680

C.6. Ajuste de Agua Diseño de Mezcla.

Agua Grueso = -0,07%
 Agua Fino = 5,30%
 Agua Limalla = 0,46%

Limalla	Mezcla	Masa Agua Grueso (kg)	Masa Agua Fino (kg)	Masa Agua Limalla (kg)	Masa Agregados (kg)	Masa Agua Ajustada (kg)
3,00%	1	-0,88	25,63	0,25	25,00	169,605
	2	-0,81	30,37	0,25	29,80	164,796
	3	-0,75	35,12	0,25	34,61	159,988
	4	-0,69	39,86	0,25	39,42	155,180
	5	-0,63	44,61	0,25	44,23	150,372
4,00%	1	-0,88	24,82	0,33	24,27	170,333
	2	-0,82	29,59	0,33	29,10	165,497
	3	-0,76	34,36	0,33	33,94	160,662
	4	-0,69	39,14	0,33	38,77	155,826
	5	-0,63	43,91	0,33	43,61	150,990
5,00%	1	-0,89	24,00	0,42	23,53	171,070
	2	-0,82	28,80	0,42	28,39	166,206
	3	-0,76	33,60	0,42	33,26	161,343
	4	-0,70	38,40	0,42	38,12	156,479
	5	-0,63	43,20	0,42	42,98	151,615
0,00%	1	-0,86	27,99	0,00	27,13	167,468
	2	-0,80	32,66	0,00	31,86	162,741
	3	-0,74	37,33	0,00	36,59	158,014
	4	-0,68	41,99	0,00	41,31	153,286
	5	-0,62	46,66	0,00	46,04	148,559

C.7. Diseño de Mezclas con Ajuste de Agua

Limalla 3%	Mezcla 1			Mezcla 2			Mezcla 3			Mezcla 4			Mezcla 5		
Materiales	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)
Aire			0,015			0,015			0,015			0,015			0,015
Agua	169,60	1000	0,195	164,80	1000	0,195	159,99	1000	0,195	155,18	1000	0,195	150,99	1000	0,195
Cemento	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111
Agregado Grueso	1261,30	2590	0,484	1171,21	2590	0,449	1081,11	2590	0,415	991,02	2590	0,380	900,93	2590	0,346
Agregado Fino	522,14	2590	0,187	618,83	2590	0,221	715,52	2590	0,256	812,21	2590	0,290	908,90	2590	0,325
Limalla	54,05	5890	0,009	54,05	5890	0,009	54,05	5890	0,009	54,05	5890	0,009	54,05	5890	0,009
Total	2342,61		1,00	2344,40		1,00	2346,19		1,00	2347,98		1,00	2350,39		1,00

Limalla 4%	Mezcla 1			Mezcla 2			Mezcla 3			Mezcla 4			Mezcla 5		
Materiales	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)
Aire			0,015			0,015			0,015			0,015			0,015
Agua	170,33	1000	0,195	165,50	1000	0,195	160,66	1000	0,195	155,83	1000	0,195	150,99	1000	0,195
Cemento	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111
Agregado Grueso	1268,53	2590	0,487	1177,92	2590	0,452	1087,31	2590	0,417	996,70	2590	0,382	906,09	2590	0,348
Agregado Fino	505,68	2590	0,181	602,92	2590	0,216	700,17	2590	0,250	797,42	2590	0,285	894,66	2590	0,320
Limalla	72,48	5890	0,012	72,48	5890	0,012	72,48	5890	0,012	72,48	5890	0,012	72,48	5890	0,012
Total	2352,54		1,00	2354,34		1,00	2356,14		1,00	2357,94		1,00	2359,74		1,00

Continuación Tabla C.7. "Diseño de mezclas con ajuste de agua".

Limalla 5%	Mezcla 1			Mezcla 2			Mezcla 3			Mezcla 4			Mezcla 5		
Materiales	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)
Aire			0,015			0,015			0,015			0,015			0,015
Agua	171,07	1000	0,195	166,21	1000	0,195	161,34	1000	0,195	156,48	1000	0,195	151,62	1000	0,195
Cemento	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111
Agregado Grueso	1275,84	2590	0,490	1184,71	2590	0,455	1093,58	2590	0,420	1002,45	2590	0,385	911,32	2590	0,350
Agregado Fino	489,03	2590	0,175	586,84	2590	0,210	684,65	2590	0,245	782,45	2590	0,280	880,26	2590	0,315
Limalla	91,12	5890	0,015	91,12	5890	0,015	91,12	5890	0,015	91,12	5890	0,015	91,12	5890	0,015
Total	2362,58		1,00	2364,39		1,00	2366,21		1,00	2368,02		1,00	2369,83		1,00

Limalla 0%	Mezcla 1			Mezcla 2			Mezcla 3			Mezcla 4			Mezcla 5		
Materiales	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Vol (m3)
Aire			0,015			0,015			0,015			0,015			0,015
Agua	167,47	1000	0,195	162,74	1000	0,195	158,01	1000	0,195	153,29	1000	0,195	153,29	1000	0,195
Cemento	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111	335,52	3033	0,111
Agregado Grueso	1240,10	2590	0,476	1151,52	2590	0,442	1062,94	2590	0,408	974,36	2590	0,374	885,79	2590	0,340
Agregado Fino	570,40	2590	0,204	665,47	2590	0,238	760,53	2590	0,272	855,60	2590	0,306	950,67	2590	0,340
Limalla	0,00	5890	0,000	0,00	5890	0,000	0,00	5890	0,000	0,00	5890	0,000	0,00	5890	0,000
Total	2313,49		1,00	2315,25		1,00	2317,01		1,00	2318,77		1,00	2325,26		1,00

Fuente: Fuente: MIC. Claudia Patricia Retamoso Llamas. Hoja de cálculo para Diseño de Mezcla

ANEXO D. RESULTADOS DE PRUEBAS DEL CONCRETO

D.1 Dimensionamiento y carga última de cilindros testigo, edad 7 días.

Limalla	Cilindro N°	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa(Kg)	Carga (KN)	Limalla	Cilindro N°	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (Kg)	Carga (KN)
3%	1	14,90	29,61	12,67	286,40	4%	46	14,95	29,50	12,64	311,80
	2	14,60	29,25	12,28	249,70		47	15,25	30,35	13,59	329,10
	3	14,51	29,60	12,44	243,40		48	15,65	29,95	14,19	372,40
	4	15,30	30,26	13,58	346,70		49	15,55	30,30	14,09	365,00
	5	14,59	29,41	12,35	279,00		50	14,90	29,95	12,93	289,60
	6	15,30	30,80	13,75	300,00		51	14,75	29,45	12,39	285,50
	7	14,71	29,92	12,64	294,70		52	15,75	29,85	14,17	363,50
	8	15,59	30,00	13,97	348,20		53	15,35	30,75	13,78	300,80
	9	15,55	30,29	13,97	371,40		54	14,90	30,00	12,82	322,40
	10	15,27	30,31	13,31	325,20		55	15,30	30,25	13,67	339,20
	11	14,95	29,00	12,38	273,70		56	14,45	29,45	12,23	335,40
	12	15,46	30,21	13,61	324,70		57	14,95	29,75	12,73	333,50
	13	14,65	29,35	12,00	201,00		58	15,70	29,90	13,99	325,40
	14	15,66	29,76	13,74	275,40		59	14,75	29,25	12,22	367,90
	15	15,29	29,95	12,98	266,50		60	15,45	30,15	13,74	357,60
5%	16	15,70	29,94	14,30	325,70		61	15,00	29,05	12,53	375,80
	17	15,40	30,00	13,58	301,20		62	15,70	29,90	13,95	336,60
	18	15,35	30,35	13,89	384,60		63	14,65	29,25	12,13	315,80
	19	15,76	29,81	14,25	360,30		64	15,30	30,20	13,44	350,40
	20	15,05	30,05	12,91	350,90		65	14,40	29,40	12,19	324,60
	21	14,95	29,30	12,50	336,60		66	15,20	29,95	13,16	316,60
	22	15,30	30,05	13,48	310,40		67	15,45	29,90	13,26	309,30
	23	15,40	29,94	13,39	315,00		68	15,70	29,95	13,96	360,20
	24	15,05	29,90	12,90	356,10		69	15,25	30,00	13,30	334,90
	25	15,21	30,00	13,23	302,10		70	15,20	29,95	13,23	335,00
	26	15,25	30,00	13,23	330,90		71	15,30	29,96	13,21	354,70
	27	15,40	30,00	13,25	331,20		72	14,75	29,20	12,32	269,00
	28	15,29	29,94	13,16	228,10		73	15,35	30,05	13,24	289,00
	29	15,25	30,03	13,14	279,90		74	15,20	29,95	13,21	307,30
	30	15,41	29,90	13,06	271,40		75	15,30	30,00	13,20	365,00
0%	31	15,64	29,52	13,96	321,80		76	15,20	29,97	13,29	323,90
	32	15,25	30,25	13,29	303,40		77	15,40	29,90	13,28	302,90
	33	15,10	29,84	13,06	298,10		78	15,30	30,00	13,35	333,00
	34	15,55	29,96	13,88	322,10		79	15,25	29,95	13,34	334,70
	35	15,24	30,00	13,13	305,30		80	15,61	30,00	14,02	320,00
	36	15,21	29,95	13,09	315,40		81	15,60	30,00	14,03	315,90
	37	15,26	29,85	13,00	260,00		82	15,31	30,05	13,29	287,60
	38	15,16	29,96	12,97	276,90		83	15,15	29,82	12,82	295,60
	39	15,30	29,90	13,04	236,10		84	15,40	29,90	13,18	300,40
	40	15,35	29,85	12,86	236,50		85	15,35	29,95	13,34	339,30
	41	15,19	29,84	12,81	213,80		86	15,25	29,95	13,13	257,90
	42	15,25	29,95	13,58	238,40		87	15,35	29,90	13,19	243,20
	43	15,61	29,96	13,44	230,30		88	15,00	29,70	12,92	266,40
	44	15,26	29,85	12,76	202,60		89	15,30	29,97	13,14	243,40
	45	15,30	30,00	12,74	259,70		90	15,60	30,10	13,94	237,00
Fuente: Propia							91	15,30	29,90	13,10	241,30
							92	15,30	29,75	13,05	225,90
							93	15,00	29,95	13,06	203,40
							94	15,30	29,92	13,10	252,50
							95	15,25	29,95	13,12	268,70

Fuente: Propia

D.2 Dimensionamiento y carga última de cilindros testigo, edad 14 días.

Limalla	Cilindro N°	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (Kg)	Carga (KN)	Limalla	Cilindro N°	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (Kg)	Carga (KN)
3%	96	15,33	30,02	13,43	320,90	4%	141	15,30	30,00	13,37	312,00
	97	14,53	29,35	12,21	348,60		142	15,37	30,52	13,69	318,70
	98	15,30	30,15	13,43	365,30		143	15,20	30,05	13,43	436,00
	99	15,33	30,00	13,27	397,10		144	14,63	29,37	12,26	314,90
	100	15,30	30,05	13,28	373,00		145	15,37	30,32	13,70	326,60
	101	15,23	30,17	13,47	355,90		146	15,30	30,07	13,43	426,90
	102	15,00	30,35	12,70	378,10		147	15,07	29,92	12,91	329,90
	103	15,33	29,87	13,07	360,00		148	15,30	30,15	13,48	420,30
	104	15,27	30,10	13,14	387,10		149	15,13	30,15	13,48	355,00
	105	15,43	30,17	13,14	364,60		150	15,03	29,17	12,77	393,90
	106	15,30	29,95	13,17	317,30		151	15,37	30,05	13,71	420,80
	107	15,27	30,12	13,13	378,50		152	15,30	30,77	13,70	372,50
	108	15,47	30,22	13,46	300,00		153	15,73	29,90	14,06	435,80
	109	14,57	29,37	11,87	295,90		154	14,77	29,40	12,29	395,00
	110	15,23	30,07	12,96	306,00		155	15,77	30,25	14,23	420,50
5%	111	14,80	29,50	12,49	376,10		156	15,30	30,20	13,50	430,00
	112	15,27	30,15	13,48	350,00		157	14,87	30,18	12,92	397,60
	113	15,33	30,47	13,71	395,90		158	15,13	30,67	13,44	412,40
	114	15,70	30,10	14,10	394,30		159	15,37	30,10	13,28	405,60
	115	14,83	29,42	12,23	388,80		160	15,13	30,13	13,34	389,90
	116	15,33	30,17	13,39	401,20		161	15,53	30,38	14,04	337,30
	117	15,37	30,45	13,60	400,90		162	15,17	30,03	13,28	421,80
	118	15,03	29,13	12,59	392,20		163	14,67	29,50	12,23	376,70
	119	15,33	30,00	13,35	381,00		164	15,23	30,03	13,18	376,10
	120	15,17	30,43	13,34	366,20		165	15,17	30,05	13,23	439,80
	121	14,73	29,30	12,34	385,00		166	15,40	30,30	13,76	414,30
	122	15,73	29,98	14,13	375,90		167	15,20	29,97	13,02	377,70
	123	15,23	29,90	13,10	356,60		168	14,67	29,32	12,22	339,80
	124	15,27	29,95	13,21	357,50		169	15,00	29,75	12,76	406,00
	125	15,37	30,28	13,43	310,50		170	15,33	30,35	13,62	425,10
0%	126	14,93	30,00	12,71	362,40		171	15,70	29,87	13,89	419,10
	127	15,70	30,00	14,12	343,60		172	15,67	29,90	13,78	325,80
	128	15,00	29,98	12,87	310,10		173	14,73	29,27	12,24	348,40
	129	15,43	30,08	13,20	375,00		174	15,17	29,95	13,11	375,90
	130	15,33	30,80	13,67	350,20		175	15,27	30,02	13,18	352,40
	131	15,27	30,18	13,24	330,60		176	15,13	29,92	13,29	331,10
	132	15,53	30,45	13,79	300,50		177	14,90	30,17	12,83	352,40
	133	15,27	29,98	13,14	357,30		178	14,90	29,40	12,05	343,40
	134	15,23	30,08	13,14	350,70		179	15,20	29,87	13,23	384,40
	135	15,17	29,98	12,96	295,50		180	15,30	30,07	13,22	367,80
	136	14,60	29,38	12,02	278,80		181	15,23	29,98	13,20	343,70
	137	14,87	30,10	12,46	288,30		182	15,12	30,03	13,23	363,90
	138	14,97	29,45	12,21	250,00		183	15,40	30,00	13,24	355,80
	139	15,73	29,80	13,74	281,80		184	15,37	30,08	13,31	328,90
	140	15,20	30,05	12,96	255,00		185	15,13	30,03	13,12	377,00
							186	15,53	29,98	13,97	340,10
							187	15,30	30,05	13,26	322,10
							188	14,60	29,10	11,98	318,40
							189	15,30	29,93	13,22	395,20
							190	14,93	29,93	12,60	341,60

Fuente: Propia

D.3 Dimensionamiento y carga última de cilindros testigo, edad 28 días.

Limalla	Cilindro N°	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (Kg)	Carga (KN)	Limalla	Cilindro N°	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (Kg)	Carga (KN)
3%	191	15,40	30,05	13,85	401,20	4%	236	14,67	29,33	12,32	501,30
	192	15,36	30,32	13,67	435,00		237	14,57	29,43	12,41	505,90
	193	15,36	30,85	13,79	390,20		238	14,83	30,00	12,80	500,00
	194	15,26	30,30	13,49	463,60		239	15,23	30,45	13,67	451,00
	195	15,60	29,75	14,02	438,70		240	15,27	30,12	13,68	518,90
	196	15,56	29,92	14,03	517,60		241	14,63	29,50	12,64	524,20
	197	14,53	29,25	12,09	463,90		242	14,67	29,38	12,26	488,40
	198	14,76	29,10	12,15	468,20		243	15,63	29,80	14,17	559,20
	199	15,23	30,22	13,43	476,30		244	14,45	29,20	12,25	502,80
	200	15,00	28,95	12,40	482,30		245	14,97	29,23	12,77	515,60
	201	14,90	29,85	12,44	477,00		246	15,63	29,93	14,14	571,70
	202	14,63	29,35	12,08	437,30		247	15,20	30,18	13,55	551,60
	203	14,43	29,05	11,75	348,60		248	15,13	29,98	13,29	547,60
	204	14,60	29,22	11,89	427,20		249	14,93	29,83	12,86	523,20
	205	15,00	29,60	12,45	402,70		250	14,63	29,38	12,24	544,50
5%	206	14,83	29,47	12,68	452,30		251	15,43	30,13	13,78	515,50
	207	15,56	29,85	14,33	401,40		252	15,63	29,98	14,04	572,60
	208	15,00	30,02	12,97	386,50		253	15,30	30,70	13,81	561,60
	209	14,86	29,90	12,91	503,20		254	14,83	29,93	12,77	537,20
	210	15,13	30,02	13,42	513,00		255	15,43	30,33	14,06	611,50
	211	15,50	30,22	14,14	545,00		256	14,93	29,90	13,08	511,40
	212	15,16	30,00	13,25	524,20		257	14,90	29,83	12,70	469,70
	213	15,20	30,00	13,33	526,70		258	15,13	29,93	13,20	544,30
	214	15,40	29,92	13,28	518,40		259	15,07	29,98	13,16	486,00
	215	15,10	29,90	13,13	522,70		260	15,17	29,93	13,27	537,60
	216	15,23	29,87	13,19	520,90		261	15,17	29,98	13,20	546,50
	217	15,10	29,87	13,26	472,70		262	15,17	29,95	13,24	542,20
	218	15,00	29,77	12,83	450,30		263	15,13	29,93	13,18	546,10
	219	15,17	30,03	13,07	485,00		264	15,17	30,00	13,24	541,80
	220	15,00	30,33	12,97	404,10		265	15,17	29,93	13,20	531,60
0%	221	15,13	30,02	13,25	408,20		266	15,17	30,00	13,04	505,10
	222	15,26	30,05	13,27	372,70		267	15,07	29,95	13,13	501,60
	223	15,16	30,05	13,18	380,90		268	15,23	29,93	13,05	491,20
	224	15,26	29,95	13,08	395,20		269	15,13	29,93	13,08	346,30
	225	15,16	30,00	13,11	417,90		270	15,27	30,00	13,16	516,60
	226	15,10	30,00	13,04	389,70		271	15,17	29,93	13,07	486,20
	227	15,23	29,92	12,94	359,80		272	15,23	29,94	13,04	512,00
	228	15,46	29,95	13,74	372,40		273	15,03	29,83	12,84	506,10
	229	15,10	29,95	12,97	362,60		274	15,60	30,00	13,85	545,60
	230	15,30	30,32	13,15	346,60		275	15,13	30,00	13,02	497,00
	231	15,30	29,90	12,95	343,80		276	15,27	30,28	13,22	480,40
	232	15,23	29,90	12,86	347,20		277	15,13	29,98	12,85	464,00
	233	15,00	29,90	12,50	301,30		278	15,13	29,90	12,88	454,60
	234	15,26	29,92	12,63	305,60		279	15,13	29,83	12,91	449,50
	235	15,10	30,05	12,71	325,40		280	15,03	30,28	12,91	468,10
							281	15,53	29,85	13,66	462,40
							282	15,10	30,35	13,04	441,70
							283	14,63	29,15	11,98	398,10
							284	15,23	29,88	12,94	428,80
							285	15,00	29,78	12,55	377,10

Fuente: Propia

D.4. Resultados del concreto, edad 7 días.

Limalla	Cilindro N°	Mezcla	Δ (cm)*	Peso Esp. (kg/m3)	Esfuerzo (MPa)	Limalla	Cilindro N°	Mezcla	Δ (cm)*	Peso Esp. (kg/m3)	Esfuerzo (MPa)	
3%	1	1	9,90	2454,01	16,43	4%	46	1	10,10	2440,92	17,76	
	2		10,20	2507,71	14,91		47		10,40	2451,50	18,02	
	3		8,00	2541,58	14,72		48		10,00	2463,01	19,36	
	4	8,10	2440,95	18,86	49		10,80		2448,60	19,22		
	5	2	10,20	2511,72	16,69		50		9,50	2475,94	16,61	
	6		8,90	2428,17	16,32		51		10,90	2462,14	16,71	
	7		8,70	2485,82	17,34		52		10,90	2436,55	18,66	
	8	3	9,70	2439,46	18,24		53		9,40	2421,57	16,25	
	9		10,30	2428,55	19,56		54		9,00	2450,78	18,49	
	10		4	10,50	2397,86		17,76		55	8,90	2457,93	18,45
	11	8,40		2431,93	15,59		56	10,80	2532,30	20,45		
	12	10,00		2399,93	17,30		57	9,30	2437,64	19,00		
	13	5	9,50	2425,54	11,92		58	9,50	2416,89	16,81		
	14		9,90	2397,07	14,30		59	8,60	2444,96	21,53		
	15		10,40	2360,33	14,51		60	10,60	2430,82	19,07		
5%	16	1	10,10	2467,15	16,82		61	2	10,10	2440,80	21,27	
	17		10,50	2430,23	16,17		62		8,90	2409,98	17,39	
	18		10,30	2473,07	20,78		63		8,80	2460,20	18,73	
	19	2	10,00	2450,48	18,47		64		9,70	2420,58	19,06	
	20		9,30	2415,01	19,73		65		9,30	2545,90	19,93	
	21		10,90	2430,36	19,18		66		9,00	2421,49	17,45	
	22	3	10,20	2439,90	16,88		67		9,40	2365,51	16,50	
	23		10,20	2401,03	16,91		68		10,40	2407,68	18,61	
	24		10,50	2425,25	20,02		69		10,30	2427,17	18,34	
	25	4	9,40	2427,11	16,63		70		3	8,50	2434,37	18,46
	26		9,80	2414,40	18,12		71	9,70		2398,22	19,29	
	27		10,10	2371,17	17,78		72	11,00		2469,19	15,74	
	28	5	9,80	2393,86	12,42		73	10,40		2380,88	15,62	
	29		9,60	2395,58	15,32		74	8,60		2430,69	16,94	
	30		9,70	2341,95	14,55		75	10,90		2393,21	19,85	
0%	31	1	9,20	2461,53	16,75		76	4		10,40	2443,77	17,85
	32		8,90	2405,30	16,61		77			8,90	2384,49	16,26
	33		9,90	2444,00	16,65		78			9,80	2420,40	18,11
	34	2	9,00	2439,48	16,96		79			9,80	2438,54	18,32
	35		10,10	2399,30	16,74		80		9,70	2441,92	16,72	
	36		9,40	2405,44	17,36		81		8,80	2446,79	16,53	
	37	3	9,20	2381,22	14,22		82		10,90	2402,37	15,62	
	38		8,70	2398,34	15,34		83		9,20	2384,87	16,40	
	39		8,90	2372,10	12,84		84		9,90	2366,53	16,13	
	40	4	9,60	2328,04	12,78		85		5	9,30	2406,87	18,33
	41		10,90	2368,89	11,80		86	9,60		2400,15	14,12	
	42		10,60	2482,41	13,05		87	9,20		2383,78	13,14	
	43	5	9,00	2344,02	12,03		88	8,10		2461,69	15,08	
	44		10,60	2337,26	11,08		89	9,10		2384,71	13,24	
	45		8,90	2309,81	14,13		90	10,20		2423,02	12,40	
* Asentamiento en centímetros							91	5		10,10	2383,02	13,12
							92			9,90	2385,89	12,29
							93			9,80	2467,60	11,51
							94			9,10	2381,43	13,73
							95		10,40	2398,32	14,71	
Fuente: Propia												

Fuente: Propia

D.5. Resultados del concreto, edad 14 días.

Limalla	Cilindro N°	Mezcla	Δ (cm)*	Peso Esp. (kg/m3)	Esfuerzo (MPa)	Limalla	Cilindro N°	Mezcla	Δ (cm)*	Peso Esp. (kg/m3)	Esfuerzo (MPa)	
3%	96	1	10,30	2423,77	17,39	4%	141	1	10,00	2424,03	16,97	
	97		10,40	2508,92	21,02		142		9,50	2417,58	17,18	
	98		10,30	2422,79	19,87		143		9,70	2462,94	24,03	
	99	2	9,40	2396,49	21,51		144		10,90	2483,18	18,73	
	100		10,80	2403,70	20,29		145		10,20	2435,31	17,60	
	101		10,00	2450,77	19,54		146		10,80	2429,24	23,22	
	102	3	10,50	2367,95	21,40		147		10,30	2419,07	18,50	
	103		9,70	2370,64	19,50		148		10,20	2431,81	22,86	
	104		10,30	2383,75	21,14		149		10,40	2486,77	19,75	
	105	4	9,00	2329,15	19,50		150		10,20	2467,44	22,20	
	106		10,40	2391,75	17,26		151	2	9,70	2458,98	22,68	
	107		10,20	2380,36	20,67		152		9,90	2421,70	20,26	
	108	5	9,50	2369,63	15,96		153		9,10	2419,73	22,43	
	109		9,80	2424,03	17,75		154		10,60	2439,80	23,05	
110	10,40		2365,82	16,80	155		11,00		2408,39	21,53		
5%	111	1	10,30	2461,09	21,86		156		2	10,90	2431,39	23,39
	112		10,10	2441,38	19,11		157			10,10	2465,08	22,89
	113		9,30	2437,76	21,45		158			10,30	2437,35	22,94
	114	2	9,50	2419,71	20,37		159			9,20	2377,90	21,86
	115		9,60	2406,64	22,51		160			10,60	2462,57	21,69
	116		10,00	2404,53	21,74		161	10,30		2439,76	17,81	
	117	3	10,60	2407,21	21,61		162	9,80		2446,71	23,34	
	118		9,50	2436,00	22,11		163	10,60		2452,76	22,29	
	119		9,20	2410,94	20,64		164	9,60		2409,19	20,64	
	120	4	10,20	2425,45	20,26		165	9,20		2435,87	24,33	
	121		9,20	2471,45	22,59		166	9,50	2438,06	22,24		
	122		10,50	2425,29	19,34		167	9,00	2394,13	20,81		
	123	5	10,70	2404,97	19,57		168	10,70	2465,80	20,10		
	124		10,20	2408,45	19,52		169	10,10	2427,12	22,97		
	125		9,60	2390,47	16,73		170	9,70	2431,33	23,03		
0%	126	1	10,60	2420,00	20,70		171	4	10,90	2402,03	21,65	
	127		9,60	2431,22	17,75		172		9,10	2389,74	16,89	
	128		9,70	2429,26	17,55		173		10,80	2453,94	20,44	
	129	2	10,00	2346,79	20,05		174		9,70	2421,84	20,80	
	130		9,70	2404,60	18,97		175		10,80	2397,38	19,24	
	131		9,30	2395,53	18,05		176		10,40	2470,56	18,42	
	132	3	9,50	2390,81	15,86		177		10,00	2438,87	20,21	
	133		9,80	2393,29	19,51		178		9,60	2350,59	19,69	
	134		10,50	2397,88	19,25		179		10,10	2440,89	21,18	
	135	4	10,20	2391,73	16,35		180		9,90	2391,25	20,01	
	136		9,70	2443,75	16,65		181	5	10,50	2416,87	18,87	
	137		8,50	2383,63	16,60		182		10,20	2453,64	20,27	
	138	5	9,30	2355,57	14,20		183		9,50	2369,38	19,10	
	139		10,30	2372,59	14,50		184		9,80	2384,86	17,73	
	140		10,00	2376,75	14,05		185		10,00	2430,03	20,97	
	* Asentamiento en centímetros						186		5	9,30	2459,98	17,95
187							10,90			2400,08	17,52	
188							9,60			2459,05	19,02	
189							9,00			2402,44	21,50	
190							10,20			2404,66	19,51	

Fuente: Propia

Fuente: Propia

D.6. Resultados del concreto, edad 28 días.

Limalla	Cilindro N°	Mezcla	Δ (cm)*	Peso Esp. (kg/m3)	Esfuerzo (MPa)	Limalla	Cilindro N°	Mezcla	Δ (cm)*	Peso Esp. (kg/m3)	Esfuerzo (MPa)		
3%	191	1	9,50	2474,42	21,54	4%	236	1	9,10	2485,13	29,66		
	192		10,50	2433,14	23,48		237		9,50	2529,14	30,34		
	193		10,80	2412,33	21,06		238		9,60	2470,11	28,95		
	194	2	9,30	2434,28	25,35		239		10,70	2464,29	24,76		
	195		9,40	2465,60	22,95		240		10,00	2480,07	28,33		
	196		10,50	2465,97	27,22		241		10,50	2548,86	31,18		
	197	3	10,70	2492,75	27,98		242		10,80	2468,82	28,90		
	198		9,80	2440,17	27,36		243		10,00	2478,25	29,14		
	199		9,20	2439,45	26,15		244		10,70	2558,16	30,66		
	200	4	10,70	2423,82	27,29		245		9,20	2482,15	29,29		
	201		10,20	2390,09	27,36		246	2	9,90	2462,27	29,80		
	202		9,50	2448,39	26,01		247		10,80	2474,25	30,40		
	203	5	11,00	2473,26	21,32		248		10,80	2465,62	30,46		
	204		9,20	2430,56	25,52		249		9,10	2462,51	29,89		
	205		10,20	2380,16	22,79		250		9,70	2478,28	32,39		
5%	206	1	10,50	2490,96	26,19		251		10,10	2445,84	27,57		
	207		10,90	2524,60	21,11		252		9,70	2440,77	29,84		
	208		9,50	2444,88	21,87		253		10,40	2446,71	30,55		
	209	2	11,00	2489,59	29,01		254		10,80	2470,09	31,10		
	210		10,40	2486,42	28,53		255		10,40	2479,08	32,70		
	211		9,20	2479,71	28,88		256	3	9,30	2498,77	29,21		
	212	3	9,90	2446,84	29,04		257		9,90	2441,68	26,94		
	213		10,60	2448,68	29,03		258		9,40	2453,01	30,27		
	214		9,20	2382,90	27,83		259		10,10	2460,98	27,25		
	215	4	10,50	2452,17	29,19		260		9,10	2453,03	29,74		
	216		9,00	2423,93	28,59		261		10,30	2436,02	30,24		
	217		10,80	2478,93	26,40		262		10,50	2445,85	30,00		
	218	5	9,80	2438,80	25,48		263		9,70	2449,29	30,37		
	219		9,10	2408,02	26,83		264		10,90	2441,78	29,98		
	220		10,90	2419,89	22,87		265		9,50	2440,09	29,41		
0%	221	1	9,40	2454,92	22,70		266	4	10,40	2404,89	27,95		
	222		10,60	2414,50	20,38		267		10,00	2457,83	28,12		
	223		9,40	2429,87	21,10		268		9,50	2393,39	26,96		
	224	2	9,60	2387,88	21,61		269		9,90	2430,71	19,26		
	225		10,90	2420,99	23,15		270		10,40	2395,34	28,21		
	226		10,70	2427,24	21,76		271		10,30	2416,06	26,90		
	227	3	9,20	2374,01	19,75		272		9,90	2390,76	28,10		
	228		10,10	2443,89	19,84		273		9,60	2426,07	28,53		
	229		10,90	2418,24	20,25		274		10,50	2415,40	28,55		
	230	4	10,80	2358,98	18,85		275		9,70	2413,92	27,64		
	231		9,00	2355,73	18,70		276	5	10,30	2384,01	26,23		
	232		9,20	2360,91	19,06		277		10,40	2383,99	25,81		
	233	5	9,90	2365,74	17,05		278		9,50	2395,95	25,28		
	234		10,70	2308,04	16,71		279		10,80	2407,16	25,00		
	235		9,70	2361,88	18,17		280		10,70	2403,05	26,38		
* Asentamiento en centímetros							281		5	10,90	2415,87	24,41	
							282			9,60	2399,25	24,67	
							283			10,10	2444,78	23,68	
							284			10,00	2377,19	23,54	
							285			9,90	2384,77	21,34	
							Fuente: Propia						

Fuente: Propia

D.7. Determinación del módulo elasticidad para las diferentes mezclas.

Limalla	Mezcla	Cilindro N°	Carga Máx. (kN)	Diámetro (cm)	eg (cm)	er (cm)	S ₂ (MPa)	S ₁ (MPa)	ε ₂	E (MPa)
3%	1	192	401,20	15,36	4,90	5,20	8,66	1,05	8,1E-04	10066,42
		193	401,20	15,36	5,20	5,20	8,66	0,70	8,6E-04	9884,60
	2	195	463,60	15,60	5,00	4,90	9,70	0,99	8,6E-04	10774,79
		196	463,60	15,56	5,10	4,80	9,75	0,90	8,1E-04	11609,55
	3	198	463,90	14,76	5,40	5,40	10,84	0,94	9,8E-04	10707,06
		199	463,90	15,23	5,20	5,20	10,19	0,90	8,2E-04	12129,69
	4	201	482,30	14,90	5,30	5,00	11,06	1,23	1,1E-03	9475,92
		202	482,30	14,63	5,40	5,40	11,48	0,96	1,1E-03	10263,36
	5	204	348,60	14,60	5,10	5,40	8,33	0,93	6,8E-04	11724,46
		205	348,60	15,00	5,30	5,30	7,89	0,81	7,1E-04	10734,35
5%	1	207	452,30	15,56	5,10	5,00	9,51	0,88	9,0E-04	10186,03
		208	452,30	15,00	5,20	5,40	10,24	0,98	9,7E-04	10112,88
	2	210	503,20	15,13	5,00	5,20	11,20	1,00	9,0E-04	11926,91
		211	503,20	15,50	4,70	5,10	10,67	0,79	8,7E-04	12097,60
	3	213	524,20	15,20	5,20	5,10	11,56	1,12	1,0E-03	10466,41
		214	524,20	15,40	5,60	5,40	11,26	1,02	9,7E-04	11137,84
	4	216	522,70	15,23	5,20	5,30	11,48	1,05	9,0E-04	12327,73
		217	522,70	15,10	5,70	4,80	11,68	0,92	9,3E-04	12282,16
	5	219	450,30	15,17	5,20	5,20	9,97	0,89	8,5E-04	11349,98
		220	450,30	15,00	5,40	4,90	10,19	1,02	8,8E-04	11052,68
0%	1	222	408,20	15,26	5,20	5,00	8,93	1,03	6,7E-04	12705,03
		223	408,20	15,16	5,20	5,30	9,05	0,87	7,3E-04	12084,80
	2	225	395,20	15,16	5,10	5,00	8,76	0,90	6,9E-04	12219,13
		226	395,20	15,10	5,10	5,10	8,83	0,93	7,4E-04	11489,88
	3	228	359,80	15,46	5,40	5,00	7,67	0,86	6,5E-04	11271,01
		229	359,80	15,10	5,00	5,30	8,04	0,83	6,9E-04	11263,87
	4	231	346,60	15,30	5,30	5,30	7,54	0,69	6,3E-04	11912,33
		232	346,60	15,23	5,10	5,50	7,61	0,92	9,0E-04	7841,29
	5	234	301,30	15,26	5,00	5,20	6,59	0,73	6,4E-04	9894,91
		235	301,30	15,10	5,00	5,10	6,73	0,79	6,0E-04	10785,06
4%	1	237	501,30	14,57	5,00	5,60	12,03	1,13	1,1E-03	10631,95
		239	500,00	15,23	5,10	5,20	10,98	0,86	1,0E-03	10248,53
		241	518,90	14,63	5,50	5,20	12,35	1,22	8,7E-04	13529,49
		243	488,40	15,63	5,00	4,80	10,18	1,07	7,9E-04	12341,47
		245	502,80	14,97	5,10	5,30	11,43	1,03	9,2E-04	11988,80
	2	247	571,70	15,20	5,00	5,30	12,60	0,96	8,7E-04	14206,16
		249	547,60	14,93	5,20	5,20	12,51	0,94	1,0E-03	11900,32
		251	544,50	15,43	5,20	4,90	11,65	1,06	1,0E-03	11175,89
		253	572,60	15,30	4,90	5,30	12,46	1,10	1,0E-03	12021,28
		255	537,20	15,43	4,60	5,20	11,49	1,06	9,2E-04	12015,54
	3	257	511,40	14,90	5,20	5,20	11,73	1,06	1,1E-03	10671,64
		259	544,30	15,07	4,70	5,30	12,21	0,76	1,1E-03	11097,00
		261	537,60	15,17	4,20	5,30	11,90	0,87	9,7E-04	12054,17
		263	542,20	15,13	5,30	4,90	12,06	0,90	1,0E-03	11638,65
		265	541,80	15,17	5,00	5,10	11,99	1,01	9,2E-04	12557,36
	4	267	505,10	15,07	4,80	5,80	11,33	0,94	9,7E-04	11345,70
		269	491,20	15,13	5,00	5,40	10,93	0,92	9,3E-04	11313,93
		271	516,60	15,17	4,60	5,30	11,43	0,82	9,9E-04	11350,87
		273	512,00	15,03	5,00	5,50	11,54	0,88	1,0E-03	10769,75
		275	545,60	15,13	5,20	5,20	12,14	0,85	1,1E-03	10699,24
	5	277	480,40	15,13	4,80	5,30	10,69	0,84	9,8E-04	10609,01
		279	454,60	15,13	5,30	5,10	10,11	0,78	8,3E-04	12017,85
		281	468,10	15,53	5,00	5,00	9,88	0,82	8,6E-04	11187,37
		283	441,70	14,63	5,30	5,30	10,51	0,84	8,8E-04	11647,27
		285	428,80	15,00	5,50	5,40	9,71	0,83	9,4E-04	9933,25

Fuente: Propia

ANEXO E. CONSOLIDADO DE ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

E.1. Análisis de la resistencia a la compresión. Edad 7 días.

Cilindro N°	Limalla	Mezcla N°	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Prom.(MPa)	Desv. Estándar (MPa)	Coef. Variación	Variación respecto al convencional
1	3%	1	16,43	15,35	0,93	6,08	-7,89%
2			14,91				
3			14,72				
4		2	18,86	17,29	1,37	7,94	1,58%
5			16,69				
6			16,32				
7		3	17,34	18,38	1,11	6,06	30,05%
8			18,24				
9			19,56				
10		4	17,76	16,88	1,14	6,76	34,59%
11			15,59				
12			17,30				
13		5	11,92	13,58	1,44	10,58	9,40%
14			14,30				
15			14,51				
16	5%	1	16,82	17,93	2,50	13,92	7,54%
17			16,17				
18			20,78				
19		2	18,47	19,12	0,63	3,29	12,37%
20			19,73				
21			19,18				
22		3	16,88	17,94	1,80	10,04	26,92%
23			16,91				
24			20,02				
25		4	16,63	17,51	0,78	4,46	39,58%
26			18,12				
27			17,78				
28		5	12,42	14,10	1,50	10,66	13,59%
29			15,32				
30			14,55				
31	0%	1	16,75	16,67	0,07	0,44	NA
32			16,61				
33			16,65				
34		2	16,96	17,02	0,32	1,85	
35			16,74				
36			17,36				
37		3	14,22	14,13	1,25	8,85	
38			15,34				
39			12,84				
40		4	12,78	12,54	0,66	5,26	
41			11,80				
42			13,05				
43		5	12,03	12,41	1,56	12,56	
44			11,08				
45			14,13				

Fuente: Propia

Continuación Tabla E1. Análisis de la resistencia a la compresión. Edad 7 días

Cilindro N°	Limalla	Mezcla N°	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Prom.(MPa)	Desv. Estándar (MPa)	Coef. Variación	Variación respecto al convencional
46	4%	1	17,76	17,95	1,10	6,13	7,70%
47			18,02				
48			19,36				
49			19,22				
50			16,61				
51			16,71				
52			18,66				
53			16,25				
54			18,49				
55			18,45				
56		2	20,45	19,32	1,53	7,89	13,55%
57			19,00				
58			16,81				
59			21,53				
60			19,07				
61			21,27				
62			17,39				
63			18,73				
64			19,06				
65			19,93				
66		3	17,45	17,68	1,46	8,27	25,09%
67			16,50				
68			18,61				
69			18,34				
70			18,46				
71			19,29				
72			15,74				
73			15,62				
74			16,94				
75			19,85				
76		4	17,85	17,03	1,02	5,99	35,75%
77			16,26				
78			18,11				
79			18,32				
80			16,72				
81			16,53				
82			15,62				
83			16,40				
84			16,13				
85			18,33				
86		5	14,12	13,33	1,11	8,32	7,43%
87			13,14				
88			15,08				
89			13,24				
90			12,40				
91			13,12				
92			12,29				
93			11,51				
94			13,73				
95			14,71				

Fuente: Propia

E.2. Análisis de la resistencia a la compresión. Edad 14 días.

Cilindro N°	Limalla	Mezcla N°	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Prom.(MPa)	Desv. Estándar (MPa)	Coef. Variación	Variación respecto al convencional
96	3%	1	17,39	19,43	1,86	9,57	4,07%
97			21,02				
98			19,87				
99		2	21,51	20,45	1,00	4,88	7,46%
100			20,29				
101			19,54				
102		3	21,40	20,68	1,03	4,96	13,57%
103			19,50				
104			21,14				
105		4	19,50	19,14	1,73	9,05	15,77%
106			17,26				
107			20,67				
108		5	15,96	16,84	0,89	5,31	18,12%
109			17,75				
110			16,80				
111	5%	1	21,86	20,81	1,48	7,13	11,48%
112			19,11				
113			21,45				
114		2	20,37	21,54	1,08	5,04	13,20%
115			22,51				
116			21,74				
117		3	21,61	21,45	0,74	3,47	17,81%
118			22,11				
119			20,64				
120		4	20,26	20,73	1,68	8,08	25,39%
121			22,59				
122			19,34				
123		5	19,57	18,61	1,62	8,73	30,58%
124			19,52				
125			16,73				
126	0%	1	20,70	18,67	1,76	9,46	NA
127			17,75				
128			17,55				
129		2	20,05	19,03	1,00	5,27	
130			18,97				
131			18,05				
132		3	15,86	18,21	2,03	11,17	
133			19,51				
134			19,25				
135		4	16,35	16,53	0,16	0,98	
136			16,65				
137			16,60				
138		5	14,20	14,25	0,23	1,60	
139			14,50				
140			14,05				

Fuente: Propia

Continuación Tabla E.2. Análisis de la resistencia a la compresión. Edad 14 días

Cilindro N°	Limalla	Mezcla N°	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Prom.(MPa)	Desv. Estándar (MPa)	Coef. Variación	Variación respecto al convencional
141	4%	1	16,97	20,10	2,72	13,51	7,70%
142			17,18				
143			24,03				
144			18,73				
145			17,60				
146			23,22				
147			18,50				
148			22,86				
149			19,75				
150			22,20				
151		2	22,68	22,27	0,94	4,23	17,05%
152			20,26				
153			22,43				
154			23,05				
155			21,53				
156			23,39				
157			22,89				
158			22,94				
159			21,86				
160			21,69				
161		3	17,81	21,76	1,92	8,83	19,49%
162			23,34				
163			22,29				
164			20,64				
165			24,33				
166			22,24				
167			20,81				
168			20,10				
169			22,97				
170			23,03				
171		4	21,65	19,85	1,40	7,05	20,07%
172			16,89				
173			20,44				
174			20,80				
175			19,24				
176			18,42				
177			20,21				
178			19,69				
179			21,18				
180			20,01				
181		5	18,87	19,24	1,35	7,00	35,02%
182			20,27				
183			19,10				
184			17,73				
185			20,97				
186			17,95				
187			17,52				
188			19,02				
189			21,50				
190			19,51				

Fuente: Propia

E.3. Análisis de la resistencia a la compresión. Edad 28 días.

Cilindro N°	Limalla	Mezcla N°	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Prom.(MPa)	Desv. Estándar (MPa)	Coef. Variación	Variación respecto al convencional
191	3%	1	21,54	22,02	1,28	5,81	2,94%
192			23,48				
193			21,06				
194		2	25,35	25,17	2,14	8,50	13,53%
195			22,95				
196			27,22				
197		3	27,98	27,16	0,93	3,43	36,18%
198			27,36				
199			26,15				
200		4	27,29	26,89	0,76	2,82	42,49%
201			27,36				
202			26,01				
203		5	21,32	23,21	2,13	9,19	34,07%
204			25,52				
205			22,79				
206	5%	1	26,19	23,06	2,74	11,87	7,76%
207			21,11				
208			21,87				
209		2	29,01	28,81	0,25	0,86	29,93%
210			28,53				
211			28,88				
212		3	29,04	28,63	0,69	2,42	43,55%
213			29,03				
214			27,83				
215		4	29,19	28,06	1,47	5,24	48,70%
216			28,59				
217			26,40				
218		5	25,48	25,06	2,02	8,05	44,78%
219			26,83				
220			22,87				
221	0%	1	22,70	21,39	1,19	5,56	NA
222			20,38				
223			21,10				
224		2	21,61	22,17	0,85	3,84	
225			23,15				
226			21,76				
227		3	19,75	19,95	0,27	1,33	
228			19,84				
229			20,25				
230		4	18,85	18,87	0,18	0,95	
231			18,70				
232			19,06				
233		5	17,05	17,31	0,76	4,42	
234			16,71				
235			18,17				

Fuente: Propia.

Continuación Tabla E.3. Análisis de la resistencia a la compresión. Edad 28 días.

Cilindro N°	Limalla	Mezcla N°	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Prom.(MPa)	Desv. Estándar (MPa)	Coef. Variación	Variación respecto al convencional
236	4%	1	29,66	29,12	1,77	6,08	36,12%
237			30,34				
238			28,95				
239			24,76				
240			28,33				
241			31,18				
242			28,90				
243			29,14				
244			30,66				
245			29,29				
246		2	29,80	30,47	1,44	4,73	37,41%
247			30,40				
248			30,46				
249			29,89				
250			32,39				
251			27,57				
252			29,84				
253			30,55				
254			31,10				
255			32,70				
256		3	29,21	29,34	1,24	4,24	47,11%
257			26,94				
258			30,27				
259			27,25				
260			29,74				
261			30,24				
262			30,00				
263			30,37				
264			29,98				
265			29,41				
266		4	27,95	27,02	2,79	10,31	43,20%
267			28,12				
268			26,96				
269			19,26				
270			28,21				
271			26,90				
272			28,10				
273			28,53				
274			28,55				
275			27,64				
276		5	26,23	24,63	1,51	6,14	42,31%
277			25,81				
278			25,28				
279			25,00				
280			26,38				
281			24,41				
282			24,67				
283			23,68				
284			23,54				
285			21,34				

Fuente: Propia

ANEXO F. VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD RESPECTO A FORMULAS ESTABLECIDAS.

Tabla F1. Análisis módulo de elasticidad.

Limalla	Cilindro N°	Mezcla	E1 (MPa)*		E2 (MPa)**			E3 (MPa)***		
			Resultado	Promedio	Resultado	Promedio	Comparación	Resultado	Promedio	Comparación
3%	192	1	10066,42	9975,51	22772,27	22170,02	-55,00%	9084,68	8844,42	12,79%
	193		9884,60		21567,77			8604,17		
	195	2	10774,79	11192,17	22517,08	23519,11	-52,41%	8982,88	9382,62	19,29%
	196		11609,55		24521,13			9782,37		
	198	3	10707,06	11418,37	24585,68	24308,94	-53,03%	9808,12	9697,71	17,74%
	199		12129,69		24032,19			9587,31		
	201	4	9475,92	9869,64	24582,49	24277,08	-59,35%	9806,84	9685,01	1,91%
	202		10263,36		23971,67			9563,17		
	204	5	11724,46	11229,40	23741,91	23089,14	-51,37%	9471,51	9211,09	21,91%
	205		10734,35		22436,36			8950,68		
5%	207	1	10186,03	10149,46	21593,95	21787,19	-53,42%	8614,61	8691,70	16,77%
	208		10112,88		21980,44			8768,79		
	210	2	11926,91	12012,26	25105,72	25182,46	-52,30%	10015,58	10046,19	19,57%
	211		12097,60		25259,19			10076,81		
	213	3	10466,41	10802,13	25321,59	25058,31	-56,89%	10101,70	9996,67	8,06%
	214		11137,84		24795,03			9891,64		
	216	4	12327,73	12304,95	25132,18	24639,75	-50,06%	10026,14	9829,69	25,18%
	217		12282,16		24147,31			9633,24		
	219	5	11349,98	11201,33	24346,59	23410,96	-52,15%	9712,74	9339,48	19,94%
	220		11052,68		22475,33			8966,22		
0%	222	1	12705,03	12394,92	21216,71	21403,52	-42,09%	8464,11	8538,64	45,16%
	223		12084,80		21590,33			8613,16		
	225	2	12219,13	11854,50	22614,65	22269,87	-46,77%	9021,80	8884,26	33,43%
	226		11489,88		21925,08			8746,71		
	228	3	11271,01	11267,44	20933,81	21041,41	-46,45%	8351,25	8394,18	34,23%
	229		11263,87		21149,00			8437,10		
	231	4	11912,33	9876,81	20324,25	20421,31	-51,63%	8108,08	8146,80	21,24%
	232		7841,29		20518,37			8185,52		
	234	5	9894,91	10339,99	19212,11	19623,45	-47,31%	7664,41	7828,50	32,08%
	235		10785,06		20034,79			7992,60		

Fuente: Propia

Continuación Tabla F1. Análisis módulo de elasticidad.

Limalla	Cilindro N°	Mezcla	E1 (MPa)*		E2 (MPa)**			E3 (MPa)***		
			Resultado	Promedio	Resultado	Promedio	Comparación	Resultado	Promedio	Comparación
4%	237	1	10631,95	11748,05	25889,62	25266,41	-53,50%	10328,31	10079,69	16,55%
	239		10248,53		23385,21			9329,21		
	241		13529,49		26245,64			10470,33		
	243		12341,47		25373,33			10122,34		
	245		11988,80		25438,27			10148,25		
	247	2	14206,16	12263,84	25913,22	25827,58	-52,52%	10337,72	10303,56	19,03%
	249		11900,32		25693,72			10250,15		
	251		11175,89		24677,51			9844,75		
	253		12021,28		25976,17			10362,83		
	255		12015,54		26877,27			10722,32		
	257	3	10671,64	11603,76	24393,66	25232,73	-54,01%	9731,51	10066,25	15,27%
	259		11097,00		24533,40			9787,26		
	261		12054,17		25844,16			10310,17		
	263		11638,65		25903,00			10333,64		
	265		12557,36		25489,41			10168,65		
	267	4	11345,70	11095,90	24924,04	23948,25	-53,67%	9943,10	9553,82	16,14%
	269		11313,93		20627,20			8228,94		
	271		11350,87		24376,69			9724,75		
	273		10769,75		25102,22			10014,18		
	275		10699,24		24711,11			9858,15		
	277	5	10609,01	11078,95	23876,63	23036,45	-51,91%	9525,25	9190,07	20,55%
	279		12017,85		23500,59			9375,24		
	281		11187,37		23221,51			9263,90		
	283		11647,27		22872,03			9124,48		
	285		9933,25		21711,50			8661,50		

* E1: Módulo de elasticidad obtenido en el proyecto

** E2: Módulo de elasticidad obtenido con la Ecuación 7 (NSR-10)

** E3: Módulo de elasticidad obtenido con la Ecuación 8 (Porrás Álvarez y Torrado Gómez)

Fuente: Propia

