

PROYECTO DE GRADO

**Evaluación del uso de cascarilla de laminación como agregado fino en la
elaboración de concreto convencional**

LINA MARIA ROJAS HENAO

Cód. 201010028004

SIMON SIERRA RESTREPO

Cód. 201117500004

Asesor:

Msc. LUIS FERNANDO TIRADO

Master en Gestión y Auditorías Ambientales

Coasesor:

ANDRES MAURICIO NUÑEZ PhD.

Doctor en ingeniería de la construcción

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MEDELLÍN

2016

**Evaluación del uso de cascarilla de laminación como agregado fino en la
elaboración de concreto convencional**

LINA MARIA ROJAS HENAO

Cód. 201010028004

SIMON SIERRA RESTREPO

Cód. 201117500004

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO DE PROCESOS**

Asesor:

Msc. LUIS FERNANDO TIRADO

Master en Gestión y Auditorías Ambientales

Coasesor:

ANDRES MAURICIO NUÑEZ PhD.

Doctor en ingeniería de la construcción

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MEDELLÍN

2016

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por darnos la inteligencia, paciencia y la capacidad para ejercer y culminar con éxito este trabajo de grado.

A nuestras familias por el apoyo brindado durante toda nuestra formación como ingenieros y especialmente en la realización de este proyecto.

A la empresa GERDAU DIACO S.A y Edwin Andres Herrera, jefe de planta por la información suministrada y el material proporcionado para la realización de este trabajo.

A nuestro asesor del trabajo de grado, Luis Fernando Tirado por su asesoría para el buen desarrollo del trabajo, y a nuestro coasesor Andres Mauricio Nuñez por compartir todo su conocimiento con nosotros y permitir que el desarrollo del proyecto de grado se hiciera de la mejor forma posible.

A los laboratoristas del laboratorio de Suelos, Concretos y Pavimentos de la universidad EAFIT y a su coordinador Vladimir Rodríguez por la buena disposición a la hora de realizar las pruebas que comprendieron este proyecto.

A John Jaime Querubín, Técnico de laboratorio del Centro Argos para la innovación por la asesoría prestada y sus recomendaciones.

Finalmente agradecemos al Centro Argos para la Innovación por los análisis de FRX, DRX y densidad realizados a nuestro material de interés durante el proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	12
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1.	Objetivo General.....	15
2.2.	Objetivos Específicos	15
3.	MARCO TEÓRICO	16
3.1.	Descripción del proceso de laminación del acero	16
3.2.	Propiedades de la cascarilla de laminación	17
3.3.	Sostenibilidad en la producción de concreto.....	18
3.4.	Agregados en concreto.....	19
3.4.1.	Agregados finos.....	20
a.	Arena.....	20
3.4.2.	Agregados Gruesos.....	20
b.	Grava	20
3.4.3.	Densidad, humedad y absorción en los agregados	21
3.5.	Cemento.....	22
3.6.	Resistencia a la compresión	22
4.	METODOLOGÍA	23
4.1.	Revisión Bibliográfica	23
4.2.	Caracterización física de los agregados	25
4.2.1.	Análisis granulométrico.....	25
4.2.2.	Humedad.....	25
4.2.3.	Absorción y densidad de los agregados	25
4.2.4.	Masa unitaria suelta y compacta	26

4.2.5.	Caracterización de la cascarilla de laminación.....	26
4.2.6.	Determinación de la composición química de la cascarilla	27
4.2.7.	Determinación de la composición mineralógica de la cascarilla.....	27
4.2.8.	Densidad de la cascarilla de laminación	27
4.3.	Caracterización del cemento gris de uso general, Argos	28
4.4.	Formulación del diseño de mezclas de concreto	28
4.5.	Elaboración de Concreto convencional.....	29
4.5.1.	Aparatos y herramientas pequeñas para la elaboración de concreto.....	31
4.6.	Manejabilidad	32
4.7.	Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.....	32
4.8.	Análisis estadístico y económico	33
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
5.1.	Análisis granulométrico de los agregados.....	34
5.2.	Caracterización física de los agregados	38
5.3.	Caracterización de la cascarilla de laminación.....	40
5.4.	Diseño y Elaboración de mezclas de concreto.....	47
5.6.	Análisis estadístico	54
5.6.1.	Análisis preliminar de los datos	54
5.6.2.	Análisis ANOVA de un factor a 3, 7 y 28 días de falla	56
5.6.3.	Análisis de supuestos del modelo ANOVA	57
5.6.4.	Análisis de comparación de medias.....	58
5.7.	Análisis Económico	60
5.7.1.	Mercado objetivo	61
5.7.2.	Canal de distribución	62
5.7.3.	Ventajas competitivas.....	64
5.7.4.	Costo Materias primas.....	65

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
7. BIBLIOGRAFIA.....	72
ANEXO A. METODOLOGÍA: CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	76
ANEXO B. FORMULACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLAS.....	84
ANEXO C. ENSAYO PARA MEDIR ASENTAMIENTO.....	98
ANEXO D. RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO.....	99
ANEXO E. GRÁFICAS DE NORMALIDAD Y HOMOCEDASTICIDAD.....	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los agregados según su masa unitaria	19
Tabla 2. Clasificación de los agregados según el tamaño de sus partículas	21
Tabla 3. Normas utilizadas en la caracterización de los agregados	22
Tabla 4. Muestras de cascarilla de laminación.....	26
Tabla 5. Parámetros químicos	28
Tabla 6. Propiedades físicas y químicas	28
Tabla 7. Procedimiento de diseño.....	29
Tabla 8. Plan de ensayos para la elaboración de cilindros de concreto	30
Tabla 9. Resultado análisis granulométrico arena.....	34
Tabla 10. Resultado análisis granulométrico cascarilla de laminación	34
Tabla 11. Resultado análisis granulométrico grava.....	35
Tabla 12. Humedad natural de los agregados	39
Tabla 13. Densidad aparente y absorción de la arena	39
Tabla 14. Absorción de la cascarilla de laminación.....	39
Tabla 15. Densidad aparente y absorción de la grava	39
Tabla 16. Masa unitaria suelta (Proceso de paleo)	39
Tabla 17. Masa unitaria compacta (Proceso de apisonamiento)	40
Tabla 18. Composición química de la cascarilla de laminación para diferentes tamaños de muestra por determinación de FRX	41
Tabla 19. Composición mineralógica de la cascarilla de laminación para diferentes tamaños de muestra por determinación de DRX	42
Tabla 20. Densidad de la cascarilla de laminación por el método picnómetro de Helio....	47
Tabla 21. Resultados de la elaboración de mezclas de concreto.....	47
Tabla 22. Procedimiento de mezclado para mezclas con cascarilla de laminación	48
Tabla 23. Estadística descriptiva de los datos para cada uno de los días de falla	54
Tabla 24. Análisis ANOVA de un factor para 3, 7 y 28 días de falla	56
Tabla 25. Test de Levene	57
Tabla 26. Test de normalidad de Shapiro Wilk.....	58
Tabla 27. Comparación de medias, análisis de Tukey para 3 días de falla	59
Tabla 28. Comparación de medias, análisis de Tukey para 7 días de falla	59

Tabla 29. Comparación de medias, análisis de Tukey para 28 días de falla	60
Tabla 30. Costo de materias primas en la elaboración de concreto en diferentes zonas del país.....	67
Tabla 31. Costo del metro cúbico de concreto en diferentes zonas del país	67
Tabla 32. Consumo promedio de concreto por regiones.....	68
Tabla 33. Recomendación granulométrica para agregado fino	76
Tabla 34. Recomendación granulométrica para agregado grueso	77
Tabla 35. Recomendación granulométrica seleccionada para la grava.....	78
Tabla 36. Clasificación del agregado de acuerdo con el valor del módulo de finura.....	79
Tabla 37. Masa mínima de la muestra para cada agregado	79
Tabla 38. Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación.	84
Tabla 39. Cantidad aproximada de aire esperado en concreto	85
Tabla 40. Requerimiento aproximado de agua de mezclado	86
Tabla 41. Resistencia promedio requerida.....	87
Tabla 42. Relación agua-cemento correspondiente a una resistencia a la compresión....	87
Tabla 43. Peso seco y volumen absoluto de los ingredientes por metro cubico de concreto.	91
Tabla 44. Peso húmedo de los ingredientes para un metro cubico de concreto.....	93
Tabla 45. Peso húmedo para 15 L de mezcla de concreto	93
Tabla 46. Contenido de cascarilla y arena para cada mezcla.	94
Tabla 47. Peso seco de los ingredientes para cada una de las mezclas.....	95
Tabla 48. Peso húmedo de los ingredientes para cada mezcla por metro cubico de concreto	96
Tabla 49. Peso húmedo de ingredientes para 15 L de mezcla de concreto	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Barras cuadradas, Platinas, Barras lisas, perfiles (Fuente propia)	17
Figura 2. Cascarilla de laminación proveniente del proceso de laminación en frío de GERDAU DIACO S.A (Fuente propia).	18
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología.....	24
Figura 4. Cemento gris y agregados usados en la elaboración de concreto convencional	31
Figura 5. Cono para medir asentamiento.....	31
Figura 6. Prensa hidráulica marca ELE.....	33
Figura 7. Difractograma para tamaño de muestra retenido malla 50 ASTM.....	43
Figura 8. Difractograma para tamaño de muestra retenido malla 60 ASTM.....	44
Figura 9. Difractograma para tamaño de muestra retenido malla ASTM 200.....	45
Figura 10. Difractograma para tamaño de muestra retenido colector.....	46
Figura 11. Manejabilidad en cm de cada una de las mezclas para las diferentes relaciones de agua cemento. Mezcla 1 (Círculo), Mezcla 2 (cuadrado), Mezcla 3 (Triángulo), Mezcla 4 (Rombo), Mezcla 5 (Equis).	49
Figura 12. Cilindros de concreto	50
Figura 13. Tanque de curado y especímenes cilíndricos	50
Figura 14. Resistencia a la compresión para cada una de las edades de falla. Mezcla 1 (Equis), Mezcla 2 (Rombos), Mezcla 3 (Triángulo), Mezcla 4 (Cuadrado), Mezcla 5 (Círculos).....	52
Figura 15. Resistencia a la compresión a 3,7 y 28 días versus % sustitución de cascarilla. 3 días (Cuadrados), 7 días (Triángulos), 28 días (Equis).....	52
Figura 16. Resistencia a la compresión versus la relación agua cemento para cada una de las mezclas. Mezcla 1 (Círculos), Mezcla 2 (cuadrados), Mezcla 3 (Triángulos), Mezcla 4 (Rombos), Mezcla 5 (Equis)	53
Figura 17. Corte longitudinal a las mezclas de concreto elaboradas. 0% cascarilla (1), 15 % cascarilla (2), 30 % cascarilla (3), 45% cascarilla (4), 60% cascarilla (5)	53
Figura 18. Representación gráfica de los promedios de resistencia para cada nivel del factor, mezcla 1 (M1), mezcla 2 (M2), mezcla 3 (M3), mezcla 4 (M4), mezcla (M5). Para 3 días de falla	55

Figura 19. Representación gráfica de los promedios de resistencia para cada nivel del factor, mezcla 1 (M1), mezcla 2 (M2), mezcla 3 (M3), mezcla 4 (M4), mezcla (M5). Para 7 días de falla	55
Figura 20. Representación gráfica de los promedios de resistencia para cada nivel del factor, mezcla 1 (M1), mezcla 2 (M2), mezcla 3 (M3), mezcla 4 (M4), mezcla (M5). Para 28 días de falla	56
Figura 21. Ruta de comercialización de cascarilla en Antioquia (Rojo) Holcim, (Azul) Cemex, (Verde) Argos	62
Figura 22. Ruta de comercialización de cascarilla en Valle del cauca (Rojo) Holcim, (Azul) Cemex, (Verde) Argos	63
Figura 23. Ruta de comercialización de cascarilla en Boyacá (Rojo) Holcim, (Azul) Cemex, (Verde) Argos	63
Figura 24. Ruta de comercialización de cascarilla en Cundinamarca (Rojo) Holcim, (Azul) Cemex, (Verde) Argos	64
Figura 25. Instalaciones de GERDAU DIACO S.A en Colombia y cantidad de calamina generada (Elaboración Propia)	66
Figura 26. Tamices para ensayo de granulometría	77
Figura 27. Procedimiento de absorción y densidad de la arena	80
Figura 28. Procedimiento de absorción y densidad de la grava	81
Figura 29. Procedimiento por apisonamiento	82
Figura 30. Procedimiento por paleo	83
Figura 31. Ensayo de asentamiento	98
Figura 32. Representación gráfica supuesto de Normalidad a 3 días de falla	100
Figura 33. Representación gráfica supuesto Homocedasticidad a 3 días de falla	100
Figura 34. Representación gráfica supuesto de Normalidad para 7 días de falla	101
Figura 35. Representación gráfica supuesto de Homocedasticidad a 7 días de falla	101
Figura 36. Representación gráfica supuesto de Normalidad para 28 días de falla	102
Figura 37. Representación gráfica supuesto de Homocedasticidad a 28 días de falla ...	102

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curva granulométrica arena	35
Gráfica 2. Curva granulométrica cascarilla de laminación	36
Gráfica 3. Curva granulométrica grava	36
Gráfica 4. Curva granulométrica agregados, Cascarilla (····), Arena (----), Grava (— — —)	37
Gráfica 5. Gráfica de granulometría combinada (Método Fuller & Thompson) (Elaboración propia)	38

1. INTRODUCCIÓN

Una gran cantidad de industrias (producción de hierro y acero, industria de metales no-ferrosos, minería, manufactura de pigmentos, etc.) son responsables de contaminar el medio ambiente a través del vertimiento de metales pesados tales como el arsénico, boro, cadmio, zinc, cobre, cromo, mercurio, plomo. Dichos contaminantes se encuentran presentes en los residuos sólidos tales como las escorias, lodos, polvos, cascarillas, emisiones gaseosas y otros residuos que incluyen además los aceites, las grasas y aguas residuales (Martín Hernández, 2006).

Se estima que en los procesos de fabricación del hierro y el acero se generan alrededor de 500 kg/ton de residuos sólidos de diferente naturaleza (Gaballah et al., 2013), uno de estos residuos es la cascarilla de laminación, también conocida como calamina. Según información suministrada por la empresa GERDAU DIACO S.A., empresa líder en el sector siderúrgico en Colombia (Muñoz M, 2012), la cascarilla de laminación generada en sus principales instalaciones es de 800 toneladas mensuales. En la ciudad de Medellín solo se producen alrededor de 0.5 toneladas al mes que salen de la unidad de corte y doblaje de su empresa ubicada en el municipio de la Estrella.

La cascarilla gruesa con tamaño de partícula entre 0.5 y 5 mm se recicla en su totalidad; sin embargo la cascarilla más fina o lodo de cascarilla (con tamaño de partícula menor a 0.5 mm) que está más contaminada de aceites, acaba en el vertedero (López, Martín, Pérez, López-Delgado, & Alguacil, 2003).

El problema ambiental es solo uno de los múltiples inconvenientes que se presentan por causa de la cascarilla de laminación. La cascarilla formada sobre el acero en el proceso del laminado, forjado o estampado bajo calor puede afectar procesos de acabado del acero impidiendo la buena adherencia de la pintura u otro recubrimiento protector sobre la base del metal, ocasionando así la exposición de la base metálica a la destrucción debido a la corrosión (Herbert, 1963).

La cascarilla de laminación es un residuo aprovechable cuyo uso se ha venido desarrollando a nivel mundial específicamente en el sector de la construcción. Las

adiciones y nuevos agregados en la elaboración de morteros y concretos son empleados cada día en una mayor proporción con el fin de reducir los impactos ambientales causados por los materiales convencionales, además en el sector de la construcción, se ha ido observando una tendencia a la construcción sustentable, también conocida como “construcción verde”, la cual promueve el uso de materia prima proveniente de residuos o subproductos de fábricas industriales, como sustituto de los componentes del concreto (R. A. C. Hernández, Durán, & Bustos, 2014). Por lo tanto, al obtener un producto donde se use la cascarilla de laminación y se garantice la calidad del producto, éste se podrá comercializar de forma más fácil considerando además que la construcción es hoy en día un motor de la economía nacional y cada vez se usa más concreto por ser considerado un material que proporciona buena estabilidad a las edificaciones.

No hay mucha información en cuanto a la utilización de cascarilla de laminación de origen industrial como agregado fino para la elaboración de concretos en Colombia; sin embargo, existen algunos estudios, informes y patentes desarrollados alrededor del mundo con el fin de reciclar este residuo. Como ejemplo de lo anterior, Singhal y Bunia en su trabajo *Effect of sand replacement by mill scale on the properties of concrete* evaluaron el uso de la cascarilla de laminación en concreto hidráulico como sustituto de agregados finos naturales. Los morteros de cemento fueron preparados variando el contenido del agregado de 0% a 100% para determinar la resistencia a la compresión y tracción. Como resultado se obtuvo una resistencia máxima para una sustitución de arena por cascarilla de laminación del 40% a los 28 días del curado. Por otro lado, el concreto con la cascarilla demandó mayor cantidad de agua para mantener la docilidad del material.

En este trabajo se planteó la alternativa de darle valor agregado a un residuo sólido proveniente de la industria siderúrgica con el fin de mejorar la gestión de su manejo, evaluando su uso como agregado fino en mezclas de concreto convencional. Este proyecto consta de tres etapas fundamentales en las cuales se aplicaron metodologías de investigación que permitieron cumplir de manera eficiente con los objetivos que se plantearon, los cuales permitieron encontrar una alternativa de aprovechamiento para este residuo. Se desarrolló una primera etapa de vigilancia tecnológica, en la cual se organizó la información encontrada en revistas especializadas, patentes y trabajos de grado y que se presenta a lo largo de todo el trabajo. En la segunda etapa se presenta la caracterización

de los materiales bajo las diferentes normas técnicas colombianas, la formulación del diseño de mezclas realizada bajo la Norma ACI 211.1 para la elaboración de cilindros de concreto convencional con diferentes proporciones de cascarilla, y los ensayos realizados al concreto en estado fresco y endurecido. Finalmente, mediante una evaluación estadística y económica se determina la viabilidad técnico – económica de este subproducto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica y económica de usar la cascarilla de laminación como agregado fino en la elaboración de concreto convencional.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar de forma física y química la cascarilla de laminación proveniente de la industria metal-mecánica, con el fin de determinar sus propiedades y composición.
- Aplicar un diseño de mezcla para la elaboración de concreto convencional introduciendo la cascarilla de laminación como agregado fino, evaluando la resistencia mecánica del concreto
- Evaluar la factibilidad económica del producto desarrollado (concreto convencional) para ser vendido en Colombia.

3. MARCO TEÓRICO

La cascarilla es un subproducto siderúrgico (metal-mecánico) que procede del proceso de laminación del acero en caliente o en frío. La composición química de la cascarilla varía en función del tipo de acero a producir y del proceso empleado. El contenido de hierro es normalmente de un 70 % y contiene trazas de metales no férricos y compuestos alcalinos. La cascarilla en algunos casos está contaminada con restos de lubricantes, otros aceites y grasas procedentes de derrames de los equipos asociados a las operaciones de laminación (Torralba Castelló, Martín Hernández, López Gómez, & Rabanal, 2009). Para garantizar la eliminación de aceites en la cascarilla de laminación se utiliza un tratamiento térmico donde se somete la cascarilla a una temperatura de 450 – 550 °C, obteniendo un producto libre de aceites (Martín Hernández, 2006).

3.1. Descripción del proceso de laminación del acero

El acero es una aleación o combinación de hierro y carbono en proporciones que oscilan entre 0.03% y 2% de carbono. Más del 98% del acero es hierro altamente refinado, por lo tanto el acero es considerado una aleación ferrosa (Albarracín Díaz & Barahona Urbano, 2013). La producción del acero se realiza a partir de dos materias primas: mineral de hierro, este proceso se conoce como siderurgia integrada, y acero reciclado o chatarra, este proceso se conoce como siderurgia semi integrada, GERDAU DIACO S.A. es líder mundial en esta operación, siendo el reciclaje del acero uno de los pilares de su operación (Muñoz M, 2012).

Mediante un proceso de laminación en caliente, aproximadamente a 1100 °C, una palanquilla (resultado final del proceso de acería) se transforma en los productos comerciales como las Barras de Refuerzo, Alambrones y Perfiles (Ver Figura 1). La laminación consiste entonces en la conformación mecánica del acero mediante el paso sucesivo a través de rodillos que reducen el tamaño de su sección (Muñoz M, 2012).

Algunos productos obtenidos por laminación en caliente, tales como planchas, carriles o barras se utilizan directamente. Otros han de sufrir un proceso posterior de laminación en frío. Este proceso tiene el mismo fundamento que el de laminación en caliente, es decir,

producir una deformación permanente aprovechando la ductilidad del acero; para ello se hace pasar el material entre dos cilindros cuya separación es inferior al espesor de la banda original (Enríquez Berciano, Tremps Guerra, Elío de Bengy, & Fernández Segovia, 2010).



Figura 1. Barras cuadradas, Platinas, Barras lisas, perfiles (Fuente propia)

3.2. Propiedades de la cascarilla de laminación

La cascarilla (Ver Figura 2) se forma siguiendo tres etapas en las que intervienen diversos mecanismos, en la primera etapa, el oxígeno es adsorbido en la superficie del acero. En una segunda etapa, se forma una película fina de óxidos (FeO); luego se forman núcleos discretos de óxido en la superficie, los cuales se expanden y eventualmente incrementan su velocidad de crecimiento. En la última etapa, se da el crecimiento de la capa de óxidos constituyendo la cascarilla (Ugarte Díaz, 2013).

La información obtenida por artículos muestra que en la cascarilla están presentes, además de hierro en forma elemental, tres tipos de óxidos: wustita (FeO), hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4). A temperaturas comprendidas entre 700 a 1250 °C, el óxido predominante es la wustita con alrededor de 95%, seguido por la magnetita con un 4% y sólo un 1% de hematita (Ugarte Díaz, 2013). La cascarilla de laminación también contiene

un pequeño porcentaje de metales no férricos y compuestos alcalinos (C, S, P, Ca, Mg, etc.) (Martín Hernández, 2006).



Figura 2. Cascarilla de laminación proveniente del proceso de laminación en frío de GERDAU DIACO S.A (Fuente propia).

3.3. Sostenibilidad en la producción de concreto

El concreto es el material principal de construcción y juega un papel vital en el desarrollo de la civilización actual. El uso masivo de concreto como un material de construcción es debido a sus propiedades versátiles. Propiedades como la fuerza, accesibilidad, durabilidad y abundancia de materias primas hacen que el concreto sea la primera opción como material para muchos de los propósitos de construcción (Brito & Saikia, 2012).

A nivel mundial, más de 10 millones de toneladas de concreto son fabricadas al año. Tales volúmenes requieren enormes cantidades de recursos naturales para la producción de los agregados y el cemento. La industria del concreto puede mejorar su cumplimiento con la sostenibilidad del medio ambiente aumentando la dependencia de materiales reciclados, teniendo en cuenta que los agregados generalmente representan el 70-80% del volumen de concreto (Meyer, 2004).

3.4. Agregados en concreto

Los agregados también llamados áridos son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento Portland en presencia de agua forman un todo compacto (piedra artificial), conocido como mortero o concreto (Rivera, 2013).

En general los agregados pétreos se clasifican en 4 grandes grupos: depósitos aluviales, materiales de arrastre, las calizas, los ígneos y metamórficos. Los agregados constituyen alrededor del 75% en volumen y 70% a 85% en peso, de una mezcla típica de concreto. Los agregados son usados principalmente en la fabricación de mezclas de concreto, asfalto, mortero, como bases y sub-bases en la construcción de vías, drenajes o balasto para vías de ferrocarril (Ordoñez Mejía & Villanueva López, 2013).

Los esfuerzos para utilizar materiales reciclados como sustitutos de los agregados de concreto están ganando importancia, entre ellos se encuentran agregados de concreto reciclado, vidrio post-consumo, neumáticos, etc., sin embargo uno de los materiales que no se ha probado extensamente todavía es la cascarilla de laminación (Singhal & Bhunia, 2015). En la Tabla 1 se puede observar la clasificación de los agregados según su masa unitaria. Considerando que la cascarilla de laminación pueda contener en su composición minerales como hematita y magnetita, un tipo de concreto pesado podría ser viable considerando el alto contenido de estos minerales que puedan estar en la cascarilla de laminación. Por su alta densidad este suele ser usado para proteger de la radicación gamma o X y como contrapeso (Rivera, 2013).

Tabla 1. Clasificación de los agregados según su masa unitaria

Tipo de concreto	Masa unitaria aprox. Del concreto. kg/m ³	Masa unitaria del agregado kg/ m ³	Ejemplo de agregado
Ultraligero	500- 800	-	Piedra pomez Ag. Ultraligero
Ligero	950- 1350 1450- 1950	480- 1040	Perlita Ag. Ultraligero
Normal	2250- 2450	1300- 1600	Agregado de rio o triturado
Pesado	3000- 5600	3400- 7500	Hematita, barita, coridón, magnetita

(Rivera, 2013)

3.4.1. Agregados finos

El agregado fino debe ser durable, fuerte, limpio, duro y libre de materias impuras como polvo, limo, pizarra, álcalis y materias orgánicas. No debe tener más de 5% de arcilla o limos, ni más de 1.5% de materias orgánicas (Harmsen, 2005). En el agregado fino se deben tener en consideración dos elementos, por un lado el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaño ya que algunos materiales pueden tener módulos de finuras aceptables y carecer de una adecuada granulométrica (Villalba & Margarita, 2013).

a. Arena

La arena es un material que proviene de una masa mayor, la cual se fragmenta por procesos naturales como la abrasión, o mediante una trituración mecánica realizada por el hombre. Para referirse a ese material resultante como arena este debe tener un tamaño de partícula entre 0.074 a 4.76 mm (Rivera, 2013). Para la elaboración de concreto el porcentaje de arena no podrá constituir más del (30%) del agregado fino (INVIAS, 2007).

3.4.2. Agregados Gruesos

Los agregados gruesos pueden ser obtenidos tanto de forma artificial con molinos o de forma natural de los lechos de los ríos o de yacimientos naturales y deben tener un tamaño mayor a 4.76 mm. Este no debe contener más de 5% de arcillas o finos ni más de 1.5% de materia orgánica, carbón, entre otros. Dependiendo del tamaño de la estructura se podrá usar un tamaño máximo de partícula, la cual será determinada por el ingeniero encargado de la obra (Harmsen, 2005).

b. Grava

La grava es el resultado de la desintegración natural o abrasión entre rocas, también se puede dar por procesos artificiales como las moliendas. Esta debe tener un tamaño entre 19.1 mm a 50.8 mm (Rivera, 2013).

Tabla 2. Clasificación de los agregados según el tamaño de sus partículas

Tamaño en mm	Denominación más común	Clasificación	Uso como agregado de mezclas
< 0,002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
0.002 – 0.074	Limo	Fracción fina	No recomendable
0.074 – 4.76 #200 - #4	Arena	Agregado fino	Material apto para mortero o concreto
4.76 – 19.1 ¾" - 2 #4 - ¾"	Gravilla	Agregado Grueso	Material apto para concreto
19.1 – 50.8 ¾" - 2"	Grava		Material apto para concreto
50.8 – 152.4 2" - 6"	Piedra		
>152.4 6"	Rajón, Piedra bola		Concreto ciclópeo

(Rivera, 2013)

3.4.3. Densidad, humedad y absorción en los agregados

Para conseguir un concreto de calidad, se hace necesario conocer a detalle los componentes que lo conforman ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades tanto físicas como químicas que posean sus ingredientes, en especial los agregados.

En el campo de la tecnología del concreto, la densidad que interesa es la densidad aparente, debido a que con ella es que se determina la cantidad (en peso) de agregado requerida para un volumen unitario de concreto, porque los poros interiores de las partículas de agregados van a ocupar un volumen dentro de la masa y porque el agua que se aloja dentro de los poros saturables no hace parte del agua de mezclado (GUZMAN, 2001).

Por otro lado, dependiendo de las condiciones de humedad que tenga el agregado, este puede quitar o aportar agua a la mezcla ya que se considera que el agregado se satura y el agua libre es la que reacciona con el cemento. Si la humedad del agregado es mayor que la absorción, el material tiene agua libre y está aportando agua a la mezcla; pero si por el contrario la humedad del agregado es menor que la absorción, el agregado le va a quitar

agua a la mezcla para saturarse (Rivera, 2015). Esto es importante ya que a partir de esto se define la cantidad de agua de la mezcla y no se altera la relación agua - cemento.

Los ensayos especificados bajo las normas NTC colombianas que se realizaron en este trabajo para determinar las características de los agregados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Normas utilizadas en la caracterización de los agregados

Ensayo	Norma empleada
Granulometría o tamizado de materiales granulados	NTC 77
Determinación de la densidad y absorción de agregados gruesos	NTC 176
Determinación de la densidad y absorción de agregados finos	NTC 237
Determinación de la humedad de los agregados	NTC 1776
Determinación de la masa unitaria de los agregados	NTC 92

3.5. Cemento

El cemento es un material pulverizado que contiene en diferentes proporciones, dependiendo su uso, los siguientes materiales: óxido de calcio, alúmina, yeso, sílice y óxido de hierro. Este producto al contacto con la cantidad de agua indicada se puede endurecer tanto en el agua como en el aire (Rivera, 2013). Para la elaboración de concreto convencional se utilizó cemento gris de uso general marca ARGOS.

3.6. Resistencia a la compresión

Este método de ensayo se usa para determinar en especímenes cilíndricos de concreto, tanto cilindros moldeados como núcleos perforados, la resistencia a la compresión. Este método está condicionado a que solo se puede usar cuando el concreto tiene un peso unitario mayor a 800 Kg/m³. En este proceso se usa una máquina de ensayos que por medio de pistones neumáticos comprimen la muestra hasta que esta tiene una falla que hace que su resistencia disminuya considerablemente deteniendo en ese momento el ensayo, el valor máximo obtenido por el equipo es la capacidad de compresión que tiene la muestra (NTC 673).

4. METODOLOGÍA

A continuación, se expone el procedimiento que se llevó a cabo para realizar la etapa experimental del presente proyecto. El proceso de experimentación se dividió en tres etapas; la primera tuvo como finalidad realizar una revisión bibliográfica apoyada en la búsqueda de información, la vigilancia tecnológica a revistas especializadas, patentes, artículos y trabajos de grado. En una segunda etapa, se realizó la caracterización física de los agregados gruesos y finos, y la composición química y mineralógica de la cascarilla de laminación, además se buscó la combinación óptima de las mezclas utilizando el método de diseño de mezclas de la ACI 211.1 modificado a materiales colombianos. Con base en la mezcla óptima obtenida se elaboraron cilindros variando la cantidad de cascarilla por arena en diferentes proporciones de forma volumétrica (0%,15%,30%,45% y 60%). Luego se evaluó la propiedad mecánica de resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días y la manejabilidad del concreto. En la tercera etapa se realizó un análisis estadístico (análisis de varianza de un factor) observando las diferencias entre las mezclas, y un análisis que permitió dar a conocer la viabilidad económica de la cascarilla de laminación como agregado fino en la elaboración de concreto convencional. En la Figura 3 se muestra un diagrama de flujo donde se especifican cada una de las etapas realizadas en la metodología.

4.1. Revisión Bibliográfica

Se realizó una búsqueda de información apoyada en artículos, revistas especializadas, trabajos de grado y patentes, en las cuales se identificaron como palabras claves las siguientes: cascarilla de laminación, agregados, concreto, diseño de mezclas, Normas técnicas colombianas (NTC), manejabilidad.

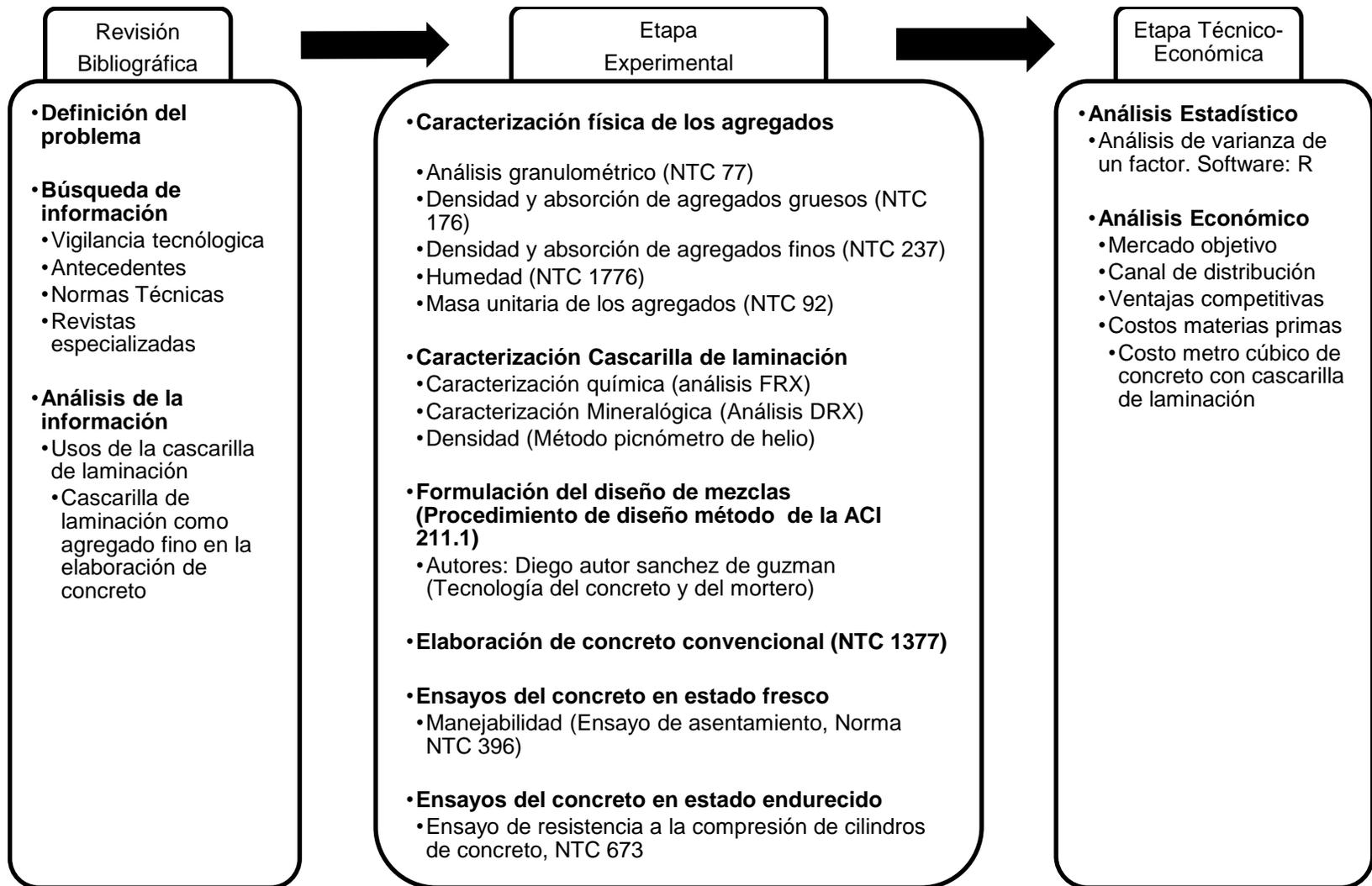


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología

4.2. Caracterización física de los agregados

Los ensayos que comprendieron la determinación de las propiedades físicas tanto para el agregado fino como el agregado grueso fueron: granulometría, humedad, densidad, absorción y masa unitaria.

4.2.1. Análisis granulométrico

La operación de tamizado se realizó conforme a la norma NTC77, que permite determinar la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos, permitiendo conocer la gradación de los agregados que son usados en la elaboración de concreto.

El análisis granulométrico consistió en tamizar el agregado durante ocho minutos por medio de una serie de tamices que tienen aberturas cuadradas. El tamizado se efectuó cumpliendo la norma NTC 77 en la que se describe el tamaño de la muestra a ensayar y el procedimiento a seguir. La tamizadora empleada para este procedimiento fue modelo Controls Automatic sieve shaker D403. La descripción de este ensayo se presenta en el ANEXO A. METODOLOGÍA: CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.

4.2.2. Humedad

Para conocer el contenido de humedad de los agregados finos (arena y cascarilla de laminación) y agregado grueso (grava) se utilizó el método de ensayo descrito por la norma NTC 1776 para determinar el porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado sometida a secado. La descripción de este ensayo se presenta en el ANEXO A. METODOLOGÍA: CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.

4.2.3. Absorción y densidad de los agregados

Se determinó la absorción de los agregados finos utilizando la norma NCT 237, ensayo por el cual se determina la densidad aparente a una condición de temperatura de 23 °C y la

absorción de los agregados. La descripción de este ensayo se presenta en el ANEXO A. METODOLOGÍA: CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.

4.2.4. Masa unitaria suelta y compacta

La masa unitaria se define como la relación entre el peso de una muestra de agregado compuesta de varias partículas y el volumen que ocupan estas partículas agrupadas dentro de un recipiente de volumen conocido (Parra Araque & Sánchez García, 2012). Para la selección de las proporciones de los agregados en la mezcla de concreto fue necesario determinar la masa unitaria en condición compactada y suelta, y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados finos y gruesos.

Para la determinación de la masa unitaria suelta y compacta se utilizó la norma NTC 92. Se utilizó un molde metálico previamente calibrado con capacidad de 4959 cm³ para el agregado fino y de 10091 cm³ para el agregado grueso. El procedimiento de apisonamiento y paleo se presenta en el ANEXO A. METODOLOGÍA: CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.

4.2.5. Caracterización de la cascarilla de laminación

Con el fin de caracterizar la cascarilla de laminación se realizó un análisis granulométrico del material para obtener diferentes tamaños de muestra que posteriormente fueron analizados por el centro ARGOS para la innovación en la universidad EAFIT.

Tabla 4. Muestras de cascarilla de laminación

Identificación de cada muestra	*Estado de la muestra	Cantidad de muestra (gr)
Retenido Malla ASTM 50	3	583
Retenido Malla ASTM 60	3	310
Retenido Malla ASTM 200	3	480
Retenido Colector	3	370

*Tamaño partícula < 1mm (3)

4.2.6. Determinación de la composición química de la cascarilla

La composición química de la cascarilla se determinó a partir de un análisis por fluorescencia de rayos X (FRX). Las pruebas se llevaron a cabo en el centro ARGOS para la innovación en la Universidad EAFIT.

La fluorescencia de rayos X es una técnica espectrométrica que permite detectar y cuantificar la composición química de una muestra analizando la emisión de rayos X de los diferentes elementos presentes en ésta, con excepción de los livianos H, C, Li, Be, B, N, O y de los elementos transuránicos. La FRX es la técnica empleada, normalmente, cuando se quiere conocer con rapidez la composición elemental exacta de una sustancia, pues permite determinar todos los elementos del sistema periódico, desde el flúor hasta el uranio, en muestras sólidas, en polvos y en líquidos. Así mismo mediante la utilización de patrones adecuados es posible realizar el análisis cuantitativo de los elementos presentes (Maldonado Sandoval, 2014). Los análisis de FRX se realizaron en un equipo AXIOS de PANalytical, con radiación de rodio.

4.2.7. Determinación de la composición mineralógica de la cascarilla

La composición mineralógica de la cascarilla de laminación se determinó a partir de un análisis por difracción de rayos X (DRX). Las pruebas se llevaron a cabo en el centro ARGOS para la innovación en la Universidad EAFIT.

La DRX es ampliamente utilizada en la caracterización de materiales, que tienen una estructura cristalográfica definida. Para este procedimiento es ideal que el material sea fino y que cubra toda el área de incidencia de los rayos X para poder obtener buenos resultados (Diana Betancourth G., José Fernando Gómez C., Julio César Mosquera, & Liliana Tirado-Mejía, 2010). Los análisis de DRX se realizaron en un X'Ceerator tipo RTMS detector.

4.2.8. Densidad de la cascarilla de laminación

La densidad específica de la cascarilla de laminación se determinó con el método de picnómetro de helio. Las pruebas se llevaron a cabo en el centro ARGOS para la innovación

en la Universidad EAFIT. El uso del picnómetro de helio se usa para determinar la densidad específica para material sólido ya que este gas es capaz de llenar todos los poros que tiene la muestra, por tal razón da un resultado muy preciso. Este método solo se puede usar en materiales secos, porque en el proceso se debe expandir el helio y esto genera evaporación de agua o solventes volátiles (Sereno, Silva, & Mayor, 2007).

4.3. Caracterización del cemento gris de uso general, Argos

A continuación se presenta la caracterización del cemento gris de uso general utilizado para este proyecto, los datos fueron obtenidos de la Hoja de datos de seguridad Cemento ARGOS del año 2015.

Tabla 5. Parámetros químicos

Parámetros químicos	Especificaciones Argos
Óxido de magnesio MgO, máximo (%)	6.00
Trióxido de azufre, SO, máximo (%)	3.50

Fuente: Ficha técnica cemento gris uso general ARGOS

Tabla 6. Propiedades físicas y químicas

Propiedad	Valor
Apariencia	Polvo Sólido gris
Estado físico	Sólido
pH	12-13 en el agua
Punto de ebullición y Rango	>1832 °F (>1000 °C)
Gravedad Especifica	3.15
Solubilidad	Ligeramente soluble en agua (0.1 a 1.0%)

Fuente: Hoja de datos de seguridad Cemento ARGOS, 2015

4.4. Formulación del diseño de mezclas de concreto

El diseño de mezclas para el concreto convencional es un proceso que consiste en la selección de los materiales disponibles (cemento, agregados y agua) y la cantidad que se necesita de cada uno para garantizar las propiedades requeridas por el cliente y que sea lo más económico posible (GUZMAN, 2001).

El método que se empleó para la formulación del diseño de las mezclas de concreto se basó en el procedimiento del American Concrete Institute A.C.I-211 modificado a materiales colombianos (GUZMAN, 2001), teniendo como principio básico la relación agua/cemento desarrollado por Abrams, que consiste en seguir en forma ordenada una secuencia de pasos para determinar la cantidad de cada material en peso y volumen para 1m³ de concreto (Parra Araque & Sánchez García, 2012). También se especificó una resistencia de diseño mínima de 3000 psi y se utilizó una base de cálculo de 1m³, la cual después se ajustó al volumen necesario para los ensayos. El proceso paso a paso es el indicado en la Tabla 7 y el procedimiento completo se puede encontrar en el ANEXO B. FORMULACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLAS.

Tabla 7. Procedimiento de diseño.

Paso	Descripción
1	Selección del asentamiento
2	Selección del tamaño máximo del agregado
3	Selección del contenido del aire
4	Estimación del contenido de agua del mezclado
5	Determinación de la resistencia de diseño
6	Selección de la relación Agua-Cemento
7	Calculo del contenido del cemento
8	Estimación de las proporciones de agregados
9	Ajustes por humedad de los agregados
10	Ajustes a las mezclas de prueba

(GUZMAN, 2001)

4.5. Elaboración de Concreto convencional

Para elaborar concreto convencional se utilizó cemento gris de uso general, agregado fino, agregado grueso y agua. Se tomaron como referencia las normas NTC3318 (Elaboración de concreto) y NTC1377 (Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio). En estas normas se describen los procedimientos a seguir y lo que se debe usar para poder obtener un concreto que sea reproducible. El plan de ensayo para la elaboración de los cilindros se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 8. Plan de ensayos para la elaboración de cilindros de concreto

Mezcla	% de sustitución de cascarilla	Cantidad de cilindros	Edades de falla	Normas	Ensayos
1	0	6	2 a 3 días	NTC 3318	Resistencia a la compresión
			2 a 7 días	NTC 1377	
			2 a 28 días	NTC 673	
2	15	6	2 a 3 días	NTC 3318	Resistencia a la compresión
			2 a 7 días	NTC 1377	
			2 a 28 días	NTC 673	
3	30	6	2 a 3 días	NTC 3318	Resistencia a la compresión
			2 a 7 días	NTC 1377	
			2 a 28 días	NTC 673	
4	45	6	2 a 3 días	NTC 3318	Resistencia a la compresión
			2 a 7 días	NTC 1377	
			2 a 28 días	NTC 673	
5	60	6	2 a 3 días	NTC 3318	Resistencia a la compresión
			2 a 7 días	NTC 1377	
			2 a 28 días	NTC 673	

De acuerdo al plan de ensayos, se definieron cinco proporciones de mezcla, para cada relación se elaboraron 7 especímenes de concreto, 6 de los cuales fueron sometidos a la prueba de resistencia a la compresión en cilindros normales NTC 673 a intervalos de tiempo de 3, 7 y 28 días, los cinco cilindros restantes fueron utilizados para observar la segregación de los materiales mediante un corte longitudinal.

Como agregado fino se usó arena, la cual fue tamizada según la norma NTC77 para determinar el tamaño de partícula de la muestra. Esta fue reemplazada gradualmente hasta un 60% por la cascarilla de laminación, la cual fue proporcionada por la empresa GERDAU DIACO S.A. localizada en el municipio de La Estrella. Con el fin de obtener los mejores resultados posibles, la empresa nos garantizó la entrega de cascarilla de laminación libre de aceites, si no fuera así se debería hacer un proceso térmico para eliminar las trazas de aceite que pueda contener el producto. La cascarilla de laminación en su composición química posee fuente de hierro, este puede aportar un valor agregado significativo al material a fabricar aportando gran resistencia mecánica, (Ordoñez Mejía & Villanueva López, 2013).

Para los agregados gruesos se tuvo en cuenta las características presentes en la norma NTC174, para garantizar que estos cumplieran con los parámetros para la elaboración en concreto, mientras que el agua cumplió con la norma NTC 3459. Se realizaron cinco

mezclas utilizando una concretadora marca FECON modelo 3 FT. Los primeros siete cilindros fueron de referencia frente a aquellos que tenían como agregado fino la cascarilla de laminación.



Figura 4. Cemento gris y agregados usados en la elaboración de concreto convencional

4.5.1. Aparatos y herramientas pequeñas para la elaboración de concreto

Se utilizaron los siguientes aparatos y herramientas durante la elaboración de mezclas de concreto:

- Moldes plásticos verticales con dimensiones de 10 mm de ancho por 20 mm de alto. Mazo con cabeza de caucho, Herramientas menores como palustres, baldes y flexómetros.
- Varilla lisa de compactación corta de 10 mm de diámetro por 300 mm de longitud
- Cono para medir asentamiento y varilla de compactación larga de 16 mm de diámetro por 600 mm de longitud.
-



Figura 5. Cono para medir asentamiento

4.6. Manejabilidad

La manejabilidad en una mezcla de concreto se define como la cantidad de trabajo interno útil y necesario para producir una compactación completa. Aunque hoy en día no existe ningún método directo para determinarla, hay ensayos que permiten correlacionar esta propiedad en el concreto (GUZMAN, 2001). Para este proyecto se empleó el ensayo de asentamiento con el cual se mide la consistencia o fluidez de una mezcla fresca. Para hacer esta medición se usó un molde de lámina metálica delgada llamado el cono de Abrams (Ver Figura 5), y lo que se midió fue el asentamiento que este tiene en comparación con la altura inicial que es dada por el cono.

Para llevar a cabo el procedimiento se siguieron los pasos descritos en la norma NTC 396 con el fin de que el ensayo fuera replicable para todas las muestras (GUZMAN, 2001). El procedimiento completo se puede encontrar en el ANEXO C. ENSAYO PARA MEDIR ASENTAMIENTO.

4.7. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto

El ensayo consistió en determinar la resistencia a la compresión de cilindros de concreto, este procedimiento está limitado a concretos que tienen un peso unitario mayor a 800 kg/m^3 . Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de Ingeniería Civil de la universidad de EAFIT.

Para este procedimiento se empleó una prensa hidráulica marca ELE con número de inventario 8120100 previamente calibrada, Balanza electrónica marca KERN TB, pie de rey y termohigrómetro marca EXTECH. Los cilindros de concreto cumplieron las características descritas en la norma NTC 1377. Los resultados obtenidos se analizaron bajo la norma NTC 673.



Figura 6. Prensa hidráulica marca ELE

4.8. Análisis estadístico y económico

El análisis estadístico se realizó usando un análisis de varianza de un factor, para el cual se definió como variable independiente o factor las mezclas (5 niveles), y como variable dependiente la resistencia a la compresión. El análisis estadístico se realizó en el *software R*.

Por otro lado, el análisis económico se llevó a cabo teniendo en cuenta los grandes productores de concreto en Colombia (Argos, Cemex y Holcim) y la ubicación de la planta de producción más cercana a las zonas de generación de cascarilla de GERDAU DIACO S.A. También se consideró el costo de las materias primas para la elaboración de un metro cúbico de concreto convencional en cada una de las zonas mencionadas anteriormente.

Para conocer la ubicación de cada una de las plantas de producción de las empresas cementeras, se utilizó el servidor de aplicaciones de mapas Google Maps, con el fin de mostrar gráficamente donde esta cada una con respecto a GERDAU DIACO S.A. Los costos de las materias primas como el cemento, la arena, la grava y el agua se tomaron de la base de datos de Construdata.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis granulométrico de los agregados

En las tablas 9,10 y 11 se presentan los resultados del análisis granulométrico tanto para los agregados finos (arena y cascarilla) como el agregado grueso (grava). Con el fin de mostrar la gradación de los materiales, se elaboraron las curvas granulométricas (Ver gráficas 1, 2, 3 y 4)

Tabla 9. Resultado análisis granulométrico arena

Malla ASTM	Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	% Pasa Norma Icontec-174
3/8	9.51	0	0	0,00	100	100
4	4.76	66.5	6.65	6.65	93.35	95-100
8	2.38	240.9	24.08	30.73	69.27	80-100
16	1.19	262.5	26.24	56.97	43.03	50-85
30	0.595	213.7	21.36	78.33	21.67	25-60
50	0.297	131.7	13.16	91.49	8.51	10-30
100	0.149	54.4	5.43	96.92	3.08	2-10
fondo	0	30.8	3.08	100	0,00	NA
TOTAL		1000,43	100			
MODULO DE FINURA = 3.61						

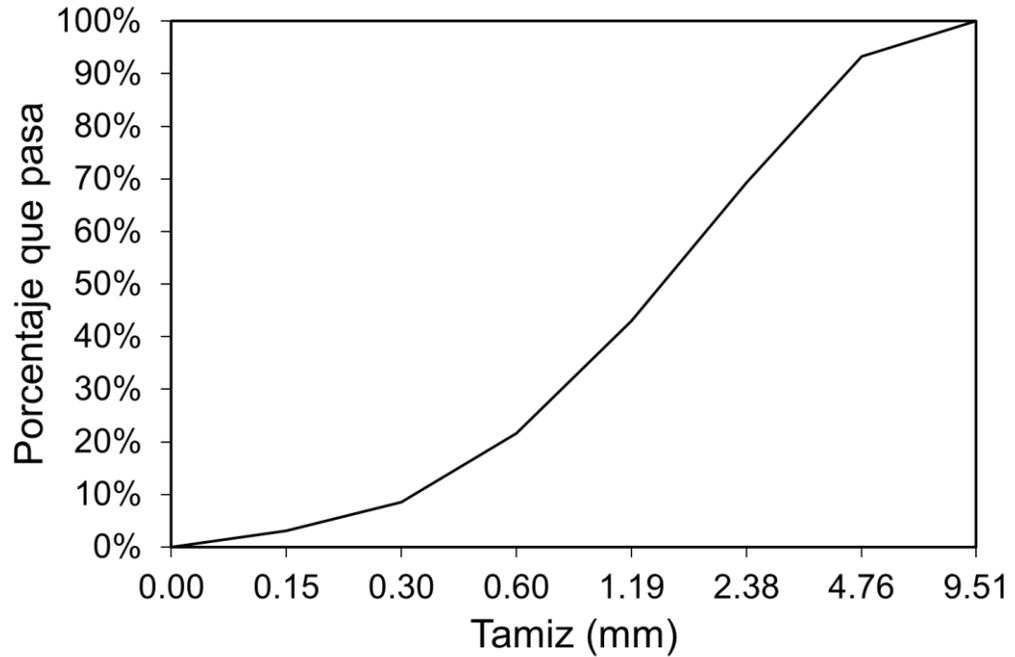
Tabla 10. Resultado análisis granulométrico cascarilla de laminación

Malla ASTM	Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% retenido acumulado	% Pasa	% Pasa Norma Icontec-174
3/8	9,51	0	0	0	100	100
4	4,76	0	0	0	100	95-100
8	2,38	0	0	0	100	80-100
16	1,19	0	0	0	100	50-85
30	0,595	56,5	5,65	5,65	94,35	25-60
50	0,297	312,4	31,24	36,89	63,11	10-30
100	0,149	409,5	40,94	77,83	22,17	2-10
fondo	0	221,7	22,17	100	0	NA
TOTAL		1000,17	100			
MODULO DE FINURA = 1.2						

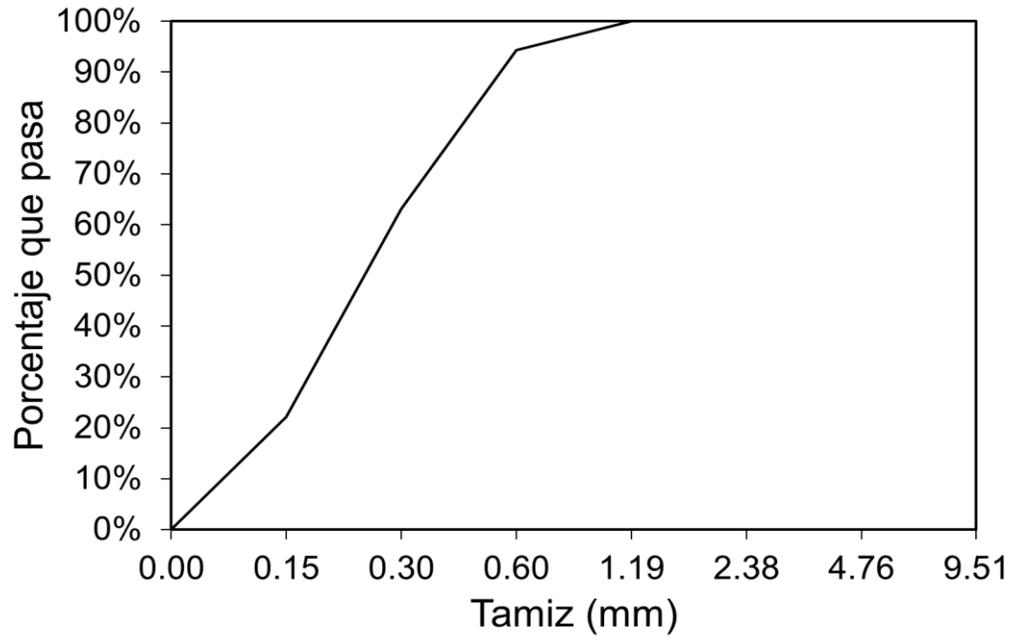
Tabla 11. Resultado análisis granulométrico grava

Malla ASTM	Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% Pasa	% Pasa Norma Icontec-174
1	25,4	0	0	0	100	100
3/4	19	2312,5	23,1	23,1	76,9	90-100
1/2	12,7	3434,5	34,3	57,5	42,5	N/A
3/8	9,51	1933,5	19,3	76,8	23,2	20-55
4	4,76	2216,5	22,2	99	1	0-10
8	2,38	63	0,6	99,6	0,4	0-5
16	1,19	6,5	0,1	99,7	0,3	N/A
fondo	-	34	0,3	100	0	N/A
TOTAL		10000,5	100			
TAMAÑO MAXIMO = 1"			TAMAÑO MAXIMO NOMINAL = 1"			

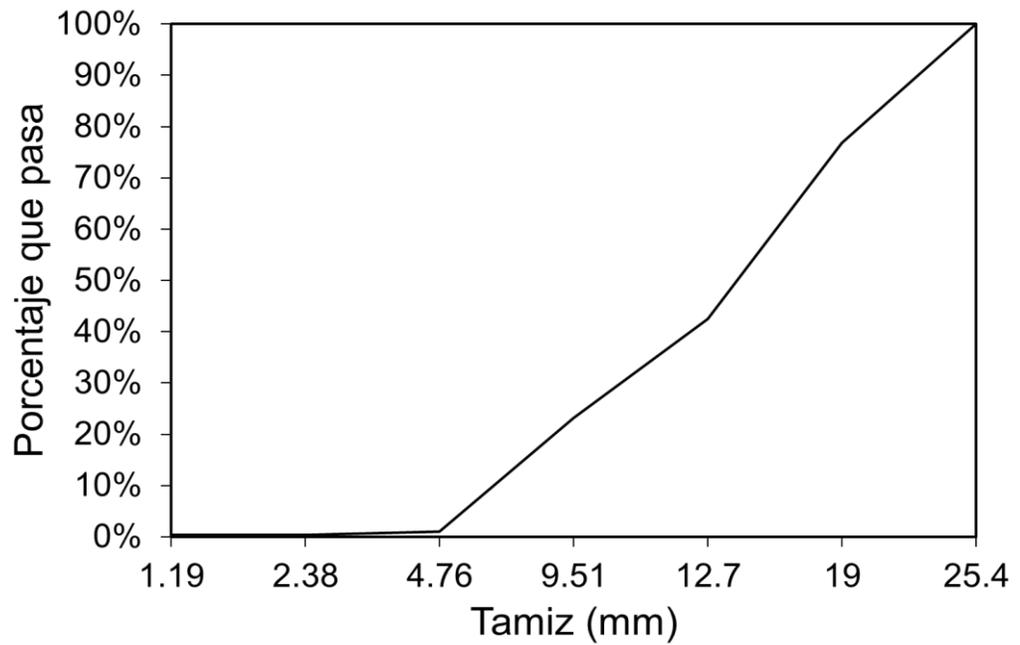
Gráfica 1. Curva granulométrica arena



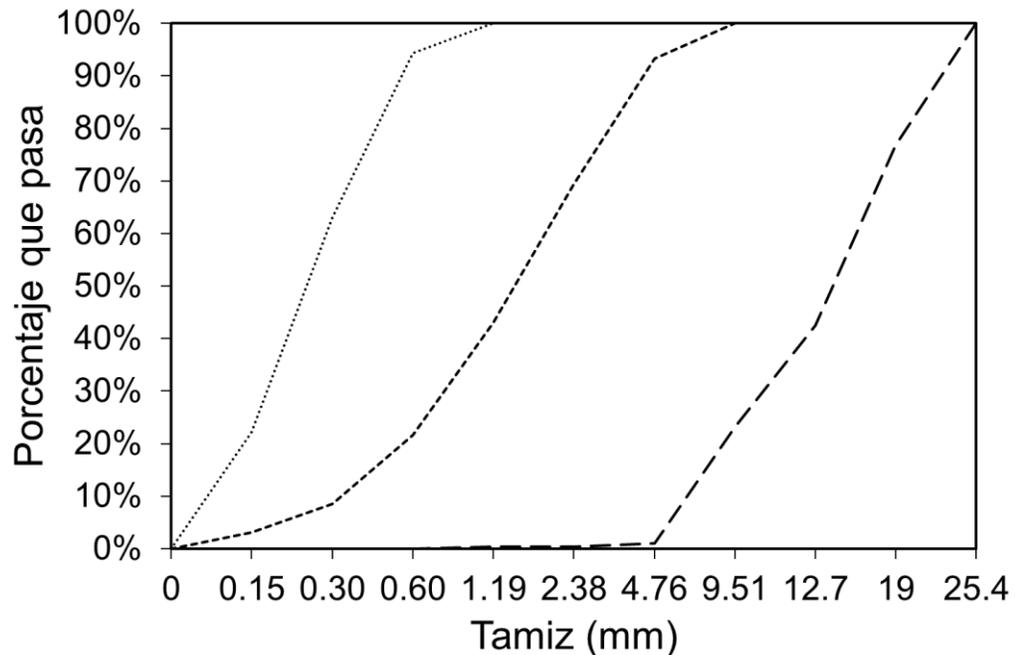
Gráfica 2. Curva granulométrica cascarilla de laminación



Gráfica 3. Curva granulométrica grava



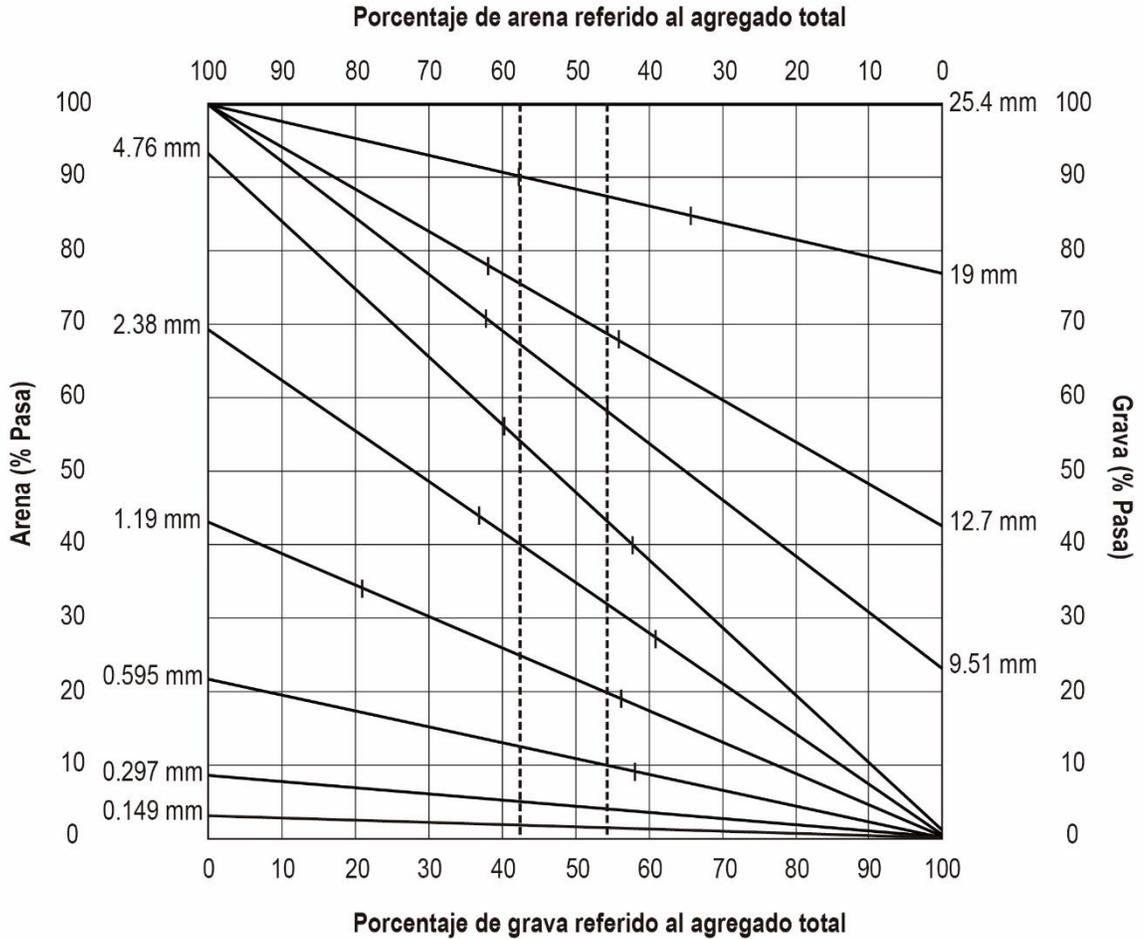
Gráfica 4. Curva granulométrica agregados, Cascarilla (.....), Arena (----), Grava (— — —)



Como se observa en las gráficas 1,2,3 las curvas granulométricas de los agregados no cumplen las especificaciones de la norma NTC 77 ya que se presenta un exceso de material fino y grueso en algunos tamices lo que conlleva a que no haya uniformidad y una adecuada granulometría. Para mejorar estos aspectos se realizó una granulometría combinada utilizando el método de fuller and Thompson (Ver Gráfica 5) obteniendo resultados favorables y una combinación del 55% grava y 45% arena la cual se utilizó en el diseño de mezclas del concreto base. Del análisis granulométrico también se identificó el módulo de finura de los agregados finos encontrando un valor para la arena de 3.61 lo cual indica que es bastante gruesa mientras que para la cascarilla se obtuvo un valor de 1.62 mostrando que es un material muy fino.

Para elaborar la gráfica de Fuller & Thompson se utilizaron los porcentajes que pasan por cada tamiz tanto para el agregado grueso como el agregado fino (Ver Gráfica 5).

Gráfica 5. Gráfica de granulometría combinada (Método Fuller & Thompson) (Elaboración propia)



5.2. Caracterización física de los agregados

Se realizaron dos ensayos para cada agregado con el fin de obtener un promedio de los datos. Los resultados del contenido de humedad, densidad aparente, absorción y masa unitaria suelta y compacta se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 12. Humedad natural de los agregados

Agregado	Masa inicial de la muestra, gr (H)	Masa de la muestra seca, gr (S)	Humedad, % (W)
Arena	1000	970.8	3.06
Cascarilla de laminación	1000	999.8	0.04
Grava	4000	3983.4	0.42

Tabla 13. Densidad aparente y absorción de la arena

Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, gr	500
Masa del frasco volumétrico lleno con agua, gr	475
Masa en el aire de la muestra secada al horno, gr	474.75
Masa del frasco volumétrico con la muestra y el agua, gr	787.5
Valor Densidad (g/cm³)	2.52
Valor absorción (%)	3.71

Tabla 14. Absorción de la cascarilla de laminación

Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, gr	1034.5
Masa en el aire de la muestra secada al horno, gr	994.9
Valor absorción (%)	3.98

Tabla 15. Densidad aparente y absorción de la grava

Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, gr	3983.5
Masa en el aire de la muestra secada al horno, gr	3949.8
Masa en el agua de la muestra de ensayo saturada, gr	2139
Valor Densidad (g/cm³)	2.134
Valor absorción (%)	0.85

Tabla 16. Masa unitaria suelta (Proceso de paleo)

Agregado	Masa del molde (Kg)	Masa del agregado más el molde (Kg)	Volumen del molde (m³)	Masa unitaria del agregado (Kg/m³)
Arena	2.16	9.53	0.00496	1450.56
Cascarilla	2.16	9.86	0.00496	1552.73
Grava	4.34	19.48	0.010	1500.34

Tabla 17. Masa unitaria compacta (Proceso de apisonamiento)

Agregado	Masa del molde (Kg)	Masa del agregado más el molde (Kg)	Volumen del molde (m³)	Masa unitaria del agregado (Kg/m³)
Arena	2.16	10	0.00496	1580.56
Cascarilla	2.16	12.18	0.00496	2020.57
Grava	4.34	21.17	0.010	1668.15

De acuerdo a los resultados anteriores, la cascarilla de laminación presenta un contenido de humedad bajo y un porcentaje de absorción mayor que el de la arena, lo que indica que la cascarilla como agregado quita agua a la mezcla para lograr saturarse y esto conlleva a que se requiera de una mayor cantidad de agua para mantener una adecuada relación de agua cemento.

5.3. Caracterización de la cascarilla de laminación

La siguiente información fue suministrada por el laboratorio del Centro ARGOS para la innovación:

El análisis de los elementos mayoritarios de la cascarilla de laminación (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅) se realizó usando un espectrofotómetro AXIOS marca PANalytical, con energía de rodio. Para el montaje de las muestras en el porta muestras de FRX se utilizó el método de perlas fundidas de 39 mm de diámetro, utilizando una mezcla de tatraborato y metaborato de litio como fundente.

La Tabla 18 muestra la composición química de la cascarilla de laminación obtenida por el análisis de fluorescencia de rayos X (FRX). Los resultados muestran que el porcentaje de óxido de hierro (Fe₂O₃) incrementa significativamente mientras las cantidades de otros óxidos presentes en las muestras (ej. MgO, CaO, MnO) disminuyen. También se observa el valor de pérdida por ignición (LOI) el cual fue de cero por ciento lo que indica que no hay pérdida de peso en la muestra y por tanto no hay presencia de materia orgánica u otros elementos volátiles.

Tabla 18. Composición química de la cascarilla de laminación para diferentes tamaños de muestra por determinación de FRX

Componente	Contenido %			
	50	60	200	Colector
Na ₂ O	-	-	-	0.05
MgO	0.09	0.09	0.15	0.18
Al ₂ O ₃	0.11	0.12	0.22	0.41
SiO ₂	1.72	2.30	2.93	4.46
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.03	0.04
SO ₃	0.10	0.08	0.13	0.12
K ₂ O	-	-	-	0.02
CaO	0.16	0.07	0.25	0.17
V ₂ O ₅	-	-	0.02	-
TiO ₂	0.04	0.02	-	0.04
Cr ₂ O ₃	0.09	0.08	0.08	0.10
MnO	0.80	0.78	0.78	0.76
Fe ₂ O ₃	96.73	96.31	95.33	93.50
NiO	-	-	-	0.01
CuO	0.01	0.01	0.01	0.04
In ₂ O ₃	0.08	0.09	0.08	0.07
LOI	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Laboratorio Centro Argos para la Innovación

De la Tabla 18 también se puede destacar que algunos de los componentes como el óxido de silicio (SiO₂) o los iones sulfato (SO₃) que puedan reaccionar con algunos materiales contribuyentes del cemento se presentan en proporciones muy pequeñas y no presentan una amenaza en la pérdida de resistencia o durabilidad del concreto (Gutiérrez de López, 2003).

A través de la difracción de rayos X (DRX) se determinaron las fases mineralógicas del elemento Fe (Hierro) principal componente de la cascarilla, identificando la forma magnetita (Fe₃O₄) con una concentración de 54.3 %, seguido por la wustita (FeO) con 33% y la hematita (Fe₂O₃) con 12.8%.

Tabla 19. Composición mineralógica de la cascarilla de laminación para diferentes tamaños de muestra por determinación de DRX

Componente	Contenido %			
	50	60	200	Colector
Óxido de Hierro (III)	57.7	54.1	54.1	51.3
Wustita	29.7	33.6	30.3	38.2
Hematita	12.6	12.4	15.6	10.5

Fuente: Laboratorios Centro Argos para la Innovación

El difractómetro utilizado fue X'PER PRO marca PANalytical, con energía de cobre (kV: 45, mA: 40) con detector X'Celerator y un área activa de 2.122 °. El difractograma se tomó en un rango de 5 – 90 grados con un paso de 0,0167°.

En Las figuras 7,8,9 y 10 se muestran los difractogramas obtenidos al medir las muestras de cascarilla de laminación. Se observa una mezcla de fases cristalinas las cuales fueron detectadas como magnetita, hematita y wustita.

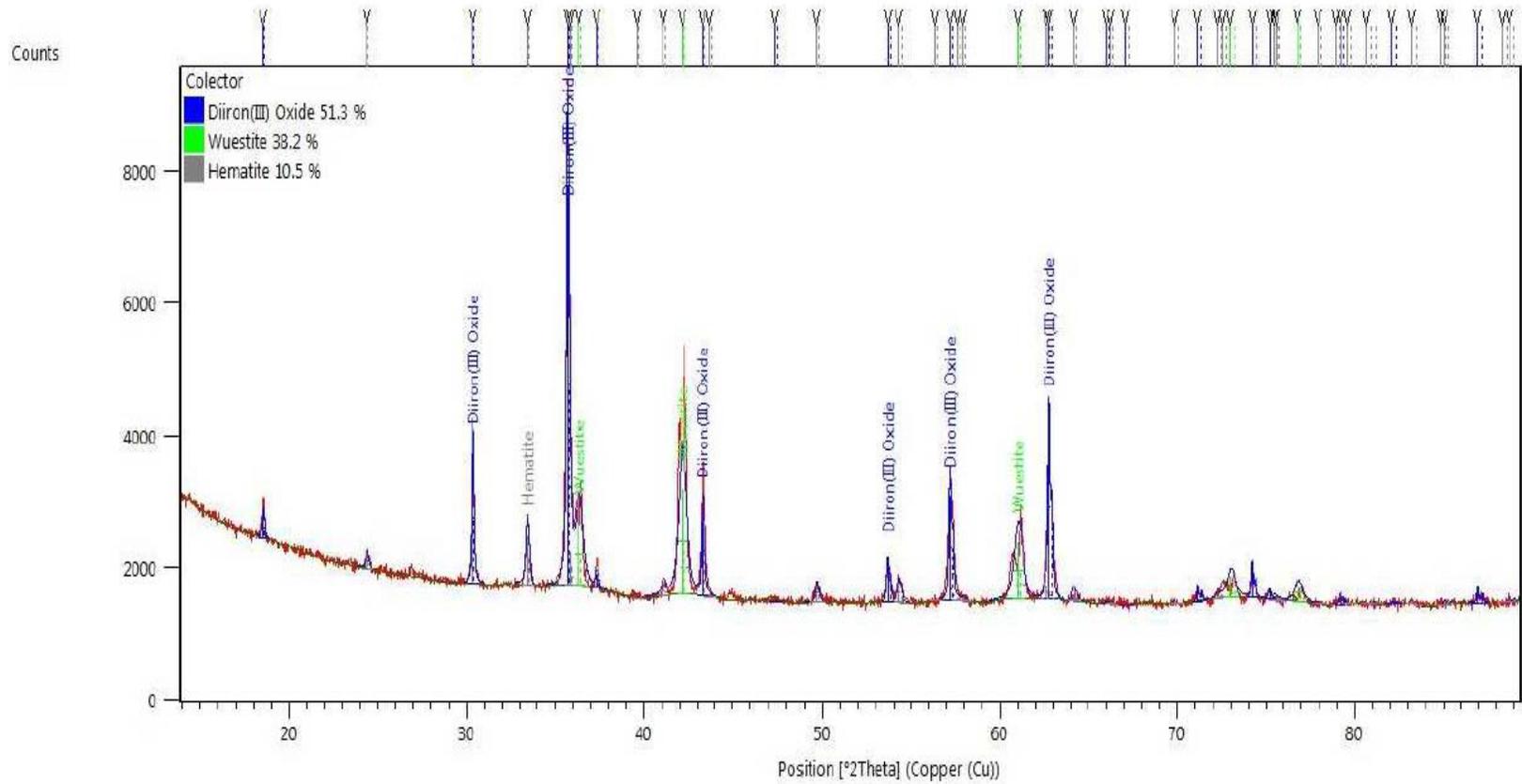


Figura 7. Difractograma para tamaño de muestra retenido malla 50 ASTM

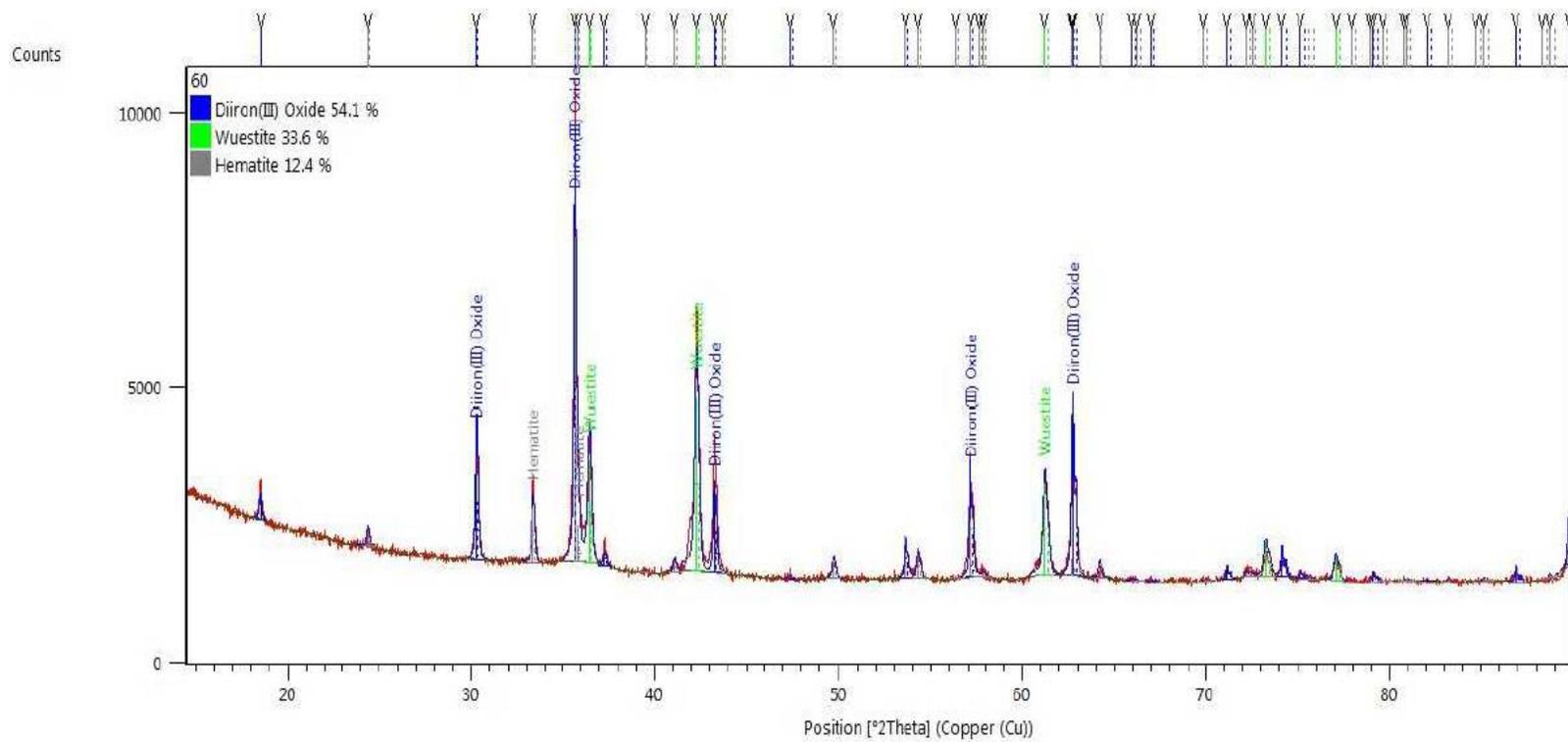


Figura 8. Difractograma para tamaño de muestra retenido malla 60 ASTM

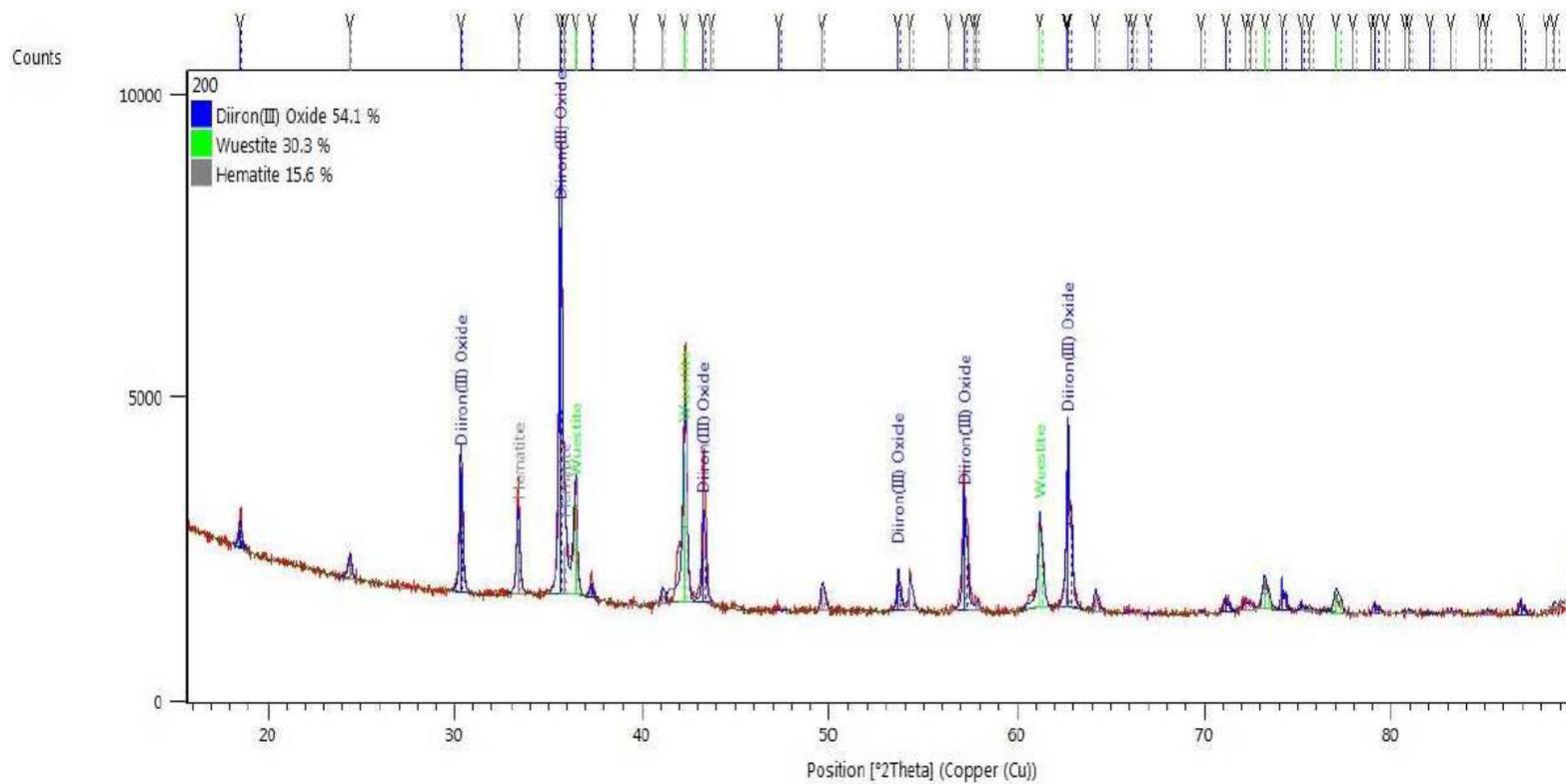


Figura 9. Difractograma para tamaño de muestra retenido malla ASTM 200

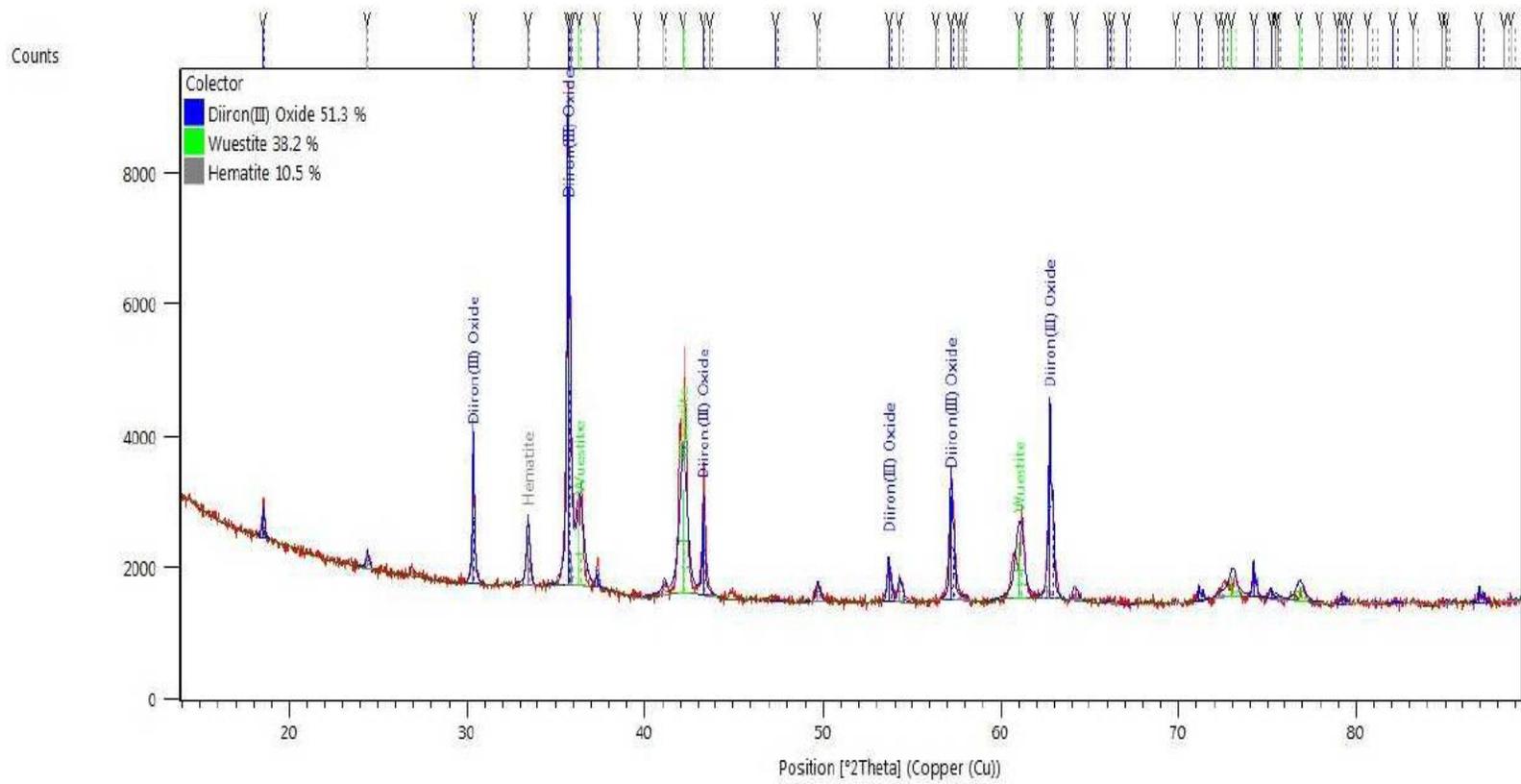


Figura 10. Difractograma para tamaño de muestra retenido colector

Para hallar la densidad de la cascarilla de laminación se utilizó un Picnómetro de Helio ACUUPYC, marca MICROMERITICS. El valor promedio entre las diferentes muestras fue de 5.32 g/cm³ (Ver Tabla 20) valor que es similar al encontrado en algunos artículos donde se ha trabajado con cascarilla de laminación y en los cuales se obtuvieron valores de 5.65 g/cm³ (Furlani & Maschio, 2016), 6.02 g/cm³ (Remya Neelancherry, 2016) y 5.6 g/cm³ (Singhal & Bhunia, 2015). Por otro lado, las densidades y propiedades físicas obtenidas para los demás agregados son similares a trabajos previamente realizados en Colombia.

Tabla 20. Densidad de la cascarilla de laminación por el método picnómetro de Helio

MUESTRA (Retenido malla ASTM)	50	60	200	Colector	Promedio
Densidad (g/cm³)	5.40516	5.41504	5.36162	5.10244	5.32106

5.4. Diseño y Elaboración de mezclas de concreto

El diseño de mezclas de concreto fue llevado a cabo utilizando el método de diseño de la ACI 211.1 La proporción de cemento, agregado fino y agregado grueso (C:AF:AG) para la elaboración del concreto base fue de 1:1.7:2 y se utilizó una relación agua cemento inicial de 0.46. En la siguiente tabla se presenta la información de las proporciones para todas las mezclas, el valor del asentamiento obtenido, la relación agua cemento teórica (luego de los ajustes por humedad y absorción) y la relación agua cemento real (obtenida luego de realizar las mezclas).

Tabla 21. Resultados de la elaboración de mezclas de concreto

Mezcla	% de sustitución	Proporción C:AF:AG	Asentamiento	Relación A/C teórica	Relación A/C real
1	0	1:1.7:2	6	0.46	0.47
2	15	1:1.9:2	6	0.47	0.52
3	30	1:2.2:2	5	0.49	0.57
4	45	1:2.5:2	5	0.51	0.62
5	60	1:2.7:2	5	0.53	0.67

Se puede observar que la relación agua cemento real fue mayor para cada una de las mezclas y aumento de forma directa con la cantidad de sustitución de la cascarilla de laminación debido a que la mezcla requirió una mayor demanda de agua para lograr la

manejabilidad deseada. Al igual que otros estudios presentados en este proyecto la demanda de agua fue un factor influyente a la hora de elaborar la mezcla. En los trabajos presentados por (Singhal & Bhunia, 2015) y (Pereira, Verney, & Lenz, 2011) se incrementó el contenido de agua al encontrar que el agua inicial fue insuficiente para mezclar el concreto y mantener la trabajabilidad fijada.

5.4.1. Elaboración de cilindros de concreto

En cuanto a la elaboración de los cilindros, se realizó un mezclado mecánico en el cual se adicionó el agregado grueso, luego se puso en funcionamiento la mezcladora y se adicionó el agregado fino, el cemento y el agua. El procedimiento de mezclado y sus respectivos tiempos tanto para la mezcla de referencia como para las mezclas con cascarilla de laminación se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Procedimiento de mezclado para mezclas con cascarilla de laminación

Tiempo de mezcla (seg)	0	30	60	90	120	180	240
Materiales que se agregan a la concretadora	Grava	Arena	Cascarilla	Cemento	Agua	Agua	Fin

Después de mezclado el concreto, se midió el asentamiento teniendo en cuenta la Norma NTC396 (Ver procedimiento en el ANEXO C. ENSAYO PARA MEDIR ASENTAMIENTO). Los resultados se presentan de forma gráfica.

La Figura 11 presenta el comportamiento de la fluidez de las mezclas versus la relación de agua cemento, se puede observar que la variación entre las mezclas no es muy grande, sin embargo, mantener constante esta manejabilidad implicó una mayor demanda de agua para las mezclas con cascarilla de laminación como se mencionó anteriormente. En la Tabla 38 se presentan los valores de asentamiento y el tipo de consistencia de una mezcla, para este proyecto se obtuvieron consistencias semi secas, es decir con asentamientos entre 5 y 10 cm, para los cuales se presentan como ejemplos de tipo de construcción los pavimentos compactados a mano, losas, muros y vigas con un sistema de colocación manual.

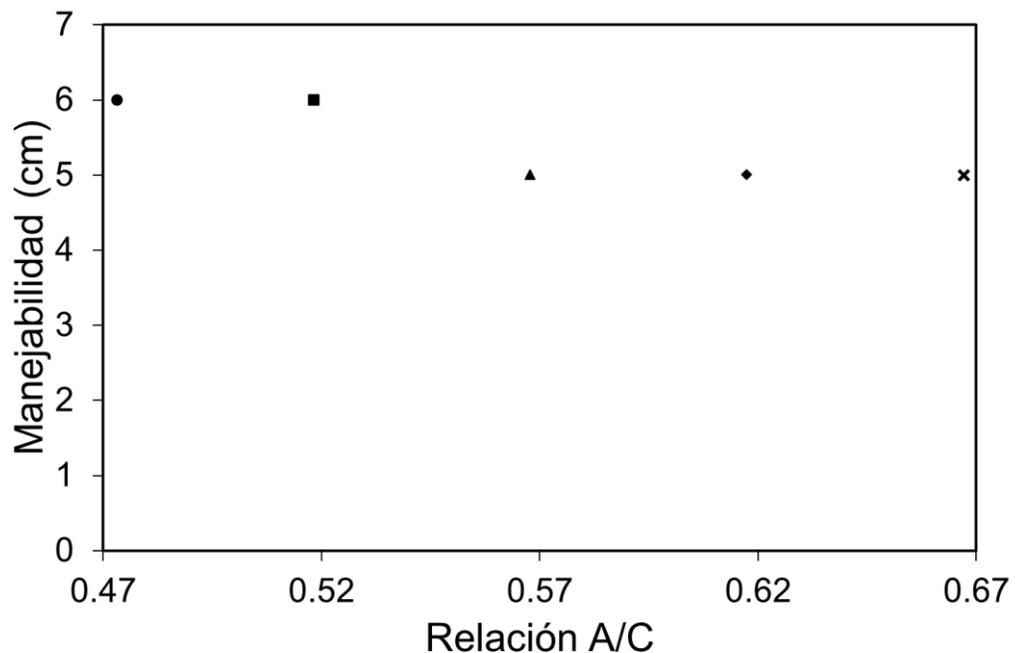


Figura 11. Manejabilidad en cm de cada una de las mezclas para las diferentes relaciones de agua cemento. Mezcla 1 (Circulo), Mezcla 2 (cuadrado), Mezcla 3 (Triangulo), Mezcla 4 (Rombo), Mezcla 5 (Equis).

5.4.2. Cilindros de concreto convencional

El concreto se distribuyó en los cilindros plásticos agregando dos capas de aproximadamente igual altura, siguiendo el procedimiento establecido por la norma NTC1377. Cada capa se apisonó utilizando la varilla de compactación corta imprimiendo 25 golpes. Después de que cada capa fue apisonada se golpeó el molde ligeramente entre 10 y 15 veces utilizando el mazo con el fin de retirar las burbujas de aire que quedaron atrapadas. Finalmente se niveló la superficie del concreto utilizando un palustre pequeño. El curado inicial se realizó a temperatura ambiente, 23° C aproximadamente. A continuación, se presenta una imagen con los resultados finales, en la cual se puede apreciar el cambio de color producido por la introducción de cascarilla de laminación en las mezclas.



Figura 12. Cilindros de concreto

Luego de 24 horas del curado inicial, los moldes cilíndricos fueron removidos y los especímenes de concreto fueron almacenados en un tanque de agua que cumplió con las condiciones necesarias para llevar a cabo este proceso. Los cilindros fueron marcados entre los números 1 y 35, teniendo en cuenta que se realizaron cinco mezclas de siete cilindros cada una. Para evitar confusiones se separaron los cilindros que fueron ensayados a 3, 7 y 28 días dentro de la pileta de agua como se muestra a continuación.



Figura 13. Tanque de curado y especímenes cilíndricos

5.5. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto

A continuación, se presentan los resultados de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto de forma gráfica al igual que su comportamiento frente a la relación agua cemento y el porcentaje de sustitución de cascarilla de laminación. Los resultados tabulados

de resistencia a la compresión se presentan en el ANEXO D. RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO.

En la Figura 14 se observa la relación entre la resistencia a la compresión y cada una de las edades de falla. Se presentan las cinco mezclas y cada uno se simboliza mediante una figura geométrica, la mezcla 1 mediante Círculos, mezcla 2 con cuadrados, la mezcla 3 se representa con Triángulos, la mezcla 4 con Rombos y la mezcla 5 con Equis. Esta misma representación es usada en la Figura 16, Resistencia a la compresión versus la relación agua cemento para cada una de las mezclas.

Gráficamente se observa que a edades tempranas la resistencia a la compresión es mucho menor para las mezclas con cascarilla de laminación, en comparación con la mezcla 1, la cual es la mezcla patrón y en la cual se obtuvo una resistencia de 27.03 Mpa. Sin embargo, a los 28 días las mezclas con porcentajes de cascarilla del 15% y el 30% (Mezclas 2 y 3 respectivamente) tienen un comportamiento similar a la muestra patrón, adquiriendo valores promedio de resistencia a la compresión de 21 MPa y 26.96 MPa respectivamente, indicando que la presencia de cascarilla en la mezcla de concreto le confiere resistencia al concreto endurecido. Al incrementar porcentajes de cascarilla por encima del 30% de sustitución se presentaron disminuciones considerables en la resistencia a la compresión. La resistencia conferida al concreto por la cascarilla de laminación puede ser explicada por diversos factores, uno de ellos puede ser la distribución granulométrica, ya que al ser un material tan fino permite cubrir los poros que no alcanzan a cubrirse con los agregados y el cemento logrando una mayor adherencia.

En la Figura 16 se presentan los resultados gráficos de la relación entre la resistencia a la compresión versus la relación agua cemento para cada una de las mezclas. La resistencia a la compresión estuvo por debajo de los 21 Mpa para las mezclas 4 y 5, para las cuales la relación agua-cemento fue mucho mayor que en el resto de las mezclas. Como se explicó anteriormente, esta relación agua- cemento aumento debido a la cantidad de agua extra que se añadió a la mezcla para controlar la manejabilidad.

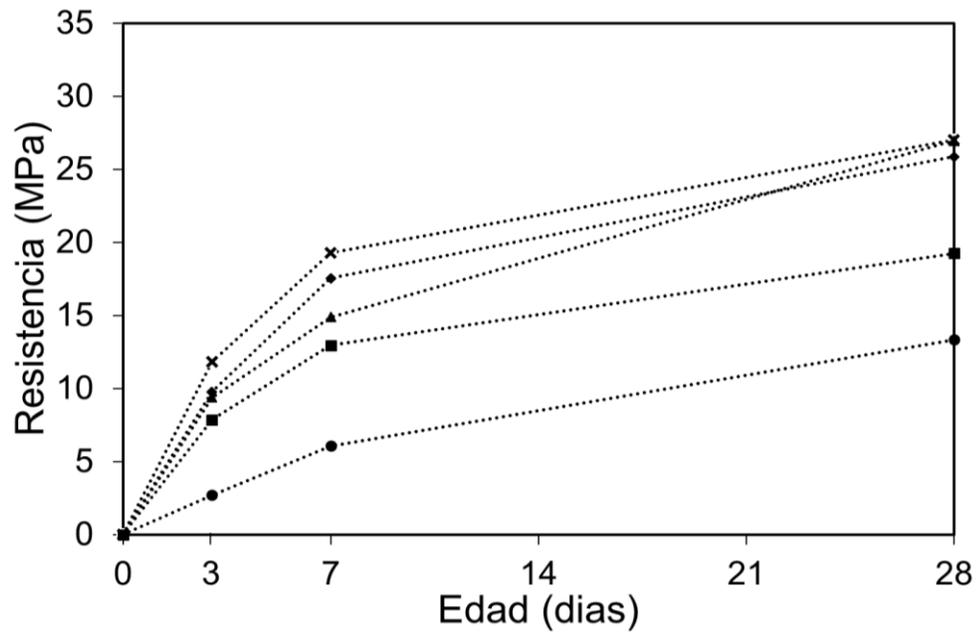


Figura 14. Resistencia a la compresión para cada una de las edades de falla. Mezcla 1 (Equis), Mezcla 2 (Rombos), Mezcla 3 (Triangulo), Mezcla 4 (Cuadrado), Mezcla 5 (Circulos)

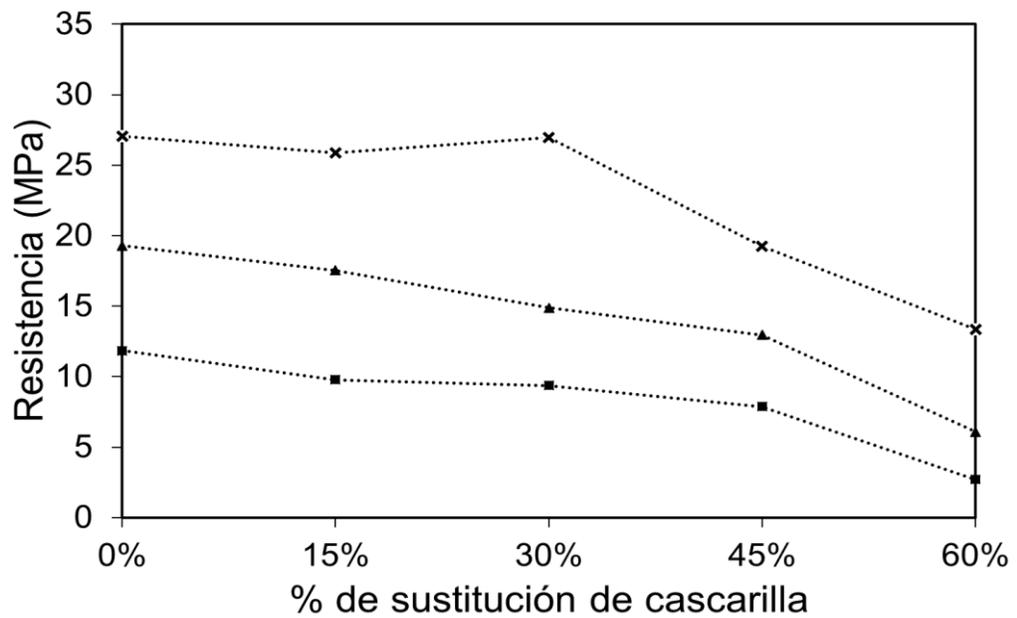


Figura 15. Resistencia a la compresión a 3,7 y 28 días versus % sustitución de cascarilla. 3 días (Cuadrados), 7 días (Triángulos), 28 días (Equis)

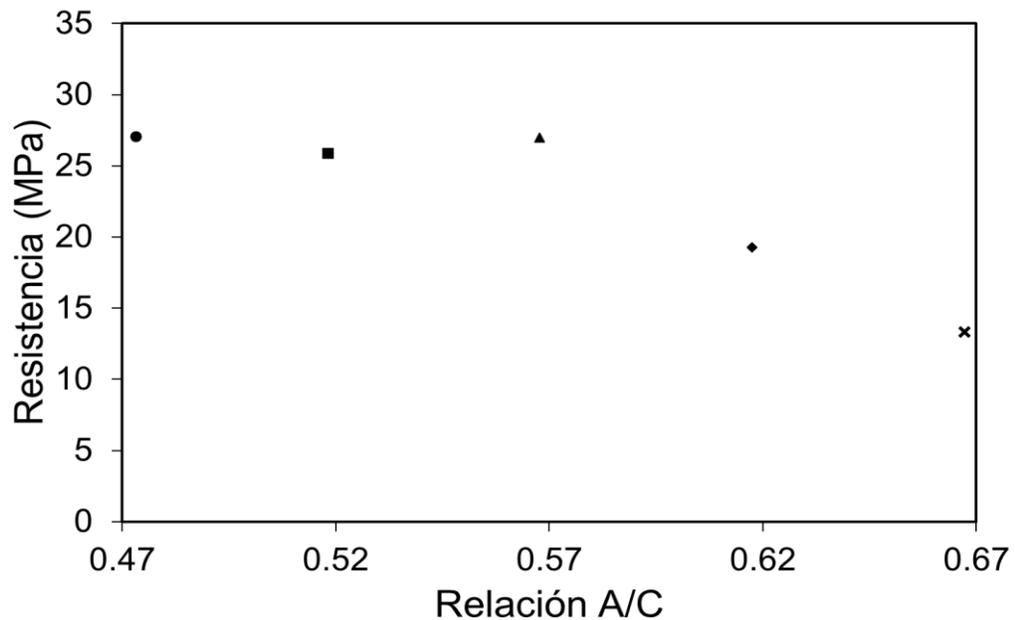


Figura 16. Resistencia a la compresión versus la relación agua cemento para cada una de las mezclas. Mezcla 1 (Círculos), Mezcla 2 (cuadrados), Mezcla 3 (Triángulos), Mezcla 4 (Rombos), Mezcla 5 (Equis)

Con el fin de apreciar la distribución de los agregados para cada una de las mezclas de concreto se realizaron cortes longitudinales a los cilindros realizados, las imágenes se muestran a continuación (Figura 17). En ellas se puede apreciar que tanto para el concreto de referencia como aquellas mezclas que contienen el 15 y 30 % de cascarilla de laminación se presenta una adecuada distribución de los materiales y no se observa segregación de la cascarilla de laminación a pesar de ser muy densa.

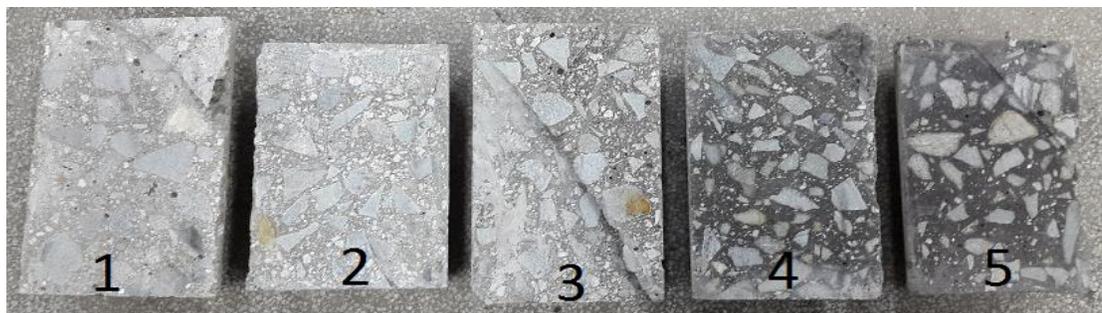


Figura 17. Corte longitudinal a las mezclas de concreto elaboradas. 0% cascarilla (1), 15 % cascarilla (2), 30 % cascarilla (3), 45% cascarilla (4), 60% cascarilla (5)

5.6. Análisis estadístico

Por medio del análisis de varianza se determinó si existían o no diferencias significativas entre las mismas y si las diferencias en las medias eran resultado de factores que no estuvieron contemplados durante el experimento. La prueba Tukey permitió determinar entre cuáles combinaciones de mezclas no existieron diferencias significativas entre los promedios. Además, se graficó el comportamiento del desarrollo de la resistencia con la edad, a las distintas edades analizadas (3,7 y 28 días).

5.6.1. Análisis preliminar de los datos

Los resultados que se presentan en esta capítulo corresponden al análisis de los datos obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión a 3,7 y 28 días de cinco mezclas de concreto previamente realizadas en el laboratorio de suelos, concretos y pavimentos de la universidad EAFIT. Se realizó un análisis de varianza de un factor para cada uno de los días de falla. Luego de obtener los datos y resultados del trabajo se procedió al análisis descriptivo de los mismos. Los resultados de las medias de tendencia central (media, mediana) y medidas de posición (cuartiles), además de los valores máximos y mínimos de la variable independiente (resistencia) obtenidos para cada día de ensayo son presentados en la Tabla 23.

Tabla 23. Estadística descriptiva de los datos para cada uno de los días de falla

Día de falla	3	7	28
Min	2.390	5.96	13.12
1st Qu	7.848	12.96	19.04
Median	9.385	14.88	25.73
Mean	8.316	14.15	22.50
3rd Qu	9.810	17.45	26.63
Max	12.290	21.23	27.99

A continuación, se presenta la representación gráfica de cada uno de los niveles del factor (mezclas) para cada uno de los días de falla realizados a los cilindros de concreto.

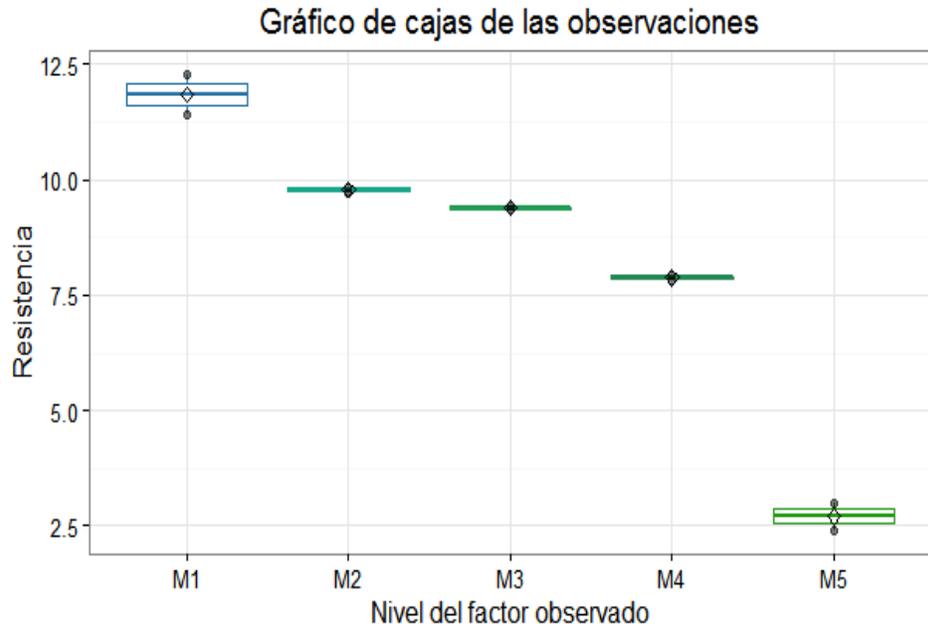


Figura 18. Representación gráfica de los promedios de resistencia para cada nivel del factor, mezcla 1 (M1), mezcla 2 (M2), mezcla 3 (M3), mezcla 4 (M4), mezcla (M5). Para 3 días de falla

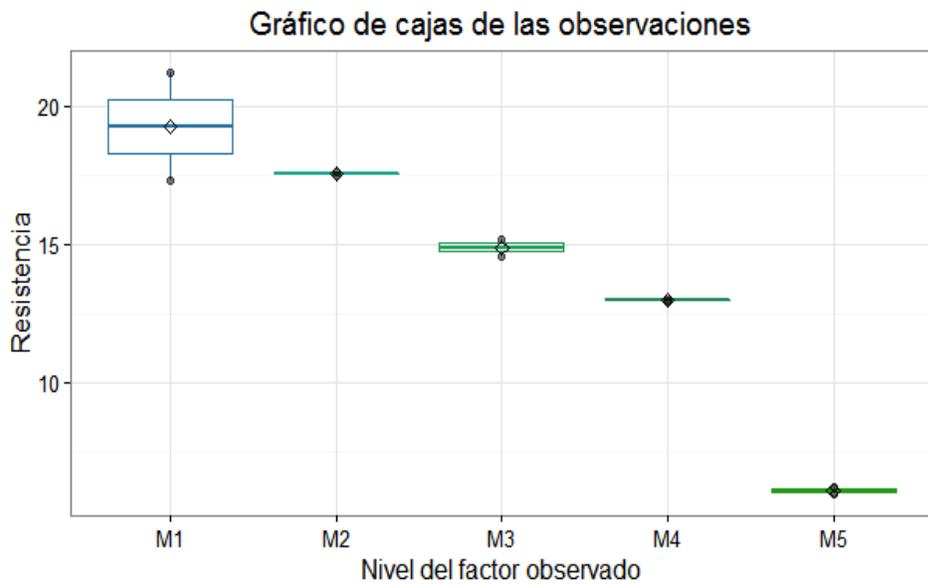


Figura 19. Representación gráfica de los promedios de resistencia para cada nivel del factor, mezcla 1 (M1), mezcla 2 (M2), mezcla 3 (M3), mezcla 4 (M4), mezcla (M5). Para 7 días de falla.

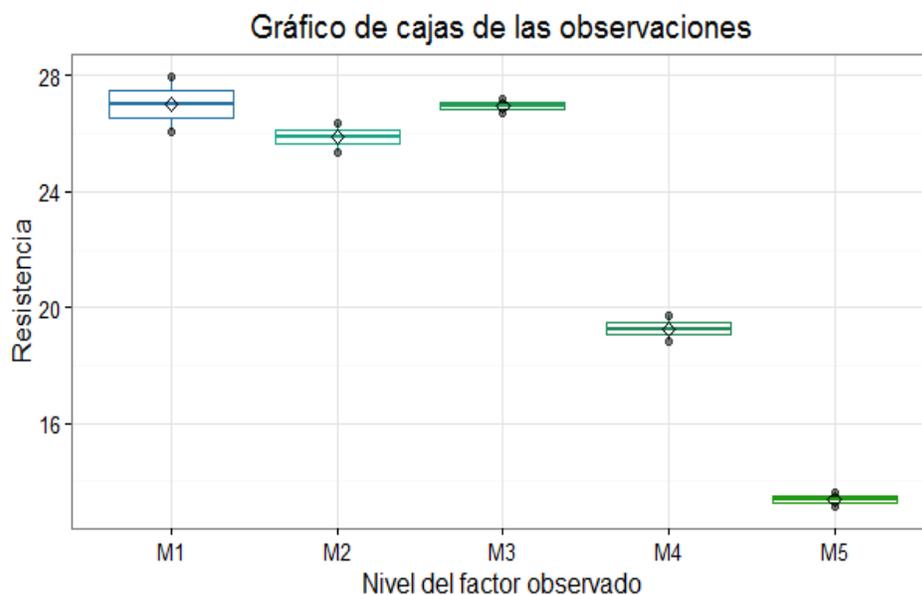


Figura 20. Representación gráfica de los promedios de resistencia para cada nivel del factor, mezcla 1 (M1), mezcla 2 (M2), mezcla 3 (M3), mezcla 4 (M4), mezcla (M5). Para 28 días de falla

Sin necesidad de hacer un análisis ANOVA observamos que al menos una de las medias de los factores es diferente para cada uno de los días de falla. Sin embargo, según los datos obtenidos se justifica hacer un análisis de varianza para determinar si las diferencias en las medias son resultado de factores que no estuvieron contemplados.

5.6.2. Análisis ANOVA de un factor a 3, 7 y 28 días de falla

En esta sección se presentan los resultados del análisis de varianza de un factor, para las mezclas estudiadas en cada uno de los días de falla. Este análisis se hace con el propósito de comparar los promedios de la resistencia de los distintos niveles del factor (mezcla) y así determinar si son significativamente diferentes unos de otros.

Tabla 24. Análisis ANOVA de un factor para 3, 7 y 28 días de falla

Día de falla		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	Valor F	Pr(>F)
3	Mezcla	4	94.88	23.719	193.5	1.15e-05
	Residuales	5	0.61	0.123		

Día de falla		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	Valor F	Pr(>F)
7	Mezcla	4	209.66	52.42	33.31	0.000848
	Residuales	5	7.87	1.57		
28	Mezcla	4	291.89	72.97	123	3.53e-0.5
	Residuales	5	2.97	0.59		

Asumiendo un valor p menor a 0.05 como criterio para aceptar la hipótesis nula, se demuestra que al menos una de las muestras difiere de las demás teniendo en cuenta que los promedios son significativamente diferentes, es decir que entre las mezclas no existe una misma resistencia media a la compresión. Además, se puede afirmar que las diferencias en los datos no están gobernadas por el azar, es decir la diferencia entre las resistencias medidas en los cilindros de concreto se debe a la presencia o no de la cascarilla de laminación.

5.6.3. Análisis de supuestos del modelo ANOVA

Dado que el estadístico F del ANOVA de un factor se basa en el cumplimiento de 2 supuestos fundamentales: normalidad y homocedasticidad, se presentan los resultados de forma gráfica (Ver ANEXO D. RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO) y de forma numérica por medio del test de Shapiro-Wilk (Normalidad) y el test de Levene (Homogeneidad de varianzas).

Tabla 25. Test de Levene

Día de falla		Grados de libertad	Valor F	Pr(>F)
3	Grupo	4	2.27e+29	2.2e-16
7	Grupo	4	5.9607e+29	2.2e-16
28	Grupo	4	1.1094e+29	2.2e-16

El test de Levene evalúa la hipótesis nula de que las varianzas sean iguales. Para esta prueba se obtiene un valor p mucho menor a 0.05 en cada uno de los días de falla por lo cual se rechaza la hipótesis de igualdad de varianzas es decir existen diferencias significativas entre los grupos.

Tabla 26. Test de normalidad de Shapiro Wilk

Día de falla	W	P value
3	0.94822	0.6474
7	0.8002	0.01458
28	0.97343	0.9207

Por medio de la prueba Shapiro Wilk se puede evaluar la hipótesis nula de que los residuales de las mediciones corresponden a una distribución normal.

Se puede observar que el valor p es mucho mayor a 0.05 a 3 y 28 días de falla, lo que implica que en efecto los valores de resistencia están normalmente distribuidos, sin embargo, en la comprobación de la normalidad de los datos del ensayo de resistencia a compresión a 7 días se encontró que los valores de resistencia no están normalmente distribuidos y por tanto el análisis ANOVA no cumple los criterios para evaluar la hipótesis nula en este caso. Sin embargo, los análisis a 28 días se encuentran normalizados y se toman estos resultados como criterio de calidad, evaluando la resistencia final del concreto y las diferencias de medias entre las mezclas.

5.6.4. Análisis de comparación de medias

La prueba de ANOVA (análisis de varianza de un factor) ya determinó que existían diferencias entre los promedios de las diferentes mezclas. Para determinar cuáles son las combinaciones del factor en donde no existe una diferencia muy significativa entre sus promedios, se realizó la prueba de comparación múltiple de promedios según el criterio Tukey.

Las combinaciones del factor que no muestran diferencias significativas en sus promedios son las marcadas en color gris, esto se respalda debido a que su probabilidad es mayor a 0,05.

Tabla 27. Comparación de medias, análisis de Tukey para 3 días de falla

Mezcla	Diferencias de medias	Valor p
M2-M1	-2.060	0.01053
M3-M1	-2.455	0.000484
M4-M1	-3.965	0.000514
M5-M1	-9.140	0.000012
M3-M2	-0.395	0.7880
M4-M2	-1.905	0.0147
M5-M2	-7.080	0.000029
M4-M3	-1.510	0.0379
M5-M3	-6.685	0.0000377
M5-M4	-5.175	0.0001376

En este caso interpretando la columna de valor p, si esta es menor o igual que 0.05, las diferencias entre los grupos formados son significativas. El análisis de Tukey permite establecer para este caso que no hay diferencia significativa entre las mezclas 2 y 3.

Tabla 28. Comparación de medias, análisis de Tukey para 7 días de falla

Mezcla	Diferencias de medias	Valor p
M2-M1	-1.735	0.6615
M3-M1	-4.395	0.08145
M4-M1	-6.315	0.020407
M5-M1	-13.195	0.007321
M3-M2	-2.660	0.33677
M4-M2	-4.580	0.07049
M5-M2	-11.460	0.00142
M4-M3	-1.920	0.58741
M5-M3	-8.800	0.00483
M5-M4	-6.880	0.014248

El análisis de Tukey permitió identificar a 7 días de falla que varias mezclas no presentan diferencias significativas entre sus promedios.

Tabla 29. Comparación de medias, análisis de Tukey para 28 días de falla

Mezcla	Diferencias de medias	Valor p
M2-M1	-1.160	0.5994
M3-M1	-0.075	0.9999
M4-M1	-7.770	0.00089
M5-M1	-13.680	0.00005
M3-M2	1.085	0.64844
M4-M2	-6.610	0.00191
M5-M2	-12.52	0.00008
M4-M3	-7.695	0.0009349
M5-M3	-13.605	0.000054
M5-M4	-5.910	0.0032112

En el caso de los 28 días, el análisis de Tukey de comparación de medias permite observar claramente que no hay una diferencia significativa entre las mezclas 1,2,3 tomando un mayor valor de significación para el grupo de mezclas 1 y 3, comparación que también se observa gráficamente (Ver Tabla 21).

5.7. Análisis Económico

El análisis económico se llevó a cabo para evaluar el impacto de la cascarilla de laminación en el mercado mediante la recopilación de información para determinar la viabilidad o no de ofrecer este subproducto de la industria atendiendo a las necesidades de un segmento del mercado.

Para este análisis se tuvo en cuenta diferentes variables, principalmente de locación, ya que las plantas de la empresa GERDAU DIACO S.A donde se genera la cascarilla de laminación están ubicadas en diferentes zonas del país. Además, se analizaron otras variables como la comparación de costos de los materiales de elaboración del concreto y las ventajas competitivas.

5.7.1. Mercado objetivo

La industria cementera ha ido creciendo de forma positiva en el país durante los últimos años ya que se ha aumentado la necesidad de materiales constructivos, principalmente el concreto, para los proyectos de vivienda promovidos por el gobierno (Actika, 2015).

En la industria cementera y concretera los clientes tienen solicitudes y necesidades parecidas, por lo tanto, hoy en día las empresas cementeras son grandes productores de concreto pues tienen toda la capacidad tecnológica e investigativa para prestar el servicio y ofrecer un producto a precios muy competitivos, en cantidades y con la calidad que lo necesitan sus clientes. Por esta razón el segmento del mercado al que va dirigido la cascarilla de laminación como agregado es a la industria cementera.

En este tipo de industria del concreto hay tres empresas de talla mundial que son las más representativas en Colombia. La que mayor capacidad de producción tiene en el país es Grupo Argos, seguido por CEMEX Colombia S.A y por último esta Holcim Colombia S.A. Estas tres empresas tienen presencia en las cuatro regiones en las cuales se ha identificado que GERDAU DIACO S.A tiene generación de cascarilla de laminación. Las cuatro regiones son: Antioquia, Boyacá, Cundinamarca y Valle del Cauca.

- Grupo Argos

En el negocio del concreto, Argos es el líder en Colombia con una participación del 44% y una capacidad de producción instalada de 3.8 millones de m³. Está ubicado principalmente en Antioquia, Valle del Cauca y la costa Atlántica (Argos, 2016).

- CEMEX Colombia S.A

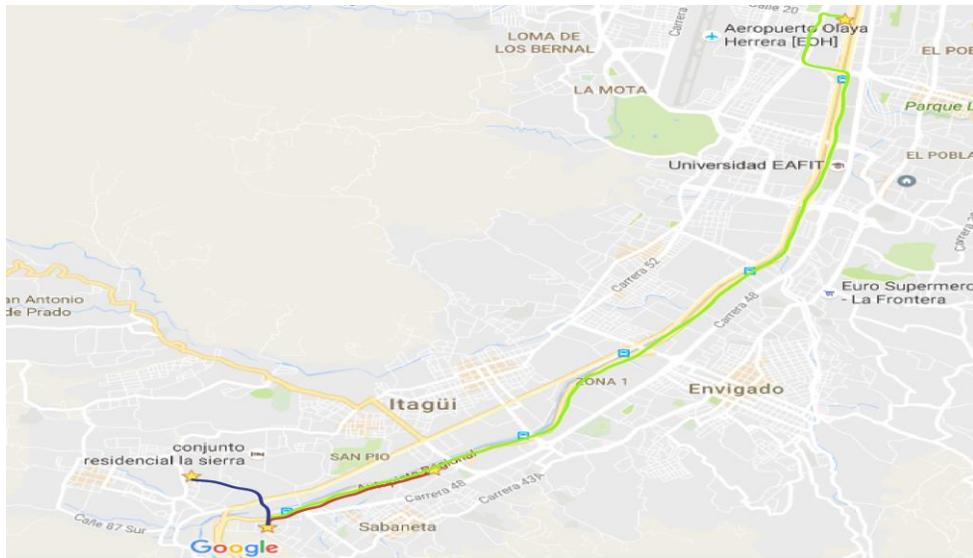
CEMEX es el segundo productor más grande de cemento y concreto en Colombia, tiene 66 plantas de concreto fijas y móviles que se ubican principalmente en Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca, Bucaramanga y la costa Atlántica (Cemex, 2016).

- **HOLCIM Colombia S.A**

HOLCIM Colombia produce y comercializa cementos y concretos de máxima calidad. Cuenta con una planta cementera y 10 plantas de concreto en todo el país. HOLCIM cuenta con una participación en el mercado de alrededor del 14% (Holcim Colombia, 2014).

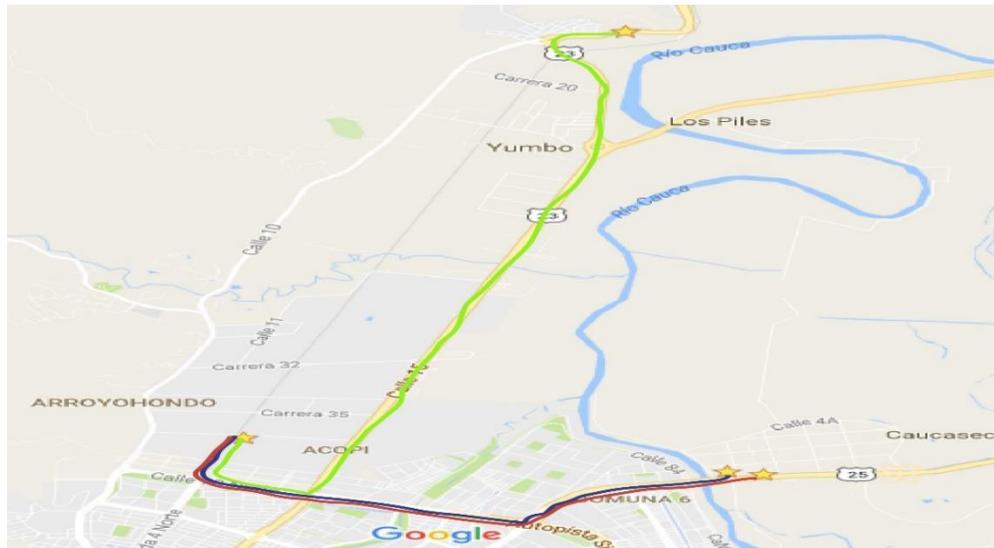
5.7.2. Canal de distribución

El canal de distribución es la ruta por la que circula el flujo de productos desde su creación en origen hasta llegar a su consumo o uso en el destino final (Cantos & Encinas, 1999). Como el negocio de GERDAU DIACO S.A es la de producción y transformación del acero, el transporte y distribución de la cascarilla de laminación se debe hacer por un tercero, es decir, un intermediario que permita transportar la cascarilla desde la planta de producción hasta el cliente. Con base a la identificación de clientes potenciales y la ubicación de los diferentes lugares donde se genera la cascarilla de laminación se trazaron las rutas de comercialización de la cascarilla de laminación (Ver figuras 21,22,23 y 24).



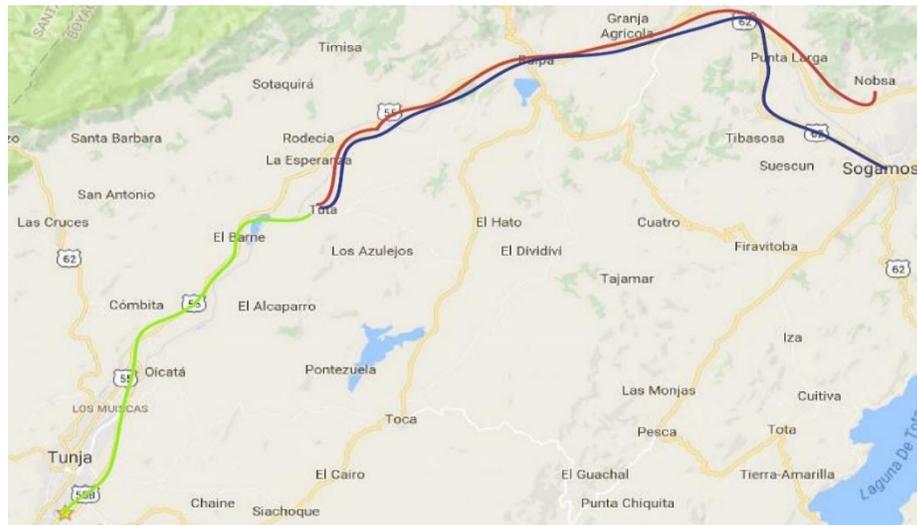
Convenciones		
Sabaneta -Sabaneta		Sabaneta –La estrella
		Sabaneta–Medellín

Figura 21. Ruta de comercialización de cascarilla en Antioquia (Rojo) Holcim, (Azul) Cemex, (Verde) Argos



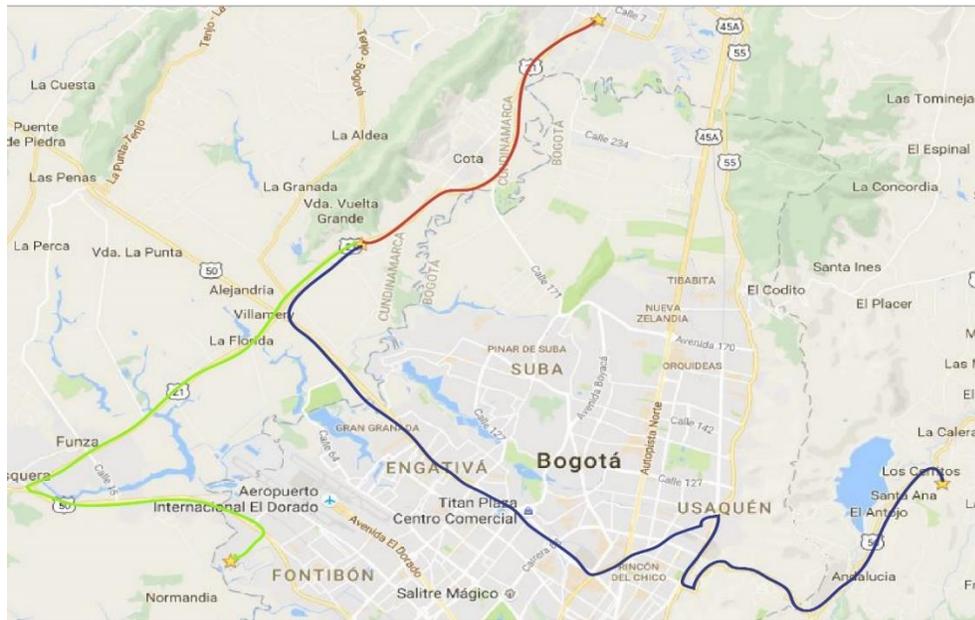
Convenciones					
Yumbo - Cali		Yumbo- Cali		Yumbo-Yumbo	

Figura 22. Ruta de comercialización de cascarilla en Valle del cauca (Rojo) Holcim, (Azul) Cemex, (Verde) Argos



Convenciones					
Tuta -Nobsa		Tuta-Sogamoso		Tuta- Tunja	

Figura 23. Ruta de comercialización de cascarilla en Boyacá (Rojo) Holcim, (Azul) Cemex, (Verde) Argos



Convenciones					
Cota - Chía		Cota – Santa Rosa		Cota- Fontibón	

Figura 24. Ruta de comercialización de cascarilla en Cundinamarca (Rojo) Holcim, (Azul) Cemex, (Verde) Argos

Las características de la cascarilla de laminación como su alta densidad implica que se deba transportar en grandes volúmenes al igual que se hace con la minería de materiales de construcción en Colombia, para la cual se utilizan volquetas como medio de transporte, ya que permiten el transporte de grandes volúmenes en toneladas y hay buena disponibilidad de este medio (Gómez & Correa, 2012). Por tal razón se usará este medio de transporte para la cascarilla de laminación desde GERDAU DIACO S.A hasta el cliente.

5.7.3. Ventajas competitivas

Actualmente una de las preocupaciones principales de la sociedad es el medio ambiente, ya que con el pasar del tiempo se está observando un gran deterioro de este, generando gran impacto en la economía y en la forma de vivir de las personas. Por estas razones hoy en día hay mas consciencia a la hora de comprar productos y servicios, teniendo en cuenta de donde provienen, que tan amigables son con el medio ambiente y con la sociedad.

La cascarilla de laminación es un residuo no toxico, como lo describe la hoja de especificación suministrada por la empresa GERDAU DIACO S.A, además cuenta con

propiedades físicas adecuadas para ser usado como remplazo parcial de agregado fino para el concreto. La sustitución de agregados convencionales como la arena no solo beneficia económicamente a la empresa GERDAU DIACO S.A, sino también al medio ambiente, pues se está dejando de usar la arena que es un recurso no renovable, genera cambios considerables en el ecosistema y amenaza el equilibrio del entorno. Algunos de estos cambios son: cambio en la calidad del aire, desaparición de fauna y flora, alteración de paisajes, contaminación de rios, entre otros (L. Hernández & Alexander, 2015)

Al usar la cascarilla de laminación como un remplazo parcial de la arena se genera una oportunidad de negocio para las empresas que tienen procesos de flejería y laminación, disminuyendo los desechos generados por esta industria y el impacto en el medio ambiente que tiene la explotación de las canteras de arena. Además, hoy en día los productos que son ecológicos, tienen una mayor acogida en el mercado tanto que en algunos casos la personas aceptan pagar más por un producto que sea amigable con el medio ambiente.

5.7.4. Costo Materias primas

Para poder determinar el costo de elaboración del concreto convencional se tuvo en cuenta el costo de las materias primas en cada una de las regiones donde la empresa GERDAU DIACO S.A presenta generación de cascarilla de laminación (Ver Figura 25).

Los costos de las materias primas como el cemento, la arena, la grava y el agua se tomaron de la base de datos de Construdata en el mes de septiembre de 2016, como esta solo muestra valores en cuatro regiones del país (Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín) se tomaron los precios de la siguiente forma:

- Para Antioquia, se tomó los costos de los materiales en Medellín.
- Para Cundinamarca y Boyacá se tomaron los costos de los materiales en Bogotá.
- Para el Valle del Cauca se usaron los costos de los materiales en Cali.

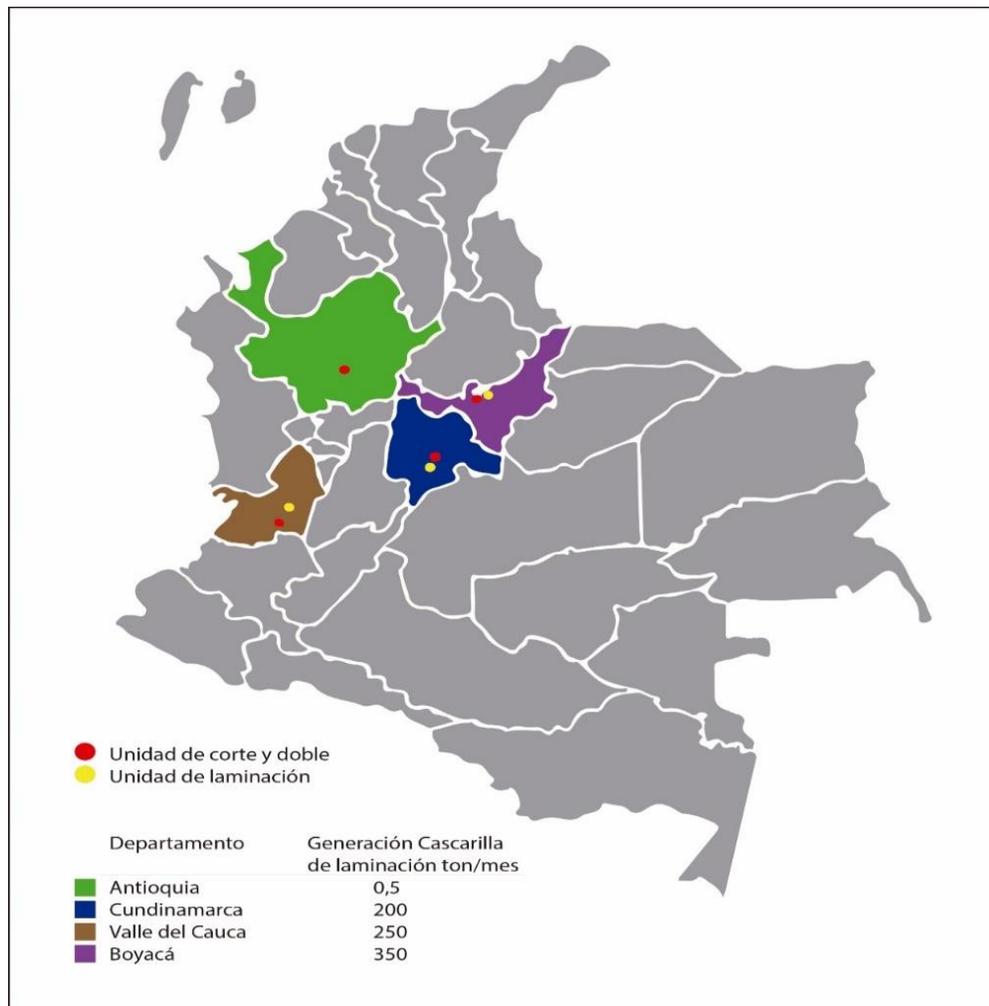


Figura 25. Instalaciones de GERDAU DIACO S.A en Colombia y cantidad de calamina generada (Elaboración Propia)

Por otro lado, el costo de la cascarilla de laminación fue proporcionada por la empresa GERDAU DIACO S.A, presentando un valor de \$15 USD (Dólares) por tonelada. El dólar para el mes de septiembre de 2016 según los datos presentados por el banco de la república de Colombia tuvo un valor promedio de \$2921.31 pesos colombianos.

El precio obtenido para cada uno de los ingredientes en cada región está especificado a continuación (Ver Tabla 30).

Tabla 30. Costo de materias primas en la elaboración de concreto en diferentes zonas del país

Material	Costo (Pesos colombianos)			
	Antioquia	Boyacá	Valle del Cauca	Cundinamarca
Cemento (\$/kg)	\$550	\$570	\$550	\$570
Agua (\$/L)	\$16	\$16	\$16	\$16
Grava (\$/m ³)	\$48,720	\$52,200	\$81,895	\$52,200
Arena lavada e rio (\$/m ³)	\$128,000	\$128,000	\$128,000	\$128,000
Cascarilla (\$/m ³)	\$43,820	\$43,820	\$43,820	\$43,820

- **Costo del metro cúbico de concreto convencional con adición de cascarilla de laminación**

Utilizando los valores presentados en la Tabla 30, las proporciones de las mezclas y la masa unitaria suelta se calculó el costo del metro cúbico de concreto sin reemplazo de cascarilla y con un reemplazo del 30% de cascarilla de laminación (Ver Tabla 31), ya que este último tiene una resistencia similar al cilindro que contenía el 0% de este residuo.

Tabla 31. Costo del metro cúbico de concreto en diferentes zonas del país

Mezcla	Costo m ³ de concreto (Pesos Colombianos)			
	Antioquia	Boyacá	Valle del Cauca	Cundinamarca
Concreto general 0% Cascarilla	\$331,232	\$341,831	\$350,113	\$341,831
Concreto general 30% Cascarilla	\$325,252	\$335,842	\$344,053	\$335,842
Ahorro por m³	\$5,980	\$5,988	\$6,059	\$5,988
% ahorro	1.81%	1.75%	1.73%	1.75%

Al comparar los precios en la Tabla 31 se puede evidenciar que es más económico elaborar concreto con cascarilla de laminación que concreto convencional sin presencia de este residuo en las cuatro zonas del país donde hay generación de esta, además todas presentan un ahorro muy parecido. Si se tiene en cuenta que normalmente se transporta el concreto en camiones concreteros de 7m³, el ahorro promedio por viaje es de \$42.028 pesos colombianos.

Teniendo en cuenta el consumo promedio mensual en cada una de las regiones durante el año 2015, el ahorro que se obtendría si se usa concreto con cascarilla de laminación se presenta en la Tabla 32. Dentro de estos costos no se incluye el valor de transporte de cada uno de los materiales a las plantas de producción de las empresas cementeras.

Tabla 32. Consumo promedio de concreto por regiones

Consumo promedio de concreto por región en el año 2015 (m³)				
	Antioquia	Boyacá	Cundinamarca	Valle del Cauca
Consumo de concreto (m³)	85,791	14,046	34,506	41,043
Precio m³ concreto sin cascarilla (\$COP)	\$28,416,799,102	\$4,652,602,541	\$11,429,331,329	\$13,594,681,712
Precio m³ concreto con cascarilla (\$COP)	\$27,903,760,862	\$4,568,604,234	\$11,222,985,638	\$13,349,242,683
Ahorro (\$COP)	\$513,038,240	\$83,998,307	\$206,345,690	\$245,439,029

El ahorro es proporcional a la demanda de concreto de cada región y se puede evidenciar que el ahorro es significativo en cada región. Esto demuestra que el uso de concreto con cascarilla de laminación es viable económicamente ya que se presenta un ahorro que puede ser aprovechado tanto por el consumidor como el productor, además del impacto positivo que tiene la reutilización de este material para el medio ambiente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Conclusiones

A continuación, se proponen las conclusiones más importantes que se extraen del presente proyecto de grado:

El análisis químico y mineralógico de la cascarilla de laminación arrojo en su composición química que esta posee un alto contenido de fuente de hierro y está constituida principalmente por una mezcla de óxidos de este mineral: magnetita, wustita y hematita. Al tener la cascarilla de laminación altos contenidos de hematita y magnetita, además de una alta densidad este material se podría usar como agregado para la elaboración de concretos que protejan contra radiación de rayos gama o x.

La cascarilla de laminación, la cual es un desecho del proceso de laminación en caliente o frio de la industria metalmeccánica fue usado como agregado fino en la elaboración de concreto convencional. El concreto de referencia con 0% de reemplazo de cascarilla tuvo la mayor resistencia a los 28 días con un resultado promedio de 27.03 Mpa, mientras que con el 30% de reemplazo de cascarilla por arena se logró un valor de resistencia de 26.96 Mpa.

La cascarilla puede reemplazar la arena en el concreto en una proporción entre el 15 y 30% logrando buenos resultados de resistencia a la compresión. A partir del 30% de reemplazo la resistencia comienza a decrecer progresivamente.

El uso de la cascarilla de laminación aumentó la demanda de agua para mantener la manejabilidad requerida, confirmando los resultados de otros estudios realizados con este material (Pereira et al., 2011; Remya Neelancherry, 2016; Singhal & Bhunia, 2015), además debido a la alta densidad de la cascarilla de laminación con respecto a los otros agregados, la densidad final del concreto incremento en función de este residuo alcanzando valores que van desde los 2420 kg/m³ hasta 2760 kg/m³.

La cascarilla de laminación proveniente de la Siderúrgica GERDAU DIACO S.A, cuya generación alcanza las 800 toneladas mensuales alrededor del país, constituye un residuo aprovechable con características que le permiten ser una adición en la fabricación del concreto convirtiéndose como una alternativa para sustituir los agregados convencionales como la arena, obtenida en la explotación de canteras o ríos, y que genera impactos ambientales como la erosión, pérdida de cobertura vegetal y contaminación de ríos.

Las diferencias en la resistencia de los cilindros pueden ser originadas principalmente por las propiedades del concreto y el apropiado control de sus componentes de fabricación, incluyendo la dosificación, además de las variaciones propias del ensayo. A la vez la ausencia de una tendencia en la resistencia de las mezclas puede ser debido a las variaciones en la cantidad de agua requerida.

Elaborar concreto a partir de la sustitución del agregado fino por cascarilla de laminación, da como resultado un concreto más económico y con una mayor densidad, si se compara con el que no tiene este agregado. Por lo tanto se podría usar para construcciones como vías elaboradas a partir de concretos y parques de suelo duro, reduciendo costos en la construcción.

La valorización de la cascarilla de laminación como agregado fino para elaboración de concreto representa una oportunidad de negocio para las industrias generadoras de este material ya que además de generar un ingreso adicional por la venta de este residuo, se generan ventajas competitivas por el compromiso frente al cuidado del medio ambiente.

- **Futuras líneas de investigación**

En este capítulo se proponen algunas líneas de investigación que pueden ser objeto de interés de acuerdo al trabajo realizado en este proyecto de grado:

En primer lugar, resultaría importante analizar el comportamiento de la resistencia a la compresión frente a diferentes relaciones de agua cemento para el porcentaje de cascarilla ideal obtenido en este trabajo con el fin de determinar cuál es la relación que garantiza la mayor resistencia de los cilindros de concreto. De la misma manera sería posible evaluar

la fluidez (manejabilidad) del concreto frente a las relaciones previamente establecidas de agua cemento buscando optimizar el trabajo realizado.

En segundo lugar, se podrían hacer ensayos petrográficos al concreto con cascarilla de laminación para determinar posibles comportamientos futuros, identificando el potencial reactivo de los agregados, la estimación del contenido de aire, causas de figuración, entre otros. También se puede evaluar la durabilidad del concreto realizando ensayos como: medida de la porosidad, medida de la velocidad de carbonatación y evaluación del comportamiento al ataque de sulfatos (Salazar, 2005). Esto con el fin de obtener conocer los materiales que ayudan a que el concreto adquiera su dureza o cuales pueden ser los que afecten la resistencia a la compresión del mismo.

Para validar en su totalidad el uso de la cascarilla de laminación como agregado fino en la elaboración de concreto, se recomienda evaluar el comportamiento del concreto a mayores edades y a la exposición de diferentes factores ambientales, ya que este podría aumentar la resistencia con respecto a la mezcla patrón y al ser más denso podría tener un mejor desempeño a diferentes factores externos.

También se sugiere analizar la reacción química que se efectúa en el concreto debido al agua y los constituyentes del cemento y agregados, teniendo en cuenta que la cascarilla de laminación contiene un alto porcentaje de óxidos de hierro, y el cemento también presenta un contenido de este material dentro de su fórmula química.

Con el fin de conocer el porcentaje de absorción del concreto a los 28 días, se sugiere medir esta propiedad y compararla frente a la resistencia a la compresión. De igual manera se podría evaluar la conductividad térmica y eléctrica del concreto, con el fin de usar este concreto en construcciones sostenibles.

7. BIBLIOGRAFIA

- Albarracin Díaz, S., & Barahona Urbano, H. (2013, abril 9). *Elaboración de un manual de producto para el área de laminación en Fundial Ltda* (Thesis).
- Argos. (2016). *Presentación corporativa Grupo Argos* (p. 42). Recuperado a partir de <https://www.grupoargos.com/uploads/140515090720grupo-argos-septiembre-2014-esp.pdf>
- Brito, J. de, & Saikia, N. (2012). *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. Springer Science & Business Media.
- Cantos, M., & Encinas, M. C. (1999). *Introducción al comercio internacional*. Editorial UOC.
- Cemex. (2016). CEMEX Colombia | Nuevo País, Nuevas Ideas. Recuperado 12 de septiembre de 2016, a partir de <http://www.cemexcolombia.com/Index.aspx>
- Diana Betancourth G., José Fernando Gómez C., Julio César Mosquera, & Liliana Tirado-Mejía. (2010). ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE ROCAS PROVENIENTES DE REGIÓN ESMERALDÍFERA. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 44, 257-260.
- Enríquez Berciano, J. L., Tremps Guerra, E., Elío de Bengy, S. de, & Fernández Segovia, D. (2010, enero). Laminación [info:eu-repo/semantics/other].
- Furlani, E., & Maschio, S. (2016). Steel scale waste as component in mortars production: An experimental study. *Case Studies in Construction Materials*, 4, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.02.001>
- Gaballah, N. M., Zikry, A. F., Khalifa, M. G., Farag, A. B., El-Hussiny, N. A., & Shalabi, M. E. H. (2013). Production of Iron from Mill Scale Industrial Waste via Hydrogen. *Open Journal of Inorganic Non-metallic Materials*, 3(3), 23-28. <https://doi.org/10.4236/ojinm.2013.33005>

- Gómez, R., & Correa, A. (2012). ANÁLISIS DEL TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN UTILIZANDO SIMULACIÓN DISCRETA EN 3D. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 0(30), 39-52.
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/>
- GUZMAN, D. A. S. D. (2001). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Harmsen, T. E. (2005). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado*. Fondo Editorial PUCP.
- Herbert, M. F. (1963). *Removing mill scale from iron*. Google Patents. Recuperado a partir de <https://www.google.com/patents/US3073726>
- Hernández, L., & Alexander, J. (2015). El impacto ambiental por la actividad de explotación de canteras en la localidad de Usme y sus principales medidas de manejo. *Bulla, Diego Andrés y Guauque Díaz, José Benjamín. 2013. ACERCAMIENTO A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y SOCIAL GENERADA POR LA MINERÍA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL AGROPARQUE LOS SOCHES. Bogotá: s.n., 2013.*
- Hernández, R. A. C., Durán, D. M. F., & Bustos, L. P. (2014). Reemplazo del agregado fino por escoria de horno de cubilote para la fabricación de concreto. *INGE CUC*, 10(1), 83-88.
- Holcim Colombia. (2014). *Informe de Desarrollo Sostenible 2014*. Recuperado a partir de <http://www.holcim.com.co/fileadmin/templates/CO/doc/IDS-2014.pdf>
- INVIAS. (2007). *Artículo 630-07 INVIAS*. Recuperado a partir de http://www.idrd.gov.co/especificaciones/index.php?option=com_content&view=article&id=2189&Itemid=1901

- López, F. A., Martín, M. I., Pérez, C., López-Delgado, A., & Alguacil, F. J. (2003). Adsorción de metales pesados sobre cascarilla de laminación. *Revista de Metalurgia*, 39(3), 215-223. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2003.v39.i3.332>
- Maldonado Sandoval, R. (2014). *Estudio de las relaciones entre el componente químico-mineralógico y la degradación de una roca lodosa de la Formación Trincheras* (masters). Universidad Nacional de Colombia.
- Martín Hernández, M. I. (2006). *Aplicación tecnológica de un residuo de la industria del acero en la eliminación de metales contaminantes: memoria para optar al grado de doctor*. [Universidad Complutense], Servicio de Publicaciones, Madrid.
- Meyer, C. (2004). Concrete Materials and Sustainable Development in the United States. *Structural Engineering International*.
- Montedo, O. R. K., Alves, I. T., Faller, C. A., Bertan, F. M., Piva, D. H., & Piva, R. H. (2015). Evaluation of electrical properties of glass-ceramics obtained from mill scale. *Materials Research Bulletin*, 72, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.07.040>
- Muñoz M, H. A. (2012). Manual del acero Gerdau Diaco para construcciones sismoresistentes (Tercera).
- Ordoñez Mejía, K. J., & Villanueva López, L. (2013). Elaboración de bloques de mortero tipo estructural mediante secado natural empleando la calamina procedente de TENARIS TUBOCARIBE S.A. como aditivo. *T I.Q 248 CD-ROM*.
- Parra Araque, L. M., & Sánchez García, D. P. (2012). Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá.

- Pereira, F. M., Verney, J. C. K. de, & Lenz, D. M. (2011). Evaluation of the use of mill scale as fine aggregate in concrete. *Rem: Revista Escola de Minas*, 64(4), 463-469.
<https://doi.org/10.1590/S0370-44672011000500011>
- Remya Neelancherry. (2016). Study of the Compressive Strength of Concrete with Various Proportions of Steel Mill Scale as Fine Aggregate. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR - JMCE)*, 104-109.
- Rivera, G. (2013). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO*. Universidad del Cauca.
- Rivera, G. (2015). *Concreto Simple*.
- Salazar, A. (2005). Experiencia De Reciclaje En La Producción De Materiales De Construcción. *Sophia*. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413740777004>
- Sereno, A. M., Silva, M. A., & Mayor, L. (2007). Determination of Particle Density and Porosity in Foods and Porous Materials with High Moisture Content. *International Journal of Food Properties*, 10(3), 455-469.
<https://doi.org/10.1080/10942910600880736>
- Singhal, A., & Bhunia, D. (2015). EFFECT OF SAND REPLACEMENT BY MILL SCALE ON THE PROPERTIES OF CONCRETE.
- Ugarte Díaz, J. A. (2013). Aplicación de cascarillas de óxidos de hierro en la fabricación de revestimientos para electrodos de soldadura. *Universidad Nacional de Ingeniería. Programa Cybertesis PERÚ*.
- Villalba, R., & Margarita, L. (2013). *Propuesta de Elaboración del Capítulo referente a la Granulometría de Agregados para el Concreto* (Thesis). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Recuperado a partir de <http://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/52>

ANEXOS

ANEXO A. METODOLOGÍA: CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

- Análisis Granulométrico de los agregados

En los agregados finos (arena, cascarilla) se tomó una muestra de ensayo de 1 kg para cada agregado teniendo en cuenta que el tamaño mínimo de muestra debía ser de 300 g. El material fue previamente secado durante un día a una temperatura de 105 °C. Para el agregado grueso, el tamaño de muestra se asumió de acuerdo con el tamaño máximo nominal de la grava, el cual fue de 25.4 mm (1”), con lo cual se determinó una muestra de ensayo de 10 kg previamente secada al horno a la misma temperatura que el agregado fino.

Para conocer que tan buena gradación tienen los agregados, se utilizó la norma NTC 174 en la cual se habla de las especificaciones de los agregados para concreto y se establecen los límites de gradación tanto para agregado fino (Ver Tabla 33) como agregado grueso (Ver Tabla 34).

Tabla 33. Recomendación granulométrica para agregado fino

Tamiz		% Pasa	
mm	Pulgadas	Límite inferior	Límite superior
9.5	3/8	100	100
4.75	No.4	95	100
2.36	No.8	80	100
1.18	No.16	50	85
600	No.30	25	60
300	No.50	10	30
150	No.100	2	10

Fuente: ICONTEC NTC 174, 2010



Figura 26. Tamices para ensayo de granulometría

Tabla 34. Recomendación granulométrica para agregado grueso

Número tamaño del Agregado	Tamaño nominal	% Pasa (en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9,5 mm	4.76 mm (No.4)	2.38 mm (No.8)	1.18 mm (No.16)
1	90.5 mm a 37.5 mm	100	90 - 100	-	25 - 60	-	0 - 15	-	0 - 5	-	-	-	-	-
3	63 mm a 37.5 mm	-	-	100	90 - 100	35 - 70	0 - 15	-	0 - 5	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25 mm	-	-	-	100	90 - 100	35 - 70	0 - 15	-	0 - 5	-	-	-	-
357	50 mm a 4.75 mm (No.4)	-	-	-	100	95 - 100	-	35 - 70	-	10 - 30	-	0-5	-	-
4	37.5 mm a 19 mm	-	-	-	-	100	90 - 100	20 - 55	0 - 15	-	0 - 5	-	-	-
467	37.5 mm a 4.75 mm (No.4)	-	-	-	-	100	95 - 100	-	35 - 70	-	10 - 30	0-5	-	-
5	25 mm a 12.5 mm	-	-	-	-	-	100	90 - 100	20 - 55	0 - 10	0 - 5	-	-	-
58	25 mm a 9.5 mm	-	-	-	-	-	100	90 - 100	40 - 85	10 - 40	0 - 15	0-5	-	-
57	25 mm a 4.75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	100	95 - 100	-	25 - 60	-	0-10	0-5	-
6	19 mm a 9.5 mm	-	-	-	-	-	-	100	90 - 100	20 - 55	0 - 15	0-5	-	-

Número tamaño del Agregado	Tamaño nominal	% Pasa (en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9,5 mm	4.76 mm (No.4)	2.38 mm (No.8)	1.18 mm (No.16)
67	19 mm a 4.75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90 - 100	-	20-55	0-10	0-5	-
7	12 mm a 4.75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 - 100	40-70	0-15	0-5	-
8	9.5 mm a 2.38 mm (No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5

Fuente: ICONTEC NTC 174, 2010

Teniendo como referencia un tamaño nominal de 25.4 mm (1") para el agregado grueso se seleccionaron los tamices y los límites de gradación para la grava (Tabla 35).

Tabla 35. Recomendación granulométrica seleccionada para la grava

Tamiz		% Pasa	
mm	Pulgadas	Límite inferior	Límite superior
25.4	1	100	100
19.0	3/4	90	100
12.5	1/2	NA	NA
9.5	3/8	20	55
4.76	No.4	0	10
2.38	No.8	0	5
1.18	No.16	NA	NA

Fuente: Elaboración propia

- Módulo de finura

El módulo de finura es un factor empírico que permite estimar que tan fino o grueso es un material (Rivera, 2015). En general, éste valor puede variar entre 0 y 10 o más dependiendo del tamaño máximo presente (GUZMAN, 2001).

Tabla 36. Clasificación del agregado de acuerdo con el valor del módulo de finura.

Módulo de finura	Agregado fino
Menor que 2.00	Muy fino o extra fino
2.00 – 2.30	Fino
2.30 – 2.60	Ligeramente fino
2.60 – 2.90	Mediano
2.90 – 3.20	Ligeramente grueso
3.20 – 3.50	Grueso
Mayor que 3.50	Muy grueso o extra grueso

(Rivera, 2015)

- **Humedad**

Para cada uno de los agregados (arena, grava y cascarilla) se tomó una muestra representativa (Ver Tabla 37) basado en la Tabla, tamaño de la muestra para agregados de peso normal de la norma NCT 1776. Esta muestra fue sometida a secado en un horno de laboratorio marca HERAEUS a 110 °C durante 24 horas. El contenido total de humedad se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$W = 100 (H - S) / S \quad (1)$$

Donde:

W = Contenido de la humedad en la muestra, porcentaje

H = Masa inicial de la muestra, en gr

S = Masa de la muestra seca, en gr

Tabla 37. Masa mínima de la muestra para cada agregado

Agregado	Masa inicial de la muestra, Kg
Grava	4
Arena	1
Cascarilla	1

- Absorción y densidad de los agregados

Tanto para la cascarilla de laminación como para la arena se siguió el procedimiento descrito por la norma, tomando 1 kg de cada uno de los materiales y sometidos a secado utilizando un horno de laboratorio marca HERAEUS a temperatura de 105 °C durante 24 horas. Luego se retiró el exceso de agua y se extendió la muestra sobre una superficie plana consiguiendo retirar la humedad superficial de las partículas hasta que se consiguió la condición saturada y superficialmente seca (SSS) de la muestra.



Figura 27. Procedimiento de absorción y densidad de la arena

Para determinar la densidad de la arena se utilizó un frasco volumétrico de 500 cm³ el cual se llenó parcialmente con agua y en el cual se introdujeron 500 g del agregado saturado y superficialmente seco (SSS), luego se llenó con agua adicional hasta un 90% de su capacidad y se determinó la masa total del frasco, con la muestra y el agua. Finalmente, la muestra se secó nuevamente a temperatura de 105 °C durante 24 horas y se dejó enfriar al aire a temperatura ambiente por una hora para determinar la masa. Se calculó la densidad aparente de la arena partir de la siguiente formula,

$$D_{aparente} = 0.997 \times A / (B + S - C) \quad (2)$$

Donde:

D = Densidad aparente, g/cm³

A = masa en el aire de la muestra secada al horno, g

B = masa del frasco volumetrico lleno con agua, g

S = masa de la muestra saturada y superficialmente seca, g

$C = \text{masa del frasco volumetrico con la muestra y el agua , g}$

Se calculó el porcentaje de absorción así,

$$\text{Absorción, \%} = [(S - A)/A] \times 100 \quad (3)$$

Para el agregado grueso se empleó el método de ensayo descrito en la norma NTC 176 que tiene por objeto determinar la densidad y absorción para este tipo de agregados. Se tomó una muestra representativa de 4 kg, teniendo en cuenta que el tamaño máximo nominal de la grava es de 1 in (25.4 mm), esta muestra se sumergió en agua durante 24 horas con el fin de saturar sus poros. Luego se removió el agua y se secaron las partículas de forma superficial, y se determinó la masa en la condición saturada y superficialmente seca (SSS).

Después de determinar la masa, se colocó la muestra de nuevo en el recipiente y se determinó su masa en el agua a 23 °C teniendo una densidad del agua de 0.997 kg/m³. Finalmente se realizó un proceso de secado en un horno de laboratorio marca HERAEUS a una temperatura de 110 °C durante 24 horas, transcurrido este tiempo se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente durante 2 horas y se determinó la masa nuevamente.



Figura 28. Procedimiento de absorción y densidad de la grava

Se calculó la densidad aparente de la siguiente manera:

$$D_{\text{aparente}} = 0.997 \times A / (B - C) \quad (4)$$

Donde:

A = masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno, g

B = masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca, g

C = masa en el agua de la muestra de ensayo saturada, g

Se calculó el porcentaje de absorción así,

$$\text{Absorción, \%} = [(B - A)/A] \times 100 \quad (5)$$

- Masa unitaria suelta y compacta

El proceso para la determinación de la masa suelta y compacta de los agregados se muestra a continuación:

Procedimiento de apisonamiento

Se llenó el molde hasta una tercera parte y se apisonó la capa del agregado con 25 golpes utilizando una varilla de acero lisa de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud. Luego se completaron las dos partes restantes del molde y se apisonó nuevamente. Finalmente, se llenó el molde completo y se realizó la misma operación. Se determinó la masa del molde más su contenido, y la masa del molde por separado. Este procedimiento fue el mismo para todos los agregados y se realizó 3 veces para tener un promedio de los resultados.



Figura 29. Procedimiento por apisonamiento

Procedimiento por paleo

En este procedimiento se llenó completamente el molde por medio de una pala descargando el agregado desde una altura no mayor a 0.5 m. Se determinó la masa del molde más su contenido, y la masa del molde por separado. Este procedimiento fue el mismo para todos los agregados y se realizó 3 veces para tener un promedio de los resultados.



Figura 30. Procedimiento por paleo

Se calculó la masa unitaria para los procedimientos de apisonamiento y paleo de la siguiente manera según la norma NTC92:

$$M = (G - T) / V \quad (6)$$

Donde:

M = masa unitaria del agregado (Kg/m^3)

G = masa del agregado más el molde (Kg)

T = masa del molde (Kg)

V = Volumen del molde (m^3)

ANEXO B. FORMULACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLAS

- Selección de asentamiento

Para la selección de asentamiento del concreto se debe tener en cuenta que tipo de estructura se va a construir, como se va a colocar el concreto y de qué forma se desee compactar (Ver Tabla 38). Teniendo en cuenta que se realizaron los ensayos a nivel de laboratorio y se manipuló el concreto manualmente, se decidió tomar una consistencia media de la mezcla con un asentamiento entre 50 mm a 100 mm. Para efecto de los cálculos se determinó un asentamiento promedio de 75 mm.

Tabla 38. Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación.

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy Seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; concreto de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibradora	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi-seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o mas	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo- Embudo Tremie	Sección altamente reforzada, sin vibración. (Normalmente no adecuadas para vibrarse)

(GUZMAN, 2001)

- **Selección del tamaño máximo del agregado**

Para determinar el tamaño máximo del agregado es necesario conocer como son las estructuras internas de las varillas de concreto. Como en este proyecto no se utilizan refuerzos internos en el concreto, se tuvo en cuenta el tamaño de la formaleta. Según la norma NTC1377 el tamaño del agregado no puede ser mayor a 1/3 del diámetro de la formaleta. Para la elaboración de los cilindros de concreto se utilizaron formaletas de 100 mm de diámetro, por lo tanto, el tamaño máximo del agregado que se puede usar es de 33 mm. El agregado utilizado en el proyecto es apropiado pues tiene un tamaño máximo nominal y un tamaño máximo de 25.4 mm.

- **Estimación del contenido del aire**

El contenido de aire naturalmente atrapado se puede estimar a partir de la Tabla 39. Este parámetro depende del tipo de exposición que tenga el concreto, es decir, en qué ambiente se encuentra y si tiene contacto con sustancias químicas o no, y el tamaño máximo nominal del agregado.

Tabla 39. Cantidad aproximada de aire esperado en concreto

Tamaño máximo nominal del agregado		Contenido de aire en porcentaje (por volumen)			
mm	pulgada	Naturalmente atrapado	Exposición ligera	Exposición moderada	Exposición severa
9.5	3/8	3.0	4.5	6.0	7.5
12.7	1/2	2.5	4.0	5.5	7.0
19.0	3/4	2.0	3.5	5.0	6.0
25.4	1	1.5	3.0	4.5	6.0
38.1	1 ½	1.0	2.5	4.5	5.5
50.8	2	0.5	2.0	4.0	5.0
76.1	3	0.3	1.5	3.5	4.5
152.0	6	0.2	1.0	3.0	4.0

(GUZMAN, 2001)

Teniendo en cuenta la tabla anterior y el tamaño máximo nominal del agregado, el cual es 25.4 mm, se consideró un contenido de aire aproximado de 1.5%. Siendo este el aire atrapado naturalmente durante la fabricación de los cilindros de concreto.

- **Estimación del contenido de agua de mezclado**

Con el fin de estimar la cantidad ideal de agua de mezclado se tuvo en cuenta el asentamiento, el tamaño máximo del agregado, el aire incluido artificialmente, el tipo de forma y textura del agregado. Teniendo en cuenta la siguiente información y la tabla presentada a continuación (Ver Tabla 40) se seleccionó una cantidad de agua de mezclado de 188 Kg/m³.

Asentamiento del concreto: 75 mm

Tamaño máximo del agregado: 25.4 mm

Aire incluido artificialmente: No

Forma del agregado: Angular

Textura del agregado: Rugosa

Tabla 40. Requerimiento aproximado de agua de mezclado

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulgada)							
mm	pulgada	9.5	12.7	19.0	25.4	38.1	50.8	64.0	76.1
		3/4	1/2	3/4	1	1 ½	2	2½	3
Agua de mezclado, en kg/m ³ de concreto									
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	165	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

(GUZMAN, 2001)

- **Determinación de la resistencia de diseño**

Para la elaboración de los cilindros de concreto se decidió tomar como base una resistencia a la compresión de 3000 psi o 20.69 Mpa (211 kg/cm²), ya que esta es la que se usa generalmente en muchas construcciones en las cuales se utiliza cemento de uso general. Para garantizar que los cilindros de control, es decir aquellos que contienen 0% de cascarilla

de laminación van a tener la resistencia deseada, se hizo un sobre diseño de la resistencia y se seleccionó una resistencia promedio a la compresión, la cual se obtuvo de la Tabla 41. Por lo tanto, para este ensayo se tomó una resistencia a la compresión de 4210 psi o 29.03 Mpa (296 kg/cm²).

Tabla 41. Resistencia promedio requerida

Resistencia especificada a la compresión f'c (kg/cm ²)	Resistencia promedio a la compresión f'cr (kg/cm ²)
Menos de 210 kg/cm ²	f'c + 70 kg/cm ²
de 210 a 350 kg/cm ²	f'c + 85 kg/cm ²
más de 350 kg/cm ²	f'c + 100 kg/cm ²

(GUZMAN, 2001)

- **Selección de la relación agua-cemento**

La relación agua-cemento (A/C) se obtiene de la Tabla 42, teniendo en cuenta la resistencia promedio a la compresión.

Tabla 42. Relación agua-cemento correspondiente a una resistencia a la compresión.

Resistencia a la compresión kg/cm ²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.70	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

La resistencia a la compresión seleccionada es de 296 kg/cm², por lo tanto, se halló la relación agua-cemento interpolando los valores de la tabla anterior con respecto al límite inferior.

Para todos los ensayos la relación agua cemento utilizada es de 0.44. Este valor cambia para cada uno de los ensayos al hacer el ajuste por humedad.

- **Cálculo del contenido de cemento**

Con la información obtenida anteriormente de la cantidad de agua y la relación agua-cemento, se obtuvo la cantidad de cemento necesaria para la mezcla obteniendo un valor de 430.91 Kg/m³ que posteriormente se llevó a la cantidad requerida para las mezclas.

Todas las ecuaciones y fórmulas utilizadas en la formulación del diseño de mezclas son presentadas a continuación:

- **Estimación de las proporciones de los agregados**

$$V_c = \frac{P_c}{\rho_c} \quad (7)$$

$$V_c = \frac{430.91 \text{ kg/m}^3}{3.10 \text{ g/cm}^3}$$

$$V_c = 139.00 \text{ l/m}^3$$

Donde:

V_c = Volumen absoluto cemento, en l/m³

P_c = Peso seco del cemento, en kg/m³

ρ_c = Densidad del cemento, en g/m³

$$V_a = \frac{P_a}{\rho_a} \quad (8)$$

$$V_a = \frac{188 \text{ kg/m}^3}{0.997 \text{ g/cm}^3}$$

$$V_a = 188.36 \text{ l/m}^3$$

Donde:

V_a = Volumen absoluto del agua, en l/m³

$P_a = \text{Peso seco del agua, en kg/m}^3$
 $\rho_a = \text{Densidad del agua, en g/m}^3$

$$V_r = V_T - (V_c + V_a + A) \quad (9)$$

$$V_r = 1000 - (139 + 188.57 + 0)$$

$$V_r = 672.43 \frac{l}{m^3}$$

Donde:

$V_T = \text{Volumen absoluto de la mezcla de concreto, en l/m}^3$

$V_r = \text{Volumen absoluto de los agregados, en l/m}^3$

$A = \text{Volumen absoluto del contenido del aire, en l/m}^3$

$$\rho_{aa} = \frac{\rho_{ag} \times \rho_{af}}{(\rho_{ag} \times n) + (\rho_{af} \times m)} \quad (10)$$

$$\rho_{aa} = \frac{2.14 \text{ g/cm}^3 \times 2.52 \text{ g/cm}^3}{(2.14 \text{ g/cm}^3 \times 0.45) + (2.52 \text{ g/cm}^3 \times 0.55)}$$

$$\rho_{aa} = 2.30 \text{ g/cm}^3$$

Donde:

$\rho_{aa} = \text{Densidad mezcla de los dos agregados, en g/cm}^3$

$\rho_{ag} = \text{Densidad de la grava, en g/cm}^3$

$\rho_{af} = \text{Densidad de la arena, en g/cm}^3$

$n = \text{Porcentaje de arena en la mezcla de agregados}$

$m = \text{Porcentaje de grava en la mezcla de agregados}$

$$P_r = V_r \times \rho_{aa} \quad (11)$$

$$P_r = 672.43 \text{ l/m}^3 \times 2.30 \text{ g/cm}^3$$

$$P_r = 1546.03 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

$P_r = \text{Peso seco de los agregados, en Kg/m}^3$

$$P_{ag} = P_r \times m \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
P_{ag} &= 1546.03 \text{ kg/m}^3 \times 0.55 \\
P_{ag} &= 850.32 \text{ kg/m}^3 \\
P_{af} &= P_r \times n \\
P_{af} &= 1546.03 \text{ kg/m}^3 \times 0.45 \\
P_{af} &= 695.71 \text{ kg/m}^3
\end{aligned}
\tag{13}$$

Donde:

P_{ag} = Peso seco de la grava, en kg/m^3
 P_{af} = Peso seco de la arena, en kg/m^3

$$V_{ag} = \frac{P_{ag}}{\rho_{ag}} \tag{14}$$

$$V_{ag} = \frac{850.32 \text{ kg/m}^3}{2.14 \text{ g/cm}^3}$$

$$V_{ag} = 396.6 \text{ l/m}^3$$

$$V_{af} = \frac{P_{af}}{\rho_{af}} \tag{15}$$

$$V_{af} = \frac{695.71 \text{ kg/m}^3}{2.52 \text{ g/cm}^3} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ cm}^3}$$

$$V_{af} = 275.83 \text{ l/m}^3$$

Donde:

V_{ag} = Volumen absoluto de la grava, en l/m^3
 V_{af} = Volumen absoluto de la arena, en l/m^3

La cantidad de grava y arena para una mezcla de concreto de 1 m^3 es de: **850.32 kg/m^3** y **695.71 kg/m^3** respectivamente. Después de determinar las cantidades en peso seco de cada uno de los ingredientes para la elaboración del concreto se obtuvo la siguiente tabla (Ver Tabla 43), en la cual se puede evidenciar de forma resumida los resultados obtenidos.

Tabla 43. Peso seco y volumen absoluto de los ingredientes por metro cubico de concreto.

Ingredientes	Peso seco kg/m³	Volumen absoluto L/m³
Cemento	430.91	139.00
Agua	188.00	188.57
Aire	0.00	0.00
Grava	850.32	396.60
Arena	695.71	275.83
TOTAL	2164.94	1000

- Ajuste por humedad de los agregados

En los cálculos realizados anteriormente no se tiene en cuenta la humedad natural de los materiales ni la absorción de estos. Por lo tanto, se debe hacer un ajuste por humedad para garantizar que el cemento pueda absorber el agua que necesita y que la manejabilidad del concreto sea la esperada.

Para hacer el ajuste por humedad se realizaron los siguientes cálculos:

$$P_{hag} = P_{sag} \times (1 + H_{ag}) \quad (16)$$

$$P_{hag} = 850.32 \text{ kg/m}^3 \times (1 + 0.0042)$$

$$P_{hag} = 853.89 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{haf} = P_{saf} \times (1 + H_{af}) \quad (17)$$

$$P_{haf} = 695.71 \text{ kg/m}^3 \times (1 + 0.0306)$$

$$P_{haf} = 717.03 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

P_{hag} = Peso humedo de la grava, en kg/m³

P_{haf} = Peso humedo de la arena, en kg/m³

P_{sag} = Peso seco de la grava, en kg/m³

P_{saf} = Peso seco de la arena, en kg/m^3

H_{ag} = Porcentaje de humedad grava

H_{af} = Porcentaje de humedad arena

$$A = -P_{sag} \times (H_{ag} - CA_{ag}) - P_{saf} \times (H_{af} - CA_{af}) \quad (18)$$

$$A = -[850.32 \text{ kg/m}^3 \times (0.0042 - 0.0085)] - [695.71 \text{ kg/m}^3 \times (0.0306 - 0.0371)]$$

$$A = 8.17 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

A = Agua en exceso o defecto, en kg/m^3

CA_{ag} = Porcentaje capacidad de absorcion grava

CA_{af} = Porcentaje capacidad de absorcion arena

El agua de mezclado corregida se debe calcular teniendo en cuenta el agua de mezclado y el agua en exceso o defecto hallada anteriormente.

$$A_{mc} = A_m + A \quad (19)$$

$$A_{mc} = 188 \text{ kg/m}^3 + 8.17 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 196.17 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

A_m = Agua de mezclado, kg/m^3

A_{mc} = Agua de mezclado corregida, kg/m^3

El agua total de mezclado corregida para los cilindros de control es de 196.17 Kg/m^3 , por lo tanto, la relación agua cemento cambia ya que para esta se debe considerar toda el agua existente en la mezcla con relación a la cantidad de cemento.

$$A/C = \frac{196.17 \text{ kg/m}^3}{430.91 \text{ kg/m}^3}$$

$$A/C = 0.46$$

Teniendo el ajuste por humedad para los agregados y el agua, se obtienen nuevas cantidades para los ingredientes en la mezcla de concreto para un metro cubico (Ver Tabla 44).

Tabla 44. Peso húmedo de los ingredientes para un metro cubico de concreto

Ingredientes	Peso húmedo para 1000 L en kg
Cemento	430.91
Agua	196.17
Grava	853.89
Arena	717.03
TOTAL	2198.00

- Ajuste a la mezcla de prueba

Conociendo las dimensiones de las formaletas a usar que son 10 cm de diámetro y 20 cm de alto, se halla el volumen del cilindro que es igual a 1.5708 litros. Como se elaboraron 7 cilindros por mezcla, el volumen mínimo por mezcla es de 9.4248 litros. Con el fin de garantizar el volumen mínimo de mezcla para el concreto se preparó una mezcla de 15 litros, y tomando este como una nueva base de cálculo se halló el nuevo peso húmedo para todos los ingredientes (Ver Tabla 45).

Tabla 45. Peso húmedo para 15 L de mezcla de concreto

Ingredientes	Peso húmedo para 15 l en kg
Cemento	6.46
Agua	2.94
Grava	12.81
Arena	10.76
TOTAL	32.97

Para el resto de las mezclas se hizo un reemplazo volumétrico de la arena por la cascarilla de laminación en porcentaje, teniendo en cuenta que el 100% del volumen absoluto es el de la mezcla 1 que tiene 100% arena (275.83 l/m³) y 0% de cascarilla de laminación (0 l/m³)

(Ver Tabla 46). Para el resto de ingredientes el volumen absoluto con respecto al peso seco es igual al de la mezcla 1 o control.

Tabla 46. Contenido de cascarilla y arena para cada mezcla.

Muestra	Ingrediente	Porcentaje	Volumen absoluto L/m ³
1	Arena	100	275.83
	Cascarilla de laminación	0	0.00
2	Arena	85	234.46
	Cascarilla de laminación	15	41.37
3	Arena	70	193.08
	Cascarilla de laminación	30	82.75
4	Arena	55	151.71
	Cascarilla de laminación	45	124.12
5	Arena	40	110.33
	Cascarilla de laminación	60	165.50

Con estos nuevos valores se debe hacer un ajuste por humedad para cada mezcla, ya que cada una tiene una cantidad diferente de arena y cascarilla de laminación. A continuación, se muestra el procedimiento para la mezcla 2, este procedimiento es replicable para el resto de las muestras. Primero, se halló el peso seco de la cascarilla de laminación y de la arena para la mezcla 2 utilizando su peso absoluto y la densidad.

$$P_{saf} = V_{af} \times (\rho_{af}) \quad (20)$$

$$P_{saf} = 234.46 \text{ l/m}^3 \times 2.52 \text{ g/cm}^3 \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} \times \frac{1000\text{cm}^3}{1\text{l}}$$

$$P_{saf} = 591.36 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{scl} = V_{cl} \times (\rho_{cl}) \quad (21)$$

$$P_{scl} = 41.37 \text{ l/m}^3 \times 5.32 \text{ g/cm}^3 \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} \times \frac{1000\text{cm}^3}{1\text{l}}$$

$$P_{scl} = 220.16 \text{ kg/m}^3$$

Donde,

ρ_{af} = Densidad arena, en g/cm³

ρ_{cl} = Densidad cascarilla de laminacion, en g/cm³

V_{cl} = Volumen cascarilla de laminacion, en l/m³

P_{scl} = Peso seco cascarilla de laminacion, en kg/m³

Este mismo procedimiento se realiza para cada uno de los ingredientes y se obtiene los valores de la siguiente tabla:

Tabla 47. Peso seco de los ingredientes para cada una de las mezclas.

Ingrediente	Mezcla				
	1	2	3	4	5
	Peso seco kg/m ³				
Cemento	430.91	430.91	430.91	430.91	430.91
Agua	188.00	188.00	188.00	188.00	188.00
Grava	850.32	850.32	850.32	850.32	850.32
Arena	695.71	591.36	487.00	382.64	278.29
Cascarilla	0.00	220.16	440.31	660.47	880.62
TOTAL	2164.94	2280.74	2396.54	2512.34	2628.13

Luego, se calculó el peso húmedo de los agregados y el agua de mezcla corregido para la mezcla número dos.

$$P_{hag} = P_{sag} \times (1 + H_{ag}) \quad (22)$$

$$P_{hag} = 850.32 \text{ kg/m}^3 \times (1 + 0.0042)$$

$$P_{hag} = 853.89 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{haf} = P_{saf} \times (1 + H_{af}) \quad (23)$$

$$P_{haf} = 591.36 \text{ kg/m}^3 \times (1 + 0.0306)$$

$$P_{haf} = 609.48 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{hc} = P_{sc} \times (1 + H_{cl}) \quad (24)$$

$$P_{hcl} = 220.16 \text{ kg/m}^3 \times (1 + 0.0004)$$

$$P_{hcl} = 220.23 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

P_{hcl} = Peso húmedo de la cascarilla de laminación, en kg/m³

H_{cl} = Porcentaje de humedad cascarilla de laminación

$$A = -P_{sag} \times (H_{ag} - CA_{ag}) - P_{saf} \times (H_{af} - CA_{af}) - P_{scl} \times (H_c - CA_{cl}) \quad (25)$$

$$A = -[850.32 \text{ kg/m}^3 \times (0.0042 - 0.0085)] - [591.36 \text{ kg/m}^3 \times (0.0306 - 0.0371)] - [220.16 \text{ kg/m}^3 \times (0.0004 - 0.0398)]$$

$$A = 16.18 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

CA_{cl} = Porcentaje capacidad de absorcion cascarilla de laminacion

El agua de mezclado corregida se debe calcular teniendo en cuenta el agua de mezclado y el agua en exceso o defecto hallada anteriormente.

$$A_{mc} = A_m + A \quad (26)$$

$$A_{mc} = 188 \text{ kg/m}^3 + 16.18 \text{ kg/m}^3$$

$$A_{mc} = 204.18 \text{ kg/m}^3$$

Este procedimiento se realizó de igual forma para el resto de las mezclas con el fin de obtener el peso húmedo por metro cubico de concreto para cada ingrediente (Ver Tabla 48).

Tabla 48. Peso húmedo de los ingredientes para cada mezcla por metro cubico de concreto

Ingrediente	Mezcla				
	1	2	3	4	5
	Peso Húmedo kg/m ³				
Cemento	430.91	430.91	430.91	430.91	430.91
Agua	196.17	204.18	212.20	220.21	228.22
Grava	853.89	853.89	853.89	853.89	853.89
Arena	717.03	609.48	501.92	394.37	286.81
Cascarilla	0.00	220.23	440.46	660.70	880.93
TOTAL	2198.01	2318.70	2439.39	2560.08	2680.77

Teniendo en cuenta los procesos e información adquirida anteriormente se elaboraron 5 mezclas cada una de 15 litros. A continuación, se muestra la matriz de las mezclas con sus respectivos ingredientes y cantidades.

Tabla 49. Peso húmedo de ingredientes para 15 L de mezcla de concreto

Ingrediente	Mezcla				
	1	2	3	4	5
	Peso Húmedo para 15 l en Kg				
Cemento	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46
Agua	2.94	3.06	3.18	3.30	3.42
Grava	12.81	12.81	12.81	12.81	12.81
Arena	10.76	9.14	7.53	5.92	4.30
Cascarilla	0.00	3.30	6.61	9.91	13.21
TOTAL	32.97	34.78	36.59	38.40	40.21

ANEXO C. ENSAYO PARA MEDIR ASENTAMIENTO

Para realizar este ensayo, una muestra de concreto fresco se utilizó el cono de Abrams, el cual se colocó sobre una superficie plana y húmeda, y se sujetó firmemente con los pies (Ver Figura 31). Se llenó el molde con tres capas y se compactó cada capa 25 veces mediante una varilla de compactación larga. Luego de compactar la última capa se alineó la superficie del concreto e inmediatamente se retiró el cono de forma vertical. Finalmente se midió el asentamiento determinando la diferencia entre la parte superior del molde y el centro de la muestra de concreto.



Figura 31. Ensayo de asentamiento

**ANEXO D. RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE
CONCRETO**

Cilindro	Edad	Carga (N)	Tipo de falla	Diámetro promedio (cm)	Área (cm ²)	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia (Mpa)	Cumple normas dimensiones
1	3	97200	5	10.04	79.1	2450	12.29	SI
2	3	89800	3	10.02	78.9	2510	11.39	SI
3	7	136100	5	10.00	78.6	2500	17.32	SI
4	7	167200	3	10.01	78.7	2420	21.23	SI
5	28	220000	5	10.00	78.6	2470	27.99	SI
6	28	203500	3	9.97	78.0	2520	26.08	SI
8	3	77600	6	10.20	78.9	2540	9.84	SI
9	3	76000	5	9.98	78.2	2550	9.72	SI
10	7	137900	2	9.99	78.4	2520	17.58	SI
11	7	137500	2	10.00	78.6	2540	17.5	SI
12	28	197800	5	9.96	78.0	2550	25.37	SI
13	28	205700	5	9.96	78.0	2560	26.38	SI
15	3	74200	3	10.01	78.7	2580	9.42	SI
16	3	73700	3	10.02	78.8	2610	9.35	SI
17	7	115500	6	10.1	78.7	2610	14.57	SI
18	7	119600	5	10.1	78.7	2610	15.19	SI
19	28	209900	5	10.00	78.6	2640	26.71	SI
20	28	212100	2	9.96	78.0	2630	27.21	SI
22	3	62200	3	10.00	78.5	2670	7.93	SI
23	3	61400	3	10.00	78.5	2680	7.82	SI
24	7	101600	2	9.99	78.4	2700	12.95	SI
25	7	102200	5	10.02	78.8	2670	12.97	SI
26	28	154100	5	9.98	78.2	2710	19.71	SI
27	28	147200	5	9.98	78.2	2710	18.82	SI
29	3	18800	3	10.01	78.7	2710	2.39	SI
30	3	23600	3	9.99	78.4	2700	3.01	SI
31	7	46900	6	10.01	78.7	2710	5.96	SI
32	7	48700	6	10.00	78.5	2730	6.2	SI
33	28	106300	3	9.98	78.2	2760	13.59	SI
34	28	102600	5	9.98	78.2	2740	13.12	SI

ANEXO E. GRÁFICAS DE NORMALIDAD Y HOMOCEDESTICIDAD

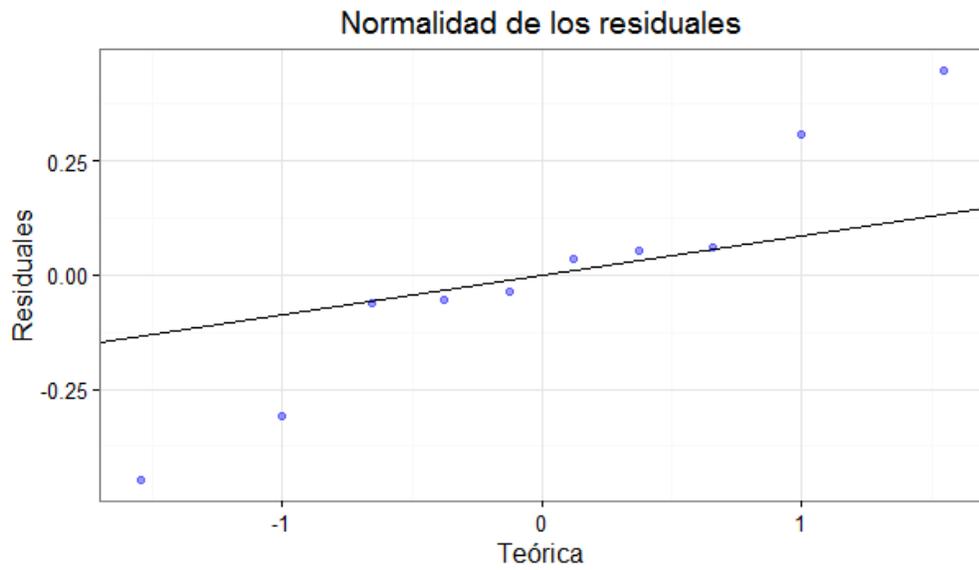


Figura 32. Representación gráfica supuesto de Normalidad a 3 días de falla

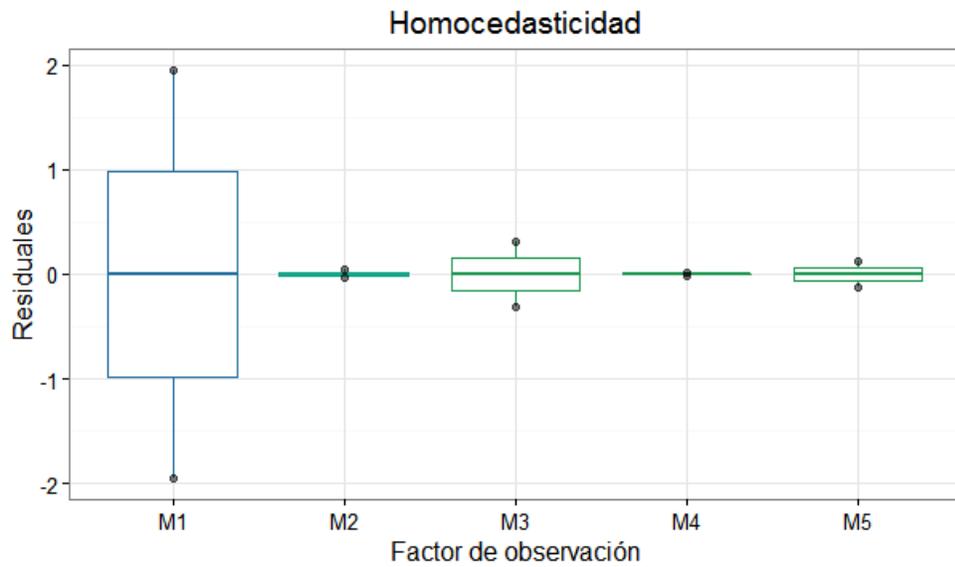


Figura 33. Representación gráfica supuesto Homocedasticidad a 3 días de falla

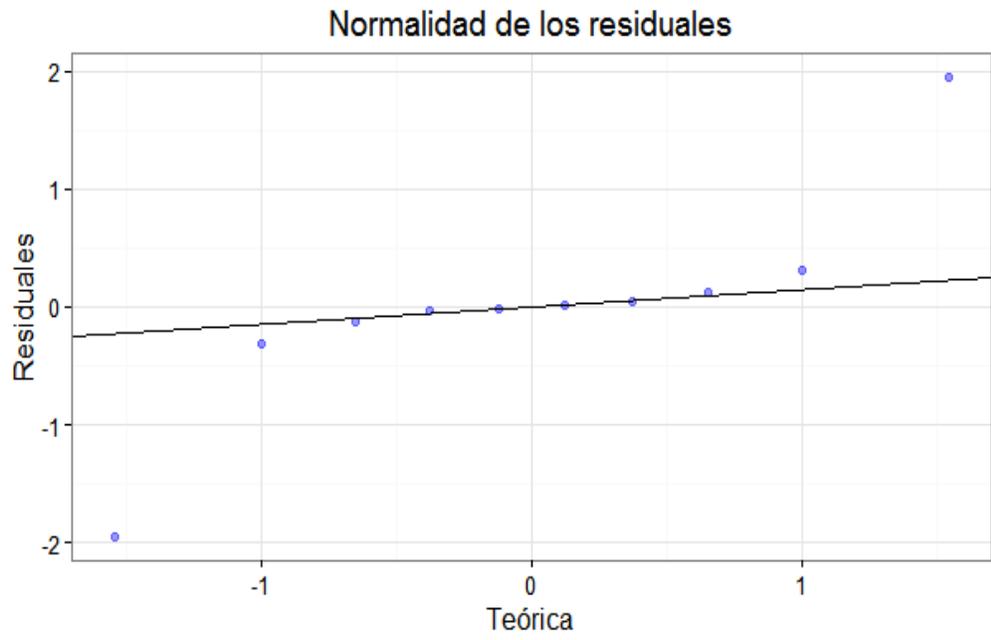


Figura 34. Representación gráfica supuesto de Normalidad para 7 días de falla

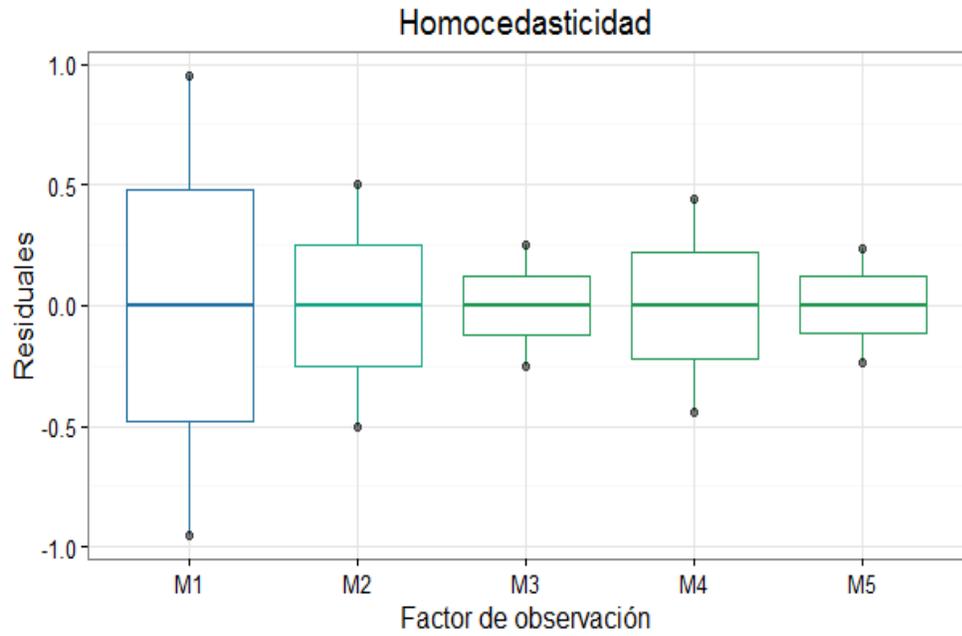


Figura 35. Representación gráfica supuesto de Homocedasticidad a 7 días de falla

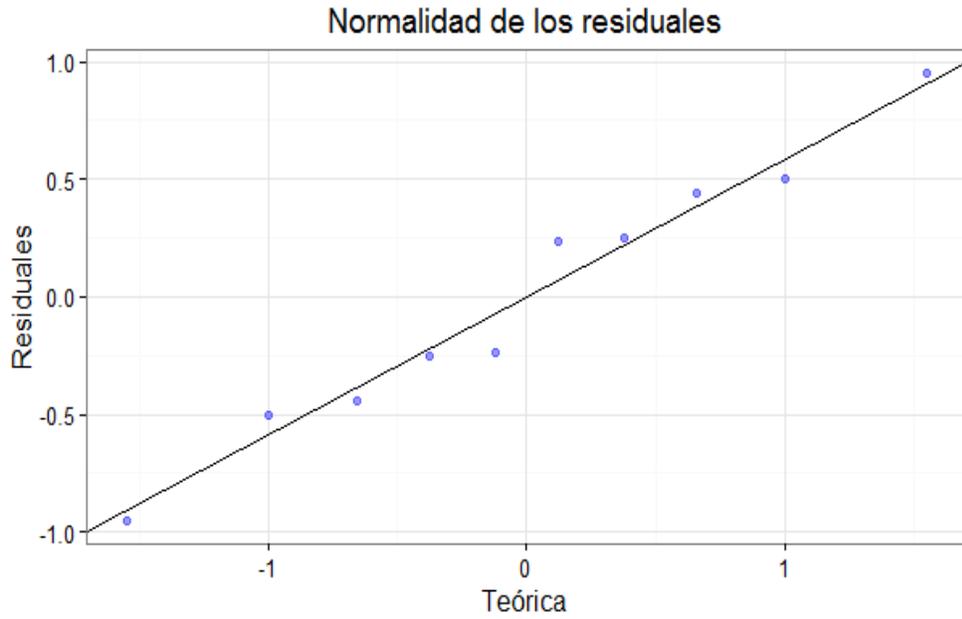


Figura 36. Representación gráfica supuesto de Normalidad para 28 días de falla

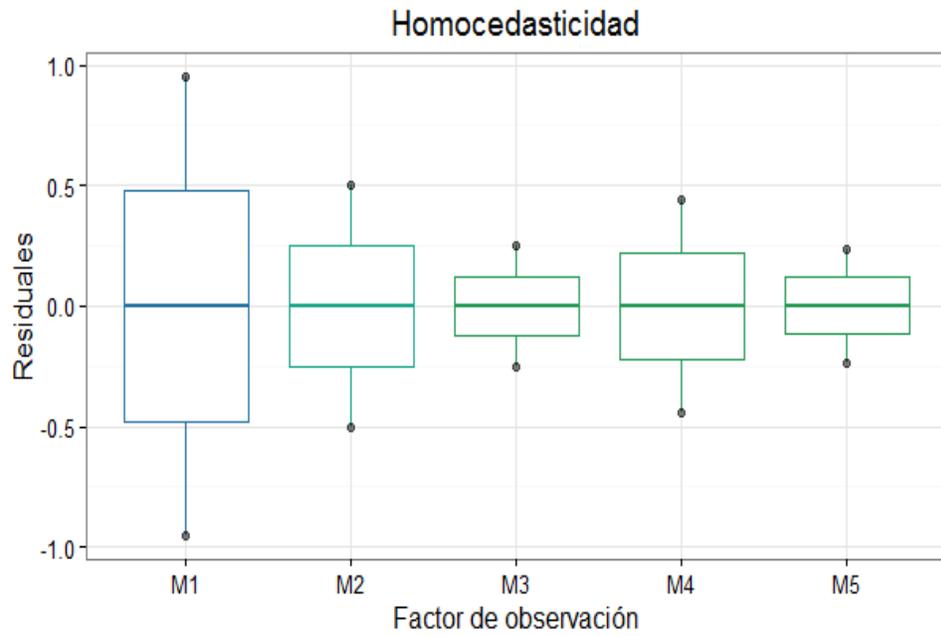


Figura 37. Representación gráfica supuesto de Homocedasticidad a 28 días de falla