

Evaluación de la resistencia a la compresión de un concreto de 21 MPa reemplazando un porcentaje del agregado fino por viruta de acero al carbono

Arroyo Domínguez Daniela Patricia

Pertuz Peña Natalia Sofía

Trabajo para optar al título profesional de ingeniero civil

Asesora:

MSc. Jennifer Villa Domínguez

Co-asesor:

PhD. Ricardo Mendoza Quiroga

Universidad de la Costa

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Barranquilla, Colombia

2022

Dedicatoria

Este es uno de los resultados más significativos a la constancia y disciplina con la que emprendí mi camino de formación para recibirme como ingeniería civil y es dedicado a la razón de mi esfuerzo, dedicación y amor a este trabajo de grado, mi familia: Lucelys, Edgar, Edgar Enrique y Shirley.

Daniela Arroyo Domínguez.

Le dedico este importante logro a mis padres, a quienes les debo todo lo que soy. Su esfuerzo, paciencia, apoyo, guía y amor fueron los motores que me permitieron culminar mi carrera profesional con éxito y poder optar al título de ingeniera civil.

A mi angelito del cielo que desde arriba ve a la primera de tus nietos convertirse en profesional y sé que está muy orgulloso.

Natalia Pertuz Peña.

Agradecimientos

En este corto texto hago un reconocimiento a las personas que indirectamente incidieron en el registro, desarrollo y finalización de este trabajo de grado.

Agradezco a la Universidad de la Costa por motivarme a investigar, por haber puesto en mi camino a profesionales excepcionales que dejaron lo mejor de sí en mi proceso de formación, en donde conocí a nuestro apoyo vital en esta investigación, a la ingeniería Jennifer.

Jennifer gracias por el empeño, atención y escucha en cada una de las reuniones sin importar la hora, por ser luz en la experimentación, aun cuando el proceso era nuevo para ambas, por la paciencia, disciplina, y persistencia que desde el día uno sembraste en mí, en este documento está el fruto de ello.

A mi primo Nelson por las gestiones necesarias para la donación de la viruta de acero, por hacerla llegar en los tiempos adecuados y por la admirable voluntad desde el día que se te menciono los objetivos de esta investigación.

A mis padres, en especial a mi madre por apoyarme y motivarme a tomarme el tiempo necesario para la realización de la investigación, por sus atenciones en las reuniones y comprensión cuando me encontraba en la etapa de análisis de resultados. A mi tía querida, por sus atenciones, disposición, consejo y apoyo en cada uno de los días de experimentación. A mi hermano Edgar Enrique, por impulsarme a ver más allá de lo que tenía en mis manos, por exigirme más de lo visible y abrir una esfera de posibilidades.

A mis mejores amistades por la escucha y respeto en medio de esta labor, en especial a mi incondicional, por ofrecer su ayuda sin medida, por estar al tanto en cada uno de los altibajos y tener siempre extendida su mano hacia mí.

Gracias Natalia Sofia por enseñarme lo talentosa y virtuosa que eres en el trabajo en equipo, no dudaste en acompañarme en este sendero brindándome tu entrega y dedicación, fuiste el soporte que le dio equilibrio a mi debatible forma de ser. Gracias por el gran acogimiento en tu familia.

Daniela Arroyo Domínguez.

Luego de un largo y arduo trabajo para la culminación de esta investigación solo quedan sentimientos de agradecimiento y satisfacción.

Gracias a Dios por ser mi guía y poner esta investigación en mi camino, además de permitirme finalizarla satisfactoriamente.

Gracias a mis padres Jasmir y Edson, mi hermana Mafe, abuelos, tíos, primos y a Daniel, que es una persona muy importante en mi vida. Por demostrarme todo su amor, darme su apoyo y sus ánimos en los momentos difíciles de este recorrido investigativo.

Gracias, Daniela Patricia por escogerme como compañera para lo que fue un camino lleno de entrega, incertidumbre, paciencia, perseverancia y resiliencia. Nada de esto hubiese sido posible sin tu apoyo, esmero y dedicación.

Gracias a la Universidad de la Costa y a todos los docentes que aportaron su granito de arena transmitiendo los conocimientos y consejos que contribuyeron a construir la profesional que hoy soy.

Gracias a nuestra asesora, la ingeniera Jennifer, por su disposición y acompañamiento continuo durante todas las etapas del trabajo. Por sus consejos, recomendaciones y correcciones, además de su orientación y aportes siempre acertados.

Finalmente, gracias a todos mis compañeros y amigos por su apoyo en esta etapa de pregrado, espero seguir contando con ustedes.

Natalia Pertuz Peña.

Contenido

Introducción	14
Planteamiento Del Problema.....	16
Justificación.....	18
Objetivos	20
General.....	20
Específicos.....	20
Marco Teórico.....	21
Esfuerzo De Compresión	21
Resistencia.....	22
Diseño De Mezcla	22
Concreto	23
Resistencia a La Compresión	26
Cemento	27
Agregados.....	29
Granulometría.....	31
Viruta De Acero Al Carbono	32
Estado Del Arte.....	34
Antecedentes Internacionales.....	34
Antecedentes Nacionales.....	38

CONCRETO DE 21 MPA CON VIRUTA DE ACERO AL CARBONO

7

Antecedentes Locales	42
Metodología, Parámetros y Variables De La Modelación	44
Ensayos De Laboratorio y Caracterización De Los Materiales	47
Densidad, Finura y Consistencia Normal (NTC 211, NTC 33 y NTC 110)	47
Densidad Del Cemento (NTC 211)	47
Finura Del Cemento (NTC 33)	49
Consistencia Normal (NTC 110)	51
Granulometría (NTC 77)	52
Granulometría Del Agregado Grueso (NTC 77)	53
Densidad y Absorción (NTC 176 y NTC 237)	56
Densidad y Absorción Del Agregado Grueso (NTC 176)	56
Densidad y Absorción Del Agregado Fino (NTC 237)	58
Masa Unitaria y Contenido De Vacíos (NTC 92)	60
Masa Unitaria y Contenido De Vacíos Agregado Grueso (NTC 92)	60
Masa Unitaria y Contenido De Vacíos Agregado Fino (NTC 92)	62
Diseño De Mezcla De Concreto	64
Preparación De Muestras	74
Equipo y Herramientas	74
Características De Los Moldes y Especímenes	75
Mezclado Del Concreto	75

CONCRETO DE 21 MPA CON VIRUTA DE ACERO AL CARBONO

8

Elaboración y Compactación De Muestras	78
Curado De Especímenes.....	78
Resultados y Análisis	80
Resistencia a La Compresión 7 Días.....	81
Resistencia a La Compresión 14 Días.....	85
Resistencia a La Compresión 28 Días.....	88
Análisis Por Porcentaje De Reemplazo.....	93
Análisis Económico Por Porcentaje De Reemplazo	96
Análisis Por Tipología De Falla	98
Conclusiones y Recomendaciones	101
Referencias.....	105

Lista De Tablas**Tabla**

Tabla 1. Tipos de concreto.....	25
Tabla 2. Tipos de cemento.....	28
Tabla 3. Límites de granulometría para agregado fino.....	31
Tabla 4. Requisitos de gradación para agregado grueso.....	32
Tabla 5. Diseño experimental.....	46
Tabla 6. Parámetros del ensayo densidad del cemento.....	47
Tabla 7. Resultados y cálculos del ensayo densidad del cemento.....	47
Tabla 8. Parámetros del ensayo finura del cemento.....	49
Tabla 9. Resultados del ensayo de finura del cemento.....	50
Tabla 10. Cálculos del ensayo de finura del cemento.....	50
Tabla 11. Parámetros del ensayo consistencia normal.....	51
Tabla 12. Resultados del ensayo consistencia normal.....	52
Tabla 13. Resultados granulometría agregado grueso.....	53
Tabla 14. Resultados granulometría agregado fino.....	55
Tabla 15. Nomenclatura y resultados de las masas del agregado grueso.....	57
Tabla 16. Nomenclatura y resultados de las masas del agregado fino.....	58
Tabla 17. Parámetros para el ensayo de masa unitaria y contenido de vacío.....	60
Tabla 18. Dimensiones molde agregado grueso.....	61
Tabla 19. Masa suelta y compacta del molde más agregado grueso.....	61
Tabla 20. Dimensiones molde agregado fino.....	62
Tabla 21. Masa suelta y compacta del molde más agregado fino.....	62

CONCRETO DE 21 MPA CON VIRUTA DE ACERO AL CARBONO

10

Tabla 22. Resultados ensayo masa unitaria.	63
Tabla 23. Resultados ensayo porcentaje de vacíos.	64
Tabla 24. Parámetros de entrada al diseño de mezcla del agregado fino.	
Tabla 25. Parámetros de entrada al diseño de mezcla del agregado grueso.	65
Tabla 26. Parámetros de entrada al diseño de mezcla del cemento.	65
Tabla 27. Resistencia a la compresión media requerida cuando no hay datos disponibles para establecer la desviación estándar.	66
Tabla 28. Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños nominales del agregado.	67
Tabla 29. Dependencia entre la relación agua-material cementante y la resistencia a la compresión del concreto.	67
Tabla 30. Datos de entrada para la interpolación de la relación agua- material.	68
Tabla 31. Datos y consideraciones contenido de cemento.	68
Tabla 32. Datos y consideraciones contenido de agregado grueso.	69
Tabla 33. Datos y consideraciones para calcular el volumen de agua.	69
Tabla 34. Datos y consideraciones para calcular el volumen de cemento.	70
Tabla 35. Datos y consideraciones para calcular el volumen del agregado grueso.	70
Tabla 36. Resultados volumen de los materiales del diseño de mezcla.	71
Tabla 37. Consideraciones masa húmeda agregado grueso.	71
Tabla 38. Consideraciones masa húmeda agregado fino.	72
Tabla 39. Resultados masa húmeda de los agregados.	72
Tabla 40. Resultados agua total de la mezcla.	73
Tabla 41. Resultado diseño de mezcla.	73

CONCRETO DE 21 MPA CON VIRUTA DE ACERO AL CARBONO

11

Tabla 42. Cantidad de material para un cilindro.....	74
Tabla 43. Cantidad de material según número de muestras.....	76
Tabla 44. Resistencia a la compresión 7 días.	81
Tabla 45. Resistencia a la compresión 14 días.	85
Tabla 46. Resistencia a la compresión 28 días.	88
Tabla 47. Precio de materiales utilizados en la investigación.	96
Tabla 48. Análisis económico por m ³ de concreto.....	97
Tabla 49. Cantidad de fallas según la edad de curado.	99
Tabla 50. Tipología de falla según los porcentajes de reemplazo	100

Lista De Figuras

Figura

Figura 1. Cilindro a punto de ser sometido a condiciones de carga axial.....	27
Figura 2. Viruta de acero al carbono para la investigación.....	33
Figura 3. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.	45
Figura 4. Curva granulométrica agregado grueso.....	54
Figura 5. Curva granulométrica agregado fino.	56
Figura 6. Separación de los materiales.	77
Figura 7. Procedimiento de mezclado.....	78
Figura 8. Concreto colocado en los moldes cilíndricos.	78
Figura 9. Desmolde de cilindros y curado en piscina.	79
Figura 10. Máquina automática para ensayos a compresión.	80
Figura 11. Comportamiento de la resistencia a los 7 días según los porcentajes de reemplazo...	82
Figura 12. Cilindros estándar sin reemplazo de viruta fallados a los 7 días.	83
Figura 13. Cilindros con reemplazo del 5% de viruta fallados a los 7 días.....	83
Figura 14. Cilindros con reemplazo del 10% de viruta fallados a los 7 días.....	84
Figura 15. Cilindros con reemplazo del 15% de viruta fallados a los 7 días.....	84
Figura 16. Comportamiento de la resistencia a los 14 días según los porcentajes de reemplazo.	86
Figura 17. Cilindros estándar sin reemplazo de viruta fallados a los 14 días.	86
Figura 18. Cilindros con reemplazo del 5% de viruta fallados a los 14 días.....	87
Figura 19. Cilindros con reemplazo del 10% de viruta fallados a los 14 días.....	87
Figura 20. Cilindros con reemplazo del 15% de viruta fallados a los 14 días.....	88
Figura 21. Comportamiento de la resistencia a los 28 días según los porcentajes de reemplazo.	90

Figura 22. Cilindros estándar sin reemplazo de viruta fallados a los 28 días.	91
Figura 23. Cilindros con reemplazo del 5% de viruta fallados a los 28 días.	91
Figura 24. Cilindros con reemplazo del 10% de viruta fallados a los 28 días.	92
Figura 25. Cilindros con reemplazo del 15% de viruta fallados a los 28 días.	92
Figura 26. Resistencia según porcentaje con respecto a las edades de curado.	94
Figura 27. Esquema de los modelos de fractura típicos.	98
Figura 28. Distribución porcentual de las tipologías de fallas.	99

Introducción

El concreto es un material indispensable en cualquier proyecto de construcción, esto dada su maleabilidad en su estado fresco y su gran resistencia a cargas en su estado endurecido. El sector de la construcción en los últimos años ha mostrado ser un gran aportante a la economía del país, de acuerdo con la Cámara Colombiana de la Construcción, Camacol, en Colombia "el sector de la construcción genera inversiones anuales por 77 billones de pesos, aporta 46 billones de pesos a la economía, demanda insumos por 34 billones de pesos anualmente y, junto con las actividades inmobiliarias, genera 1.8 millones de empleos" (Camacol, 2018).

Para la ejecución y crecimiento de este sector en la mayoría de los procesos constructivos inmobiliarios, viales e hidráulicos la necesidad de utilizar concreto es cada vez más grande, de modo que, el uso de este material ha ido en aumento en los últimos años. Lo anterior, se evidencia en los reportes del DANE para los años 2020, 2021 y 2022, donde el consumo anual fue de 457.1, 550.6 y 574.3 miles de metros cúbicos, respectivamente, generando un incremento del 4.3% en el año 2022 con respecto al año anterior (DANE, 2022). Teniendo en cuenta el gran dinamismo económico que posee este sector y la importancia de mantenerlo en un continuo desarrollo, se han formulado posibles alternativas constructivas que incidan en los costos finales y en el impacto ambiental de los proyectos.

La sociedad cada día está más enfocada al desarrollo sostenible debido a que existe conciencia en medidas como la explotación indiscriminada de materiales utilizados en construcción, tales como los agregados que son limitados y su obtención solo ocasionará a futuro su escasez. Ante esta problemática, surge la implementación de materiales reciclados que disminuyan el impacto ambiental generado por el sector mediante nuevos estudios en diseño y construcción de concreto

hidráulico que promueven medidas de eficiencia en los materiales, permitiendo optimizar los recursos y aprovecharlos al máximo.

Es un gran reto encontrar materiales que al adicionarlos o reemplazarlos en la mezcla de concreto influyan positivamente en sus propiedades físicas, químicas y mecánica, debido a esto se realizó una revisión bibliográfica de aquellos materiales que pueden ser un buen componente para la mezcla, inclinándonos por aquellos que son considerados “desechos”, que pueden generar un impacto ambiental positivo siendo reutilizados. Del resultado de dicha búsqueda se identificó a la viruta de acero al carbono como un material que puede ser aprovechado como reemplazo del agregado fino de una mezcla de concreto, esta es un residuo resultante del mecanizado, corte, lijado, laminado y pulido del acero en las empresas y talleres del sector metalmeccánico.

El reemplazo de agregado fino por viruta de acero al carbono influye en el módulo de rotura y el módulo elástico, así como, en las propiedades mecánicas del concreto lo que le permite alcanzar deformaciones más controladas y de mayor eficiencia, gracias a la disminución de las secciones de los elementos y de los costos constructivos (Díaz Herrera & Mogollon Peñaranda, 2020).

El presente trabajo de grado es de carácter investigativo, pretende evaluar un diseño de mezcla de concreto de 21 MPa reemplazando porcentajes del agregado fino por viruta reciclada de acero al carbono; a partir de estas mezclas se realizará un análisis del comportamiento mecánico del material comparando los resultados con un concreto convencional de esta resistencia.

Planteamiento Del Problema

El concreto es uno de los materiales más relevantes del sector de la construcción, debido a que es indispensable para la ejecución en obras de infraestructuras, sin embargo, su obtención y uso no es amigable con el medio ambiente, por estas razones muchos investigadores se han motivado a desarrollar nuevas técnicas, analizando y evaluando su comportamiento.

A lo largo de los años se han realizado investigaciones y planteamientos sobre la adición de diferentes elementos o reemplazo de los agregados en el concreto como plástico, vidrio, madera, entre otros; con la finalidad de identificar otras alternativas de mezcla que funcionen y cumplan con las propiedades esperadas del concreto. Estas investigaciones están enfocadas en la optimización de la materia prima, los costos y al uso de materiales que son amigables con el medio ambiente después de su vida útil, considerando que el concreto sea garante de resistencia, durabilidad y estabilidad estructural.

Debido a lo anterior, surge la necesidad de evaluar y comparar la resistencia a la compresión y el comportamiento de un concreto convencional de 21 MPa con un diseño de mezcla de concreto reemplazando un porcentaje del agregado fino por viruta de acero al carbono proveniente de una aleación de hierro y carbono, este material es el más utilizado en la elaboración de elementos de trabajo mecánico en la industria lo que implica la generación de una cantidad considerable de residuos. Con la intención de obtener y ofrecer una mezcla alternativa que sea capaz de igualar o superar la resistencia mencionada, pero que también contribuya a la optimización de recursos y a la reducción del impacto ambiental generado por los materiales de construcción, donde el concreto es uno de los más influyentes. Entonces, con este planteamiento, se propone el siguiente interrogante: ¿Cuál es el comportamiento mecánico de un concreto con reemplazo de un porcentaje de agregado fino por viruta de acero al carbono con respecto a un concreto de 21 MPa?

En base a este interrogante, esta investigación propone realizar un análisis comparativo, bajo las normativas vigentes como la NSR-10 y la NTC, de unas muestras con y sin reemplazo del agregado fino por un porcentaje de viruta de acero al carbono sometidas a ensayos de compresión.

Justificación

Un material como el concreto es imprescindible en cualquier proyecto constructivo, con el paso de los años estos proyectos se han convertido casi que obligatorios para el crecimiento y desarrollo en el mundo, a su vez, el proceso de fabricación, las reacciones químicas, los compuestos y los cambios de estado, pueden llegar a ubicarlo como un material contaminante; diferentes países y organizaciones realizan acuerdos para trabajar en ello, un ejemplo de la búsqueda de estas alternativas es el objetivo 11 “Ciudades y comunidades sostenibles”, propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para el desarrollo sostenible (ONU, 2015).

La gran demanda del concreto incentiva a indagar opciones que permitan el aprovechamiento y el uso efectivo de dicho material, mediante el reemplazo de un porcentaje del agregado fino por un residuo sólido como la viruta de acero, a través del análisis y comparación de un concreto convencional con igual o mejores propiedades garantizando su utilidad y rendimiento en el mercado de la construcción.

Se ha comprobado que la fibra de acero mejora significativamente las características frágiles del concreto, respondiendo de manera satisfactoria bajo cargas estáticas y casi estáticas, a golpes, fatiga y cargas (Singh, 2017). Esto indica que la respuesta estructural del diseño tiene grandes probabilidades de satisfacer los estándares de calidad y seguridad de un concreto convencional, este aprovechamiento implica una reducción en los costos de producción y en consecuencia a ello se estaría cuidando y preservando la explotación de los áridos como recurso natural.

Entre los beneficios económicos es pertinente considerar la apertura de nuevos mercados a partir del consumo sostenible, impulsando la inclusión de un nuevo material de construcción como la viruta reciclada de acero al carbono; la atracción de nuevas fuentes de financiación en alianzas

entre el sector de la construcción y el metalúrgico; la innovación en nuevos productos y modelos de negocios y sistemas de infraestructura sostenible (Mora Castro, 2021).

La sustitución de áridos por diversos materiales reciclados ha logrado importantes avances en todo el mundo, reduciendo así la necesidad de extraer áridas vírgenes (Meyer, 2009). Es importante el desarrollo de esta propuesta investigativa-experimental, ya que, fomenta el interés en proponer diferentes alternativas relacionadas al contexto social, sector constructivo e integrar la conservación de recursos naturales con el efecto que generan estos cuando pasan por procesos físicos y químicos.

Objetivos

General

Evaluar la resistencia a la compresión de un concreto de 21 MPa reemplazando un porcentaje del agregado fino por viruta de acero al carbono.

Específicos

- Caracterizar cemento, viruta y agregados a utilizar en la fabricación de cilindros de prueba.
- Diseñar una mezcla de concreto de 21 MPa en base a las propiedades de los materiales caracterizados.
- Realizar los ensayos de compresión para conocer las propiedades mecánicas y la resistencia máxima de las muestras bajo este tipo de esfuerzo.
- Comparar la resistencia a la compresión de las probetas de concreto ensayadas con viruta reciclada en reemplazo de agregado fino con respecto a las probetas ensayadas de concreto estándar de 21 MPa.
- Determinar el porcentaje de viruta de acero óptimo en reemplazo del agregado fino para un concreto de 21 MPa.

Marco Teórico

Para el desarrollo de la investigación fue necesaria la apropiación y análisis de conceptos claves para respaldar o denegar la metodología y experimentación de la propuesta. Aplicar esta estrategia recopila la visión conceptual de artículos, informes, sitios web, reseñas, libros o conferencias desde múltiples sectores e incluso países y permite orientar la investigación en un margen teórico muy puntual y específico relacionando el contexto de cada uno de los conceptos con el objetivo propuesto.

Los temas que se manejan en el presente estudio están relacionados con el área de desempeño de la ingeniería civil, vinculados directamente al sector de la construcción donde para cualquier proyecto de obra es imprescindible la utilización del concreto, que es el principal protagonista de este estudio. Por lo anterior, se desglosan los términos más relevantes para comprender la investigación.

Esfuerzo De Compresión

Un elemento o un cuerpo se encuentra sometido a un esfuerzo de compresión en el momento que se somete a fuerzas que actúan sobre una misma línea en sentido contrario y que van dirigidas hacia un mismo punto, tratando de reducir las dimensiones de este acortándolo o aplastándolo. En el comportamiento a compresión de un elemento también influye su esbeltez, debido a que se puede generar pandeo o efectos de esbeltez si la longitud de él es grande en comparación de las dimensiones de la sección transversal, no obstante, la respuesta a esos esfuerzos se expresa en la capacidad que tiene el objeto para resistirlos.

Resistencia

La característica distintiva más importante de cada elemento estructural es su resistencia real, que debe ser lo suficientemente grande como para soportar, con una amplitud dada, todas las cargas que se espera que lo afecten durante toda la vida de la estructura, sin causar daños u otros inconvenientes. La resistencia de un elemento estructural se puede definir como el valor máximo que puede alcanzar una determinada acción y depende de las resistencias de los materiales que la conforman, también del cuidado que se tenga en la construcción.

Para alcanzar la resistencia esperada de un material, cuerpo o compuesto, se proyecta el comportamiento esperado, mediante un diseño o guía estadísticas de resultados obtenidos, en el caso del concreto la proyección se realiza a través de un diseño de mezcla.

Diseño De Mezcla

La dosificación apropiada y factible, de los materiales que componen el concreto, que cumpla con las características de trabajabilidad, economía, resistencia a la compresión y durabilidad según los requisitos de un proyecto específico, se determina con el diseño de mezcla. Los métodos existentes son basados en procesos empíricos, por lo que se deben ejecutar ensayos de prueba en laboratorio para comprobar que cumpla con las especificaciones normativas y del proyecto, para así, de ser necesario realizar las correcciones y ajustes correspondientes; algunos de los métodos son: PCA, ACI, Fuller and Thomson, Walker y del módulo de finura (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

El método más utilizado en la actualidad es el método ACI del American Concrete Institute del comité 211 de 1991, que se va renovando constantemente. Este método experimental se fundamenta en la determinación de ciertos parámetros mediante tablas y Figuras para obtener las

proporciones iniciales de las cantidades de los materiales que se utilizarán para la mezcla del concreto, a su vez, propone la siguiente serie de pasos para el adecuado procedimiento del diseño (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004):

- Establecer la resistencia de diseño.
- Seleccionar el asentamiento.
- Seleccionar el tamaño máximo del agregado.
- Determinar el agua de mezclado y el contenido de aire.
- Elegir la relación agua-cemento.
- Calcular el contenido de cemento.
- Estimar el contenido de agregado grueso.
- Estimar el contenido de agregado fino.
- Ajustar la humedad del agregado.
- Ajustar en las mezclas de prueba.

La buena práctica de cualquiera de las metodologías para el diseño de mezcla ofrecerá un concreto que satisfaga las necesidades por las cuales fue requerido.

Concreto

El concreto es una mezcla de cemento, agua, aditivos o adiciones, agregado fino y grueso, que combinados entre si producen un material con propiedades físicas y mecánicas como la resistencia a la compresión, la durabilidad, la dureza, la apariencia e impermeabilidad.

La edad del concreto es un parámetro para evaluar la resistencia mecánica del concreto, la cual depende de la normatividad del país en donde se realice, en Colombia la norma NRS-10 nos indica que se debe realizar a los 28 días, sin embargo, se pueden evaluar también a los 3, 7 y 14 días.

Es un material utilizado a nivel mundial para la construcción de todo tipo de obras de infraestructura como carreteras, edificaciones, puentes, entre otros, tiene diferentes tipos según su uso y la necesidad del proyecto. Conocer sus diferencias es muy importante al momento de utilizarlo en una obra, debido a que difieren en sus características como la resistencia, terminado, durabilidad, fraguado, lugares donde será vaciado el concreto y tiempo en el que alcanzará su resistencia máxima (Salazar, 2021). Algunos tipos de concretos conocidos y utilizados en el mercado según su composición y uso son:

Tabla 1

Tipos de concreto

Tipo de concreto	Característica principal	Uso según proyecto
Simple	No tiene armadura de refuerzo y utiliza cemento de uso general	Veredas y pavimentos de poco tráfico
Ciclópeo	Compuesto por grandes piedras o bloques, tampoco tiene armadura	Cimentación corrida, bases, rellenos o muros de contención de baja resistencia
Estructural/Armado	Tiene armadura de refuerzo para controlar efectos de tracción, flexión, cortante, entre otras que no cumple solo el concreto.	Elementos estructurales como columnas, vigas y losas
Hidráulico	Rígido, impermeable y resistente a radiación solar	Para mayor resistencia a la intemperie y mejor drenaje superficial
Premezclado	Se dosifica en planta	Se transporta a la obra en camiones mezcladores
Prefabricado	Fabricados en un lugar diferente a la posición final de la estructura	Vigas, columnas, pilotes, viguetas, paneles de muros de carga, etc
Polimérico	No se utiliza cemento, es una mezcla de agregados secos y resina sintética como agente aglomerante, reforzada con fibra de vidrio y de muy alta resistencia a la compresión	Pisos epóxicos o en poliéster, tanques, piscinas, canales de drenaje, estructuras de alcantarillado, etc
De vacío	Vertido en una montura con alfombra al vacío para eliminar el agua en la colocación	Elimina agua de mezclado innecesaria o sobrante
Arquitectónico/Coloreado	Resistencia y costos variables por complejidad logística	Elementos caravista en tono o color que se desee
Permeable/Ecológico	Permite que el agua fluya a través de la estructura para recuperar el agua y evitar desertificación de los suelos	Estacionamientos, piletas, pistas, veredas, ciclo vías, etc

Nota. Adaptado de “Tipos de concreto” (Salazar, 2021).

En la ingeniería estructural la forma más usual de validar que en un concreto sus componentes aportan y cumplen con la resistencia esperada, es mediante la evaluación de la resistencia a la compresión, con ella se define si el concreto a lo largo de su vida útil cumplirá con el uso que se le asignó.

Resistencia a La Compresión

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa y con alguna frecuencia Psi (Cemex, 2019). Esta característica es indispensable al momento de diseñar estructuralmente los elementos de un proyecto constructivo, dado a que nos permite identificar si cumplen las solicitaciones de las cargas impuestas. A su vez, es importante que durante el proceso constructivo se evalúe y verifique que el concreto realmente cumple con la resistencia diseñada a través del ensayo de resistencia a la compresión, el cual, en Colombia rige bajo la (NTC 673, 2010).

Este método de ensayo, según la norma, consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen. Dichos cilindros se realizan bajo la (NTC 550, 2000), para la elaboración y curado de especímenes de concreto en obra; y bajo la (NTC 1377, 1994), para la elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio.

Figura 1

Cilindro a punto de ser sometido a condiciones de carga axial



Es relevante comprender la función y aporte de cada uno de los componentes que conforman la mezcla de concreto, el principal material de ella y de cualquier compuesto estructural es el cemento.

Cemento

El cemento es un conglomerado producto de la pulverización del Clinker, compuesto principalmente por silicatos de calcio hidráulico, mezclado con yeso y aditivos químicos constituyen al principal material de la construcción, que tiene la capacidad de fraguar y endurecer con adicción de agua formando un material compacto con características como la manejabilidad, la resistencia, la durabilidad y estéticamente atractivo.

En la actualidad existen diferentes tipologías de cemento que varían según la necesidad de la estructura, las condiciones naturales del lugar donde se realizará la construcción, la estética y entre muchos otros aspectos. La Asociación del Cemento Portland o PCA por sus siglas en inglés, dentro

del libro “Diseño y control de mezclas de concreto” explica los tipos de cementos y menciona los principales usos de estos según el tipo de proyecto a desarrollar. A continuación, se resume la información en la siguiente tabla:

Tabla 2

Tipos de cemento

Tipo de cemento	Característica principal	Uso según necesidad
Tipo I	Cemento para uso general donde las no son necesarias propiedades especiales.	Pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, mampostería, concreto prefabricado y precolado.
Tipo II	Tiene propiedades de moderada resistencia a los sulfatos.	Estructuras normales, miembros expuestos a suelos o agua subterránea.
Tipo III	Ofrece resistencia a edades tempranas, normalmente una semana o menos.	En clima frío reduce el tiempo de curado y se utiliza cuando se necesita desencofrar o poner en servicio la estructura antes de lo determinado.
Tipo IV	Minimiza la tasa y cantidad de calor generado por la hidratación, y desarrolla la resistencia en una tasa más lenta.	Estructuras de concreto masivo, como grandes presas por la gravedad. Raramente está disponible en el mercado.
Tipo V	Desarrollo a la resistencia más lento que el cemento tipo I, tiene alta resistencia a los sulfatos, maneja uso de baja relación agua-cemento y baja permeabilidad.	Concretos expuestos a acción severa de sulfatos.
Con aire incluido	Corresponden a la composición de los cementos ASTM tipos I, II y III, pero en su producción se muele un inclusor de aire con el clínker. Producen concreto con una mayor resistencia a congelamiento y deshielo.	El aire incluido en la mayoría de los concretos se logra a través de aditivos inclusores de aire y no de este tipo de cemento.
Portland blanco	Su diferencia radica en el color, ya que el proceso de producción se controla de tal manera que el producto final será blanco.	Arquitectónico en muros estructurales, concreto premoldeado y CRFV, paneles de fachada, superficies de pavimento, estuco, pinturas en cemento, mortero para ladrillos y concreto decorativo.

Nota. Adaptado de “Diseño y control de mezclas de concreto” (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

El más común es el cemento tipo I de uso general, como el de la marca Ultracem, fue utilizado para el desarrollo de esta investigación dado que solo se evaluará el comportamiento del concreto

sin tener en cuenta propiedades especiales como el resto de los cementos. Sin embargo, se espera que con los agregados se logre la compactación y adherencia deseada.

Agregados

Los agregados junto al agua potencializan las propiedades del cemento, formando mezclas, morteros y concreto, correspondiendo a porcentaje superiores al 60% del volumen de estos, hay dos tipos de agregados, definidos por el tamaño de sus granos. Los agregados finos se identifican como arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo del agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm. Son considerados indispensables, ya que no sólo incrementan la resistencia del concreto, sino que también pueden hacer que la mezcla sea más compacta, permitiendo aplicaciones como la impermeabilización y retención de temperatura (Cemex, 2022).

En el artículo de Argos “Tipos de agregados y su influencia en el diseño de mezcla del concreto”, escrito por el Ing. Civil Omar Silva, se discriminan los agregados en los siguientes tipos:

- I. Por origen, varían los tipos según la procedencia de las rocas y los procesos físico-químicos de su formación y se pueden encontrar los siguientes tipos:
 - Agregados ígneos, provenientes de las rocas ígneas, pueden ser intrusivas, filoninas o extrusivas.
 - Agregados sedimentarios, formados por fragmentos de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias. Se pueden originar por descomposición y desintegración o por precipitación o deposición química.

- Agregados metamórficos, provenientes de rocas metamórficas, que a su vez provienen de ígneas y sedimentarias, experimentan grandes presiones y altas temperaturas generadas en los mismos metamorfismos de contacto.

II. Por color, solo considera el color del material para hacer una diferenciación, sin embargo, también es uno de los métodos que menos información proporciona acerca del material y del desempeño que puede tener en la mezcla de concreto.

III. Por tamaño de partícula, se deriva de dividirlos de acuerdo con aquel que pasa o no la frontera nominal de 4,75 mm (Tamiz N°4), de acuerdo con lo estipulado en la Norma Técnica Colombiana NTC 32, Tejido de alambre y tamices para propósito de ensayo.

IV. Por fragmentación, pueden ser natural derivados de procesos como la erosión, manufacturados en procesos mecánicos o mixtos.

V. Por peso específico, determinado a través del peso unitario de los agregados, pueden ser ligeros, normales o pesados.

VI. Reciclados, tienen su origen principal en las demoliciones y varían dependiendo de la estructura de la cual provengan (nueva construcción, reforma o demolición) y de factores como función para la cual fue diseñada la estructura original, edad de la estructura, zona donde fue construida, entre otros.

Para poder conocer a detalle todo lo anterior, es necesario la caracterización de los agregados y se realiza con un ensayo de granulometría.

Granulometría

La granulometría es conocida como la distribución de los agregados teniendo en cuenta el tamaño de las partículas que son determinadas mediante el uso de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas. Normalmente es expresada, junto con sus límites, en el porcentaje que pasa por cada tamiz. En Colombia se determina la granulometría para materiales estructurales bajo el método de la Norma Técnica Colombiana (NTC 77, 1994), que tiene como objetivo determinar la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos, a través de un proceso de tamizado. A su vez, para realizar la mezcla del concreto se requiere cumplir ciertas especificaciones en los agregados para garantizar las propiedades necesarias para su adecuado funcionamiento estructural, por ello, en la (NTC 174, 2000) se establecen los requisitos de gradación y calidad de los agregados finos y gruesos, para uso en concreto, los cuales se muestran a continuación.

Para el agregado fino se especifica que debe estar compuesto de arena natural, arena triturada o una combinación de estas y que el análisis granulométrico debe clasificar dentro de los siguientes límites:

Tabla 3. Límites de granulometría para agregado fino.

Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 μm	25 a 60
300 μm	10 a 30
150 μm	2 a 10

Nota. Tomado de la (NTC 174, 2000).

Asimismo, para el agregado grueso se menciona que debe estar compuesto de grava, grava triturada, roca triturada, escoria de alto horno enfriada al aire, o concreto triturado fabricado con cemento hidráulico o una combinación de ellos, y para su gradación debe cumplir con los requisitos establecidos en la siguiente tabla para el número de tamaño especificado:

Tabla 4

Requisitos de gradación para agregado grueso

Número del tamaño del agregado	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm (No.4)	2,36 mm (No.8)	1,18 mm (No.16)
1	90 mm a 37,5 mm	100	90-100	-	25- 60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
2	63 mm a 37,5 mm	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25,0 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 19,0 mm	-	-	-	-	100	90-100	-	0-15	-	0- 5	-	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0- 5	-	-
5	25,0 mm a 12,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	-	0- 5	-	-	-
56	25,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	40- 85	10-40	0- 15	0- 5	-	-
57	25,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0- 5	-
6	19,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20 - 55	0- 15	0- 5	-	-
67	19,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20 - 55	0- 10	0- 5	-
7	12,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 - 100	40 - 70	0- 15	0- 5	-
8	9,5 mm a 2,36 mm (No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 - 100	10-30	0- 10	0-5

Tal como previamente se ha descrito hay dos tipos de agregados que tienen funciones definidas en la mezcla, en esta investigación se vincula la viruta como un material innovador en las mezclas de concreto con la finalidad de reemplazar porcentualmente el agregado fino.

Viruta De Acero Al Carbono

El acero es el resultado de la aleación entre el hierro y el carbono, el cual se produce en el área conocida como acería o siderurgia, por otra parte, el carbono es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre y cuarto más abundante en el universo, no es un metal, y junto al acero, es decir, un acero al carbono genera un incremento de sus propiedades mecánicas como la dureza, la resistencia y disminuye la ductilidad, soldabilidad y la elongación, lo que mejora su comportamiento bajo condiciones de humedad alta y temperaturas bajas.

Para el acero existen diferentes procesos de mecanizado en estado virgen o cuando se encuentra en medio de su vida útil, como es el caso de la granalladora que es un equipo que toma cualquier porción o pieza que presenta corrosión o alguna otra reacción fisicoquímica para eliminar ese desgaste o afectación y pulir la superficie, liberando residuos de material conocidos como virutas.

Este material incrementa la resistencia a la flexión, ductilidad y tenacidad del concreto, produciendo un aumento de la capacidad portante, logrando una alta capacidad de absorción de energía y resistencia en el impacto para solicitaciones dinámicas, así mismo, es compatible con todo tipo de cemento, compuestos de curado, súper plastificantes, reductores de agua medios o altos, endurecedores y selladores (Briones Ponce, Zambrano Macías , Muñoz Macías, Ruiz Párraga, & Panchana de Calderero , 2020).

Figura 2

Viruta de acero al carbono para la investigación



Estado Del Arte

Con la finalidad de llevar la presente investigación a un dimensionamiento actualizado de la información que se encuentra documentada y publicada con respecto al tema de la implementación de la viruta de acero al carbono como reemplazo de un porcentaje del agregado fino fue primordial identificar qué metodologías y alternativas similares se han propuesto. Para ello, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica donde se compilaron las investigaciones afines con la temática, que fueron de gran ayuda en el desarrollo práctico y primordiales en los análisis del presente estudio.

Antecedentes Internacionales

A nivel internacional se han realizado investigaciones que comparan el comportamiento del concreto con la adición de virutas y fibras de acero con respecto al peso del cemento.

En la investigación “Análisis comparativo de la resistencia a tracción y compresión del hormigón adicionando virutas de acero comercial fundido y el hormigón con fibras de acero comerciales” en el año 2017 el autor Franklin Mauricio Sandoval Unapuch planteó incrementar la resistencia a un diseño de mezcla de 240 kg/cm² adicionando 0%, 1%, 1.25% y 1.5% de Virutas de acero comercial fundido y Fibra de acero comercial con respecto al peso del cemento, así mismo, en la investigación “Comportamiento mecánico y de auto-monitorización de morteros reforzados con residuos metálicos” el autor Ariel Cartes Muñoz en el 2017 evaluó la influencia de la viruta y la fibra de acero de 2mm en el comportamiento mecánico adicionando un 4%, 8%, 12% y 16% respecto al peso unitario del cemento. Concluyendo un aumento de las propiedades en todas las adiciones, pero significativamente en los resultados de la viruta de acero; obteniendo incrementos de resistencia de 240 kg/cm² a 276,39 kg/cm² con un porcentaje de 1.5% y

porcentajes de 16% en la primera y segunda investigación respectivamente (Sandoval Unapucha, 2017).

Así como se han desarrollado investigaciones con adición de virutas y fibras de acero, también se identifican algunas para el análisis de la sustitución de un porcentaje de agregado fino por estos materiales. Lo anterior se evidencia, en el trabajo titulado “Resistencia a compresión de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ sustituyendo agregado fino por fibras y virutas de acero, Ancash – 2019”, donde, se diseñó una mezcla de concreto reemplazando porcentajes de 4% y 6% de fibras y viruta de acero, comprobando la resistencia a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días. Además, se obtuvieron aumentos del 14% de la resistencia con la sustitución al 4% del agregado fino por viruta y del 16% para fibras, demostrando que se mejora la resistencia de un concreto normal; también, se determinó que la resistencia de cada muestra aumenta en función al porcentaje con respecto a las virutas de acero (S. B. Deledesma Carrera, 2019).

La viruta de acero también se ha utilizado como adición en diferentes diseños de mezclas tal como la investigación “Efecto de la Viruta de Acero en la Resistencia a la Compresión del Concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ ” en el año 2018 la autora Melissa Garate Labajos mediante una técnica de observación experimental comparó el comportamiento de un diseño de mezcla convencional con ese mismo diseño más la adición del 0.2% de viruta de acero con respecto al peso total de esa mezcla; el ensayo de resistencia a la compresión evaluado a los 7,14, y 28 días permitió establecer una diferencia de 13.36% obteniendo una resistencia de 238.05 kg/cm^2 , afirmando la hipótesis inicial, en la que se postulan efectos significativos con la adición de viruta de acero (Garate Labajos, 2018), de manera análoga, en 2019 en la investigación “Viruta de Acero en la Resistencia a la Compresión y Flexión del Concreto” evaluando resistencias de $f'c=210\text{kg/cm}^2$ y $f'c=175\text{kg/cm}^2$, se comparó experimentalmente el concreto convencional y concretos con

adiciones porcentuales del 0.2%, 0.4% y 0.6% de viruta de acero respecto del peso total de la mezcla. De los resultados se obtuvo un incremento del 20% en el ensayo de compresión para los valores de resistencia de diseño con el porcentaje de adición del 0.4% de viruta a la mezcla y un valor máximo en resistencia a flexión para este mismo porcentaje y del concreto de 210 kg/cm². A su vez, se realizó un análisis de varianza Anova, el cual, concluyó que la viruta de acero puede mejorar la resistencia a la compresión mientras que no ofrece cambios significativos en la resistencia a la flexión (Guzmán Hidalgo & Garate Labajos, 2019).

También se han realizado investigaciones en las que se modifica el diseño de mezcla, de modo que se sustituye o reemplaza un porcentaje o porción del agregado fino. En la investigación “Resistencia de concreto $f'c=210$ kg/cm² con sustitución del 10% del agregado fino por viruta metálica” del año 2018 el autor Evelin Rosario Espinoza Portal evaluó la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado, se obtuvieron resultados de 225.97 kg/cm² en la muestra con sustitución y 214.16 kg/cm² para la muestra patrón, concluyendo que los resultados eran los esperados. Para el mismo año, 2018, se desarrolló una investigación titulada “Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto, reemplazando el agregado fino por viruta de acero en porcentajes de 7%, 8% y 9% con respecto de un concreto patrón, con agregados de las canteras de Vicho y Cunyac”, donde se demostró y verificó experimentalmente que reemplazar un porcentaje del agregado fino por viruta de acero, en función del peso, tiene un efecto positivo en las resistencias frente a un concreto patrón. El comportamiento evaluado del concreto se basó en la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta y módulo de elasticidad, donde sus resultados incrementaron en todas las edades de curado, desde los 7 hasta los 28 días exigidos por norma (Durand Diaz & Leiva Mora , 2018).

La autora Michelle González en búsqueda de la aplicación de nuevos residuos propone la sustitución de viruta de acero en porcentajes de 0%, 5% y 10% del peso de la arena lavada en una investigación aplicada- experimental titulada “Evaluación de la viruta de acero como agregado fino para concreto estructural” correspondiente a un diseño de mezcla de 298kg/cm², para ello realizó ensayos de resistencia a la compresión evaluado a los 7, 14, y 28 días, obteniendo una resistencia de 310 kg/cm² y 225 kg/cm² para la sustitución de 5% y 10% respectivamente; de lo anterior concluyeron que ocurrió un efecto adverso a el incremento de la resistencia cuando se evaluó el porcentaje de sustitución del 10%, ya que el valor obtenido fue menor que el diseño de mezcla y no superó la resistencia de diseño como el porcentaje del 5% que evidenció un aumento de 4 % con respecto al diseño (Gonzalez Ramos, 2018). Sin embargo en Ecuador, en el año 2020, según el artículo científico “Análisis de la prestación mecánica del hormigón empleando virutas de acero como agregado fino”, utilizando virutas de acero como agregado fino en sustituciones porcentuales del 5%, 10% y 15% y realizando los ensayos de resistencia a la compresión y el de resistividad superficial, se obtuvieron resultados que revelaron un buen comportamiento mecánico del hormigón, dado que sus resistencias superaron la nominal, identificada como 240 kg/cm² (Briones Ponce et al., 2020).

Estas investigaciones llevan a considerar que, aunque las condiciones sean parecidas no siempre el resultado debe ser satisfactorio, en el año 2021, en la investigación “Efecto en los esfuerzos a flexión y compresión con la adición de viruta de acero a la mezcla de concreto” en la que se ensayaron probetas de concreto a los 7, 14 y 28 días, no arrojaron los mismos resultados positivos, dado que en sus conclusiones se destacó que a mayor cantidad de viruta que se reemplace en la mezcla la resistencia a la compresión tenderá a disminuir (Vásquez Tarrillo, 2021).

No obstante para ese mismo año y en el mismo país, se publicó una investigación “La viruta de acero como sustituto del agregado fino y sus propiedades en el concreto” la autora Rosmery Pérez evaluó la sustitución parcial del agregado fino por viruta de acero en 4%, 6%, 10% y 12%, concluyendo que la viruta de acero como sustituto del agregado fino modifica las propiedades físicas y mecánicas del concreto, pues se obtuvo que el aumento del porcentaje de sustitución del agregado fino por la viruta de acero representa una disminución en la resistencia a la compresión y a la flexión con respecto a la muestra patrón de 210 kg/cm² (Pérez Veli, 2021).

Así como se tuvieron en cuenta las fibras de acero, también se estudió el comportamiento mecánico del concreto con la sustitución del agregado fino por virutas y limallas de acero en la investigación “Resistencia a la compresión de un concreto $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ sustituyendo parcialmente el agregado fino por virutas y limallas de acero” del año 2021 en Perú. Se analizaron los porcentajes de sustitución del 4%, 6% y 8%, se ensayaron a compresión a los 7, 14 y 28 días, donde, las probetas experimentales superaron la resistencia de diseño 210kg/cm² con un incremento promedio de 14% siendo el óptimo el concreto con sustitución de 6% del agregado fino por virutas; y limallas de acero, obteniendo un incremento de 15% con respecto a la resistencia de diseño. Adicional al ensayo de compresión se analizó el ensayo de asentamiento donde se observó que a mayor porcentaje de sustitución menor es el asentamiento. Con respecto a la resistencia a compresión (Y. Y. Deledesma Carrera, 2021).

Antecedentes Nacionales

En Colombia, a lo largo de los años también se han ido desarrollando investigaciones con enfoque en diferentes porcentajes de reemplazo o adición de diferentes presentaciones de residuos de acero respecto al agregado fino de la mezcla de concreto, como fibra o viruta.

En el año 2008, comenzaron a surgir múltiples investigaciones enfocadas en el análisis, evaluación o mejoramiento de un concreto de 3000 psi o 21 MPa sustituyendo diferentes porcentajes de agregado fino por viruta de acero.

En Bucaramanga se identificaron diferentes trabajos donde se evaluó y comparó la propiedad mecánica del concreto de la resistencia a la compresión con respecto a una muestra patrón fallando muestras generalmente a los 3, 7 y 28 días con distintos porcentajes de reemplazo de viruta de acero. De los resultados obtenidos se concluyó que el porcentaje con mejores resultados para la resistencia a la compresión es el 10% de reemplazo.

Del trabajo “Análisis, observación y comportamiento estadístico en función del tiempo de una mezcla de concreto de 3000 psi con adición de viruta de acero en porcentajes de 9%, 10% y 11% respecto al agregado fino”, se fallaron a compresión unas muestras con sustitución del agregado fino de los porcentajes mencionados, en las edades de 3, 7, 28 y 56 días, para posteriormente realizarles un análisis estadístico sobre el comportamiento en el tiempo de estas. Se llegó a la conclusión de que este tipo de concreto tiene un comportamiento aceptable y el porcentaje óptimo de adición de viruta de acero fue del 10% respecto al agregado fino de la mezcla, siendo favorable en cuanto a la resistencia a la compresión, dado que a los 3 y 7 días en las mezclas con adición de viruta de los tres porcentajes hubo un aumento significativo respecto a la muestra estándar (Suarez González & Vargas Rincon, 2008).

Los autores Heyner García y John Sarmiento realizaron una continuación a los resultados obtenidos en la investigación “Optimización de un concreto de 3000 psi mejorando la resistencia a la compresión adicionando viruta de acero”, en la cual se evaluaban la resistencia a la compresión con adiciones del 10%, 15% y 20% y la continuación de esta investigación se titula “Mejoramiento de un concreto de 3000 psi con adición de viruta de acero con porcentajes de 6%, 8% y 10%

respecto al agregado fino de la mezcla” donde se obtuvieron resultados significativos puesto que todos los porcentajes reflejaron incrementos con respecto a la muestra patrón en especial la adición del 10% con un aumento del 72.57%, que en ambas investigaciones demostró ser un porcentaje óptimo (García Córdova & Sarmiento Gutierrez, 2008). Luego de las dos investigaciones anteriores, el autor Alfonso García propuso seguir investigando para definir el porcentaje óptimo de adición, donde resulta el trabajo “Mejoramiento del concreto con adición de viruta de acero a porcentajes de 12% y 14% respecto al agregado fino de la mezcla” el cual buscó observar el comportamiento de una mezcla de concreto de 21 MPa adicionando viruta de acero que pasara por el tamiz de 7x7; pero al evaluar la resistencia a la compresión a 3, 7, y 28 días los porcentajes no obtuvieron resultados esperados, dado que la adición con 12% aumentó solo 18.25%, mientras que la del 14% decreció 5.68%, lo cual, mantiene la hipótesis anterior de un porcentaje óptimo del 10% (García Badillo, 2008).

Para el año 2016, en Bogotá, se comprobó una mejora en la resistencia a la compresión en un concreto modificado con fibra de acero a unos porcentajes, en la investigación titulada “Análisis comparativo entre el concreto simple y el concreto con adición de fibra de acero al 12% y 14%”. Dentro este estudio se llegó a la conclusión de que la fibra de acero contribuye a que el concreto se vuelva ligeramente más resistente y dúctil cuando éste se somete a fuerzas axiales de compresión, y la mezcla con adición del 14 % fue la más alta, superando en un 13,65% la capacidad de resistencia a la compresión de la mezcla de concreto sin adición. A su vez, se hizo énfasis en el tipo de falla obtenida, dado que para los cilindros ensayados sin adición de fibra hubo una falla columnar, que no da tiempo a reacción porque se rompe el concreto en instante de segundos al llegar a su máxima resistencia; y, los cilindros reforzados con fibra presentaron falla tipo cono y

corte y corte cilíndrico que son unas fallas menos letales y que conservan un 80 % la forma del cilindro (Valencia Castro & Quintana Cruz, 2016).

Seguidamente, en Santander, para el año 2017 continuaron las investigaciones con la viruta de acero, como la titulada “Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto adicionado con viruta de acero en porcentajes de 10 y 12 % respecto al agregado fino de la mezcla”, en la cual, las autoras Paula Angarita y Heyfa Rincón propusieron un análisis del comportamiento mecánico mediante el ensayo de resistencia a la compresión a 7, 14, y 28 días de un diseño de mezcla de 21 MPa reemplazando el agregado fino por viruta de acero en porcentajes de 10% y 12 % obteniendo un aumento del 8.08% en la muestra que se reemplazó con el 10% y una disminución del 67,58% en la muestra del 12%. Adicionalmente, realizaron un análisis de precio del metro cúbico de concreto con materiales convencionales, definiendo un valor para la muestra patrón de \$208.949, para el 10% de \$207.299 y el 12% de \$206.969, comprobando que la utilización de la viruta de acero también disminuye los costos (Angarita Pinzón & Rincón Gaona , 2017).

Posteriormente, en la investigación “Influencia de la viruta de acero al carbón en las propiedades mecánicas del concreto de 3000 psi al incorporarlo como adición” del año 2020 en Cartagena, se evaluó el concreto de diseño al adicionar el 8%, 10% y 12% de viruta de acero al carbón con respecto al volumen total de concreto, sobre sus propiedades mecánicas como: Resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad. Los resultados obtenidos fueron favorables para las tres dosificaciones de viruta de acero, arrojando aumentos significativos sobre la muestra de comparación a los 28 días. Para las muestras dosificadas con 10% de viruta se obtuvieron los valores promedios más relevantes: una resistencia a la compresión de 239,46 kg/cm², un módulo de rotura de 39,98 kg/cm² y un módulo elástico de 31869 MPa, mostrando aumentos porcentuales de 10.35%, 27.6% y 38.3% respectivamente. Se concluyó que

existe una gran influencia de la viruta de acero al carbón en las propiedades del concreto, estableciendo también como porcentaje óptimo el 10% de adición, influencia que es muy destacable sobre todo en el módulo de rotura y el módulo elástico, propiedades frágiles en el concreto, con aumentos que permiten deformaciones más controladas y un concreto de mayor eficiencia (Díaz Herrera & Mogollon Peñaranda, 2020).

Antecedentes Locales

Localmente se recopilaron cuatro investigaciones del repositorio de la Universidad de la Costa, las cuales, resaltan la importancia del mejoramiento, análisis y evaluación de la resistencia a la compresión del concreto, le aportan un incentivo al presente trabajo para continuar indagando y explorando nuevas alternativas para este material que generen un impacto positivo con el medio ambiente.

En orden cronológico, para el año 2014 se publicó en la revista INGE CUC, el artículo titulado “Reemplazo del Agregado Fino por Escoria de Horno de Cubilote para la Fabricación de Concreto” el cual, tuvo como finalidad sustituir el agregado fino en porcentajes del 0, 10, 15 y 20% por escoria de horno de cubilote (EHC) con la intención de identificar las propiedades físico-mecánicas del concreto con esta modificación y utilización de esta materia prima obtenida de residuos de fábricas industriales. En los resultados, se evidenció un comportamiento favorable del concreto modificado al sustituir el 20% del agregado fino o arena por la EHC para una resistencia de diseño de 14 MPa (Cruz Hernández et al., 2014).

Asimismo, se han realizado peculiares investigaciones para casos de estudios en materiales de construcción como lo es la investigación “Sustainable composite development: Novel use of human hair as fiber in concrete” del año 2020, que tuvo como objetivo comprobar el efecto de un cabello humano, considerado material de desecho, como fibra sobre las propiedades físicas,

mecánicas y frescas del concreto adicionando ciertos porcentajes (0%, 1%, 2%, 3% y 4%) por volumen de cemento. Increíblemente, los resultados obtenidos fueron muy favorables, donde la resistencia a la compresión aumentó un 8.15% con el 1% de cabello humano luego de los 28 días, la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la flexión mejoraron también un 21.83% y un 12.71% con un 2% de cabello humano después de 28 días, respectivamente (Bheel et al., 2020).

Finalmente, se identificaron dos investigaciones más recientes para el año 2021, la primera se titula “Study of the importance of core cylinders in the monitoring of the compressive strength of the concrete” y la segunda “Study on mechanical properties of mortars containing steel shot and sea sand as fine aggregate replacement”. El primer artículo, se basa en la relevancia y necesidad del cumplimiento de la resistencia a la compresión durante el proceso de construcción de una obra para no presentar fallas con daños importantes, por esa razón, los investigadores consideraron que el concreto en ocasiones no alcanza su resistencia a los 28 días de curado, con base a ello propusieron extender el tiempo de curado para un mayor control y seguimiento del comportamiento de este tipo de mezclas para establecer cuáles son las edades a las que alcanza su resistencia y bajo qué condiciones se logra. A su vez, para el segundo artículo, los investigadores obtuvieron resultados que los llevo a concluir que diferentes materiales a los cotidianos, como la granalla de acero y arena de mar, pueden ser un sustituto del agregado fino, ya que, mantienen el comportamiento del diseño de mezcla; y también, proponen alternativas constructivas para la utilización de estas mezclas (De La Iglesia et al., 2021).

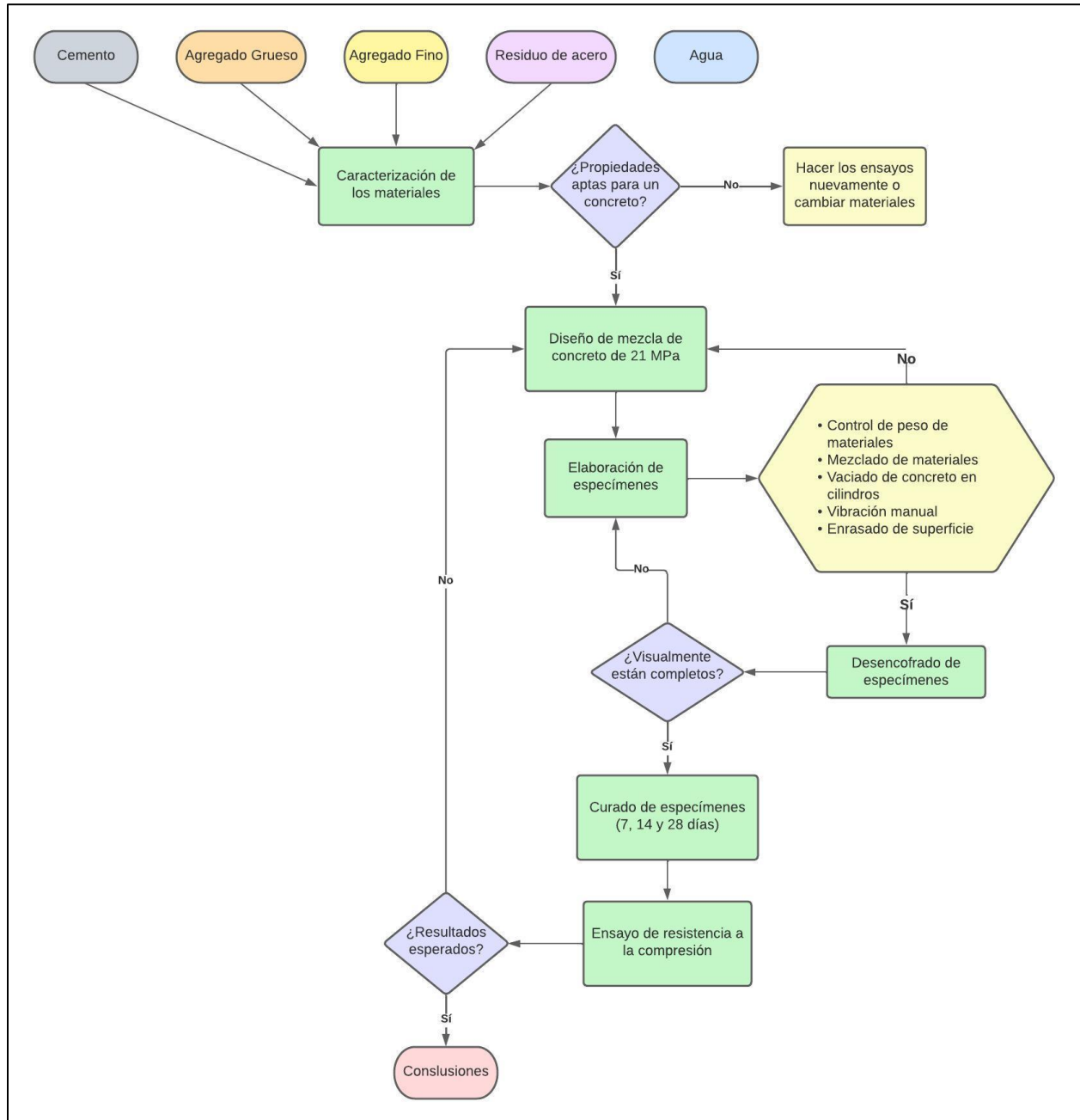
Metodología, Parámetros y Variables De La Modelación

Para el desarrollo experimental se determinó realizar 3 cilindros de concreto por cada porcentaje de reemplazo de agregado fino por viruta de acero al carbono, bajo recomendación de la norma colombiana NSR-10, de tal forma que se promedien los resultados de la resistencia a la compresión y dicho valor sea el definitivo de la muestra.

En la metodología del desarrollo experimental se tuvieron en cuenta variables que se encuentran directamente relacionadas con la modelación y el objetivo de la investigación. La variable dependiente es la resistencia a la compresión, ya que se obtiene a partir de otras variables independientes como lo son el porcentaje de reemplazo y el tiempo de curado del concreto. En el siguiente diagrama de flujo se pueden observar los procesos contemplados:

Figura 3

Diagrama de flujo del desarrollo experimental



Nota. Diagrama de elaboración propia.

En esta investigación se evaluaron 4 porcentajes de reemplazo de viruta de acero al carbono reciclada, de 0%, 5%, 10% y 15%, de una mezcla de concreto de 21 MPa; donde, para cada

porcentaje se evaluaron 3 especímenes o muestras para cada edad de concreto a la que se fallaron, en este caso 7, 14 y 28 días. En otras palabras, se realizaron 4 porcentajes de reemplazo, a 3 tiempos de curado, por 3 cilindros que se fallarán por cada reemplazo, por lo tanto, se plantea la siguiente ecuación:

$$\#Total\ de\ muestras = (N.P * N.E * N.C) \tag{1}$$

Donde:

N.P = Número de porcentaje de reemplazo

N.E = Número de edades en las que se fallaran

N.C = Número cilindros por reemplazo

Total de muestras = (4 * 3 * 3)

Total de muestras = 36

Tabla 5

Diseño experimental

% Reemplazo viruta	Días de curado			Total por espécimen
	7	14	28	
0	3	3	3	9
5	3	3	3	9
10	3	3	3	9
15	3	3	3	9
Total				36

Ensayos De Laboratorio y Caracterización De Los Materiales

El diseño de una mezcla de concreto requiere muchos datos específicos al momento de determinar las cantidades de los materiales según la resistencia requerida, por ende, es relevante conocer e identificar las propiedades de dichos materiales. En Colombia, los ensayos de laboratorio para caracterizar los materiales se rigen por las Normas Técnicas Colombianas (NTC), las cuales, establecen los procedimientos y parámetros para la ejecución de ellos; en esta investigación se cumplió con los protocolos determinados para cada material necesario en el diseño de mezclas según su norma correspondiente. A continuación, se presentan los resultados.

Densidad, Finura y Consistencia Normal (NTC 211, NTC 33 y NTC 110)

Densidad Del Cemento (NTC 211)

Se realizaron dos ensayos para garantizar los resultados teniendo en cuenta que dos ensayos preparados adecuadamente por el mismo operador, en la misma muestra de cemento, no deben diferir más de 0.03 g/cm³.

Tabla 6

Parámetros del ensayo densidad del cemento.

Símbolo	Parámetro
L _i	Lectura inicial del frasco Le Chatelier (ml)
T _i	Temperatura inicial del baño de agua °C
L _f	Lectura final del frasco Le Chatelier (ml)
T _f	Temperatura final del baño de agua °C
m	Masa de la muestra de cemento (g)
V	Volumen desplazado (ml)
ρ_c	Densidad del cemento (g/cm ³)
ρ_r	Densidad relativa del cemento

Tabla 7

Resultados y cálculos del ensayo densidad del cemento.

Parámetros	Prueba 1	Prueba 2
M [g]	64	64
Ti [°C]	21.7	22.5
Li [ml]	0.5	0.7
Tf [°C]	22.2	22.1
Lf [ml]	21	21
ρ_c [kg/m ³]	3121.95	3152.71
ρ_r	3.12	3.15
ρ_c promedio		
3137.33		
ρ_r promedio		
3.14		

Para determinar la densidad del cemento se emplean las siguientes ecuaciones según la (NTC 221, 1999):

Densidad del cemento

$$\rho_c = \frac{M}{V} = \frac{M}{L_f - L_i} \quad (2)$$

Densidad relativa del cemento

$$\rho_r = \frac{\rho_c}{\rho_a} \quad (3)$$

Análisis de resultados obtenidos en el ensayo de la densidad del cemento:

- Normalmente, la densidad del cemento hidráulico sin adiciones varía entre 3100 y 3150 kg/m³, y los cementos que contienen adiciones presentan valores de densidad entre 2800 kg/m³ y 3100 kg/m³; por lo tanto, el cemento utilizado para los ensayos es sin adiciones ya que el valor promedio obtenido fue de 3137 kg/m³ aproximadamente.

- Los resultados de los dos ensayos no difieren de los 0.03 g/cm³ recomendados, por lo que los procesos se realizaron adecuadamente.

$$|\rho_{c1} - \rho_{c2}| \leq 0.03 \frac{g}{cm^3}$$

$$\rightarrow |\rho_{c1} - \rho_{c2}| = |3.12 - 3.15| \frac{g}{cm^3}$$

$$= 0.03 \frac{g}{cm^3}$$

Finura Del Cemento (NTC 33)

Teniendo en cuenta los resultados de la densidad obtenida para el cemento, el resultado de la finura se determinó a partir de un solo ensayo, debido a que es puro o sin adiciones.

Tabla 8

Parámetros del ensayo finura del cemento

Símbolo	Parámetros
S	Superficie específica de la muestra en ensayo.
S _p	Superficie específica de la muestra patrón, empleada en la calibración del aparato.
T _p	Intervalo de tiempo observado para la muestra patrón empleada en la calibración del aparato, en s.
T	Intervalo de tiempo observado en el descenso del manómetro para la muestra de ensayo, en s.
M	Masa requerida de la muestra a ensayar.
ρ _c	Densidad de la muestra de ensayo (Tomada del ensayo de densidad)
V	Volumen total ocupado por el cemento. (Volumen de la cámara)
e	Porosidad deseada de la capa de cemento

Para determinar la finura del cemento se emplean las siguientes ecuaciones según la

(NTC 33, 1997):

$$M = \rho_c \times V \times (1 - e) \tag{4}$$

De acuerdo con la muestra patrón se tomó:

$$S_p = 381.8 \text{ m}^2/\text{kg} \quad T_p = 118 \text{ seg}$$

$$S = \frac{s_p \sqrt{T}}{\sqrt{T_p}} \quad (5)$$

Tabla 9

Resultados del ensayo de finura del cemento

Lectura	Tiempo [min]	Tiempo [seg]
1	2.25	134.98
2	2.27	136.36
3	2.26	135.82
Promedio		135.72

Tabla 10

Cálculos del ensayo de finura del cemento

Parámetro	Resultado
V [cm ³]	1.87
Porosidad cemento puro [e]	0.475
M [g]	3.08
S [m ² /kg]	409.46

Análisis de resultados obtenidos en el ensayo de la finura del cemento:

- La norma NTC 121 señala que la finura determinada por el permeabilímetro de Blaine para todos los tipos de cemento hidráulico, excepto para el tipo ART, debe tener un valor mínimo de 280 m²/kg; por lo tanto, el cemento ensayado cumple con este criterio, dado que el valor obtenido en el ensayo es superior.

Consistencia Normal (NTC 110)

Los cementos tienen unos requerimientos de agua diferentes, dependiendo si son o no adicionados, generalmente los cementos adicionados requieren de más agua. Existe una fluidez para la cual debe agregarse cierta cantidad de agua, y es lo que se denomina consistencia normal.

Tabla 11

Parámetros del ensayo consistencia normal

Símbolo	Parámetro
M_c	Masa del cemento seco.
%a	Porcentaje de agua empleada en la pasta.
V_a	Volumen de agua.
ρ	Densidad del agua correspondiente a un valor de 1g/cm^3 .
M_a	Masa del agua necesaria para determinar la relación agua/cementante.
a/c	Relación agua/cemento.
P_a	Porcentaje de agua por masa de cemento seco para una pasta con consistencia normal.

Para determinar la consistencia normal de la pasta de cemento se emplean las siguientes ecuaciones según la (NTC 110, 1991):

$$V_a = \%a \times M_c \quad (6)$$

$$\frac{a}{c} = \frac{M_a}{M_c} \quad (8)$$

$$M_a = \rho_a \times V_a \quad (7)$$

$$P_a = \frac{M_a}{M_c} \times 100\% \quad (9)$$

Se realizó el ensayo de prueba y error comenzando con un porcentaje de agua de aproximadamente 28.5%, con un volumen de agua de 185 ml.

Tabla 12

Resultados del ensayo consistencia normal

No.	Penetración [mm]
1	11
2	10
Promedio	10.5

$$\frac{a}{c} = \frac{185 \text{ g}}{650 \text{ g}} = 0.2846$$

$$P_a = \frac{185 \text{ g}}{650 \text{ g}} \times 100\% = 28.5\%$$

Análisis de resultados obtenidos en el ensayo de la consistencia normal del cemento:

- En el primer descenso de la sonda sobre la superficie de la pasta de cemento se obtuvo una penetración de 11 mm y en la segunda una de 10 mm; las cuales se encuentran dentro del rango sugerido por la norma de 10 ± 1 mm. Lo anterior indica que la pasta de cemento no se encontraba ni muy fluida, ni muy seca y que se escogió un porcentaje de agua que funciona adecuadamente para que se pueda manejar la pasta.

-

Granulometría (NTC 77)

Para la caracterización de los agregados es de vital importancia conocer sus tamaños, esto se realizó utilizando la metodología del tamizado.

Granulometría Del Agregado Grueso (NTC 77)

La selección de la muestra representativa depende del tamaño máximo del material, según las medidas, había unas gravas con tamaño de 3 pulgadas (76.1mm) y en base a lo indicado con la norma se tomó una masa representativa de 5000 gramos.

En la siguiente tabla de sintetiza los resultados obtenidos:

Tabla 13

Resultados granulometría agregado grueso.

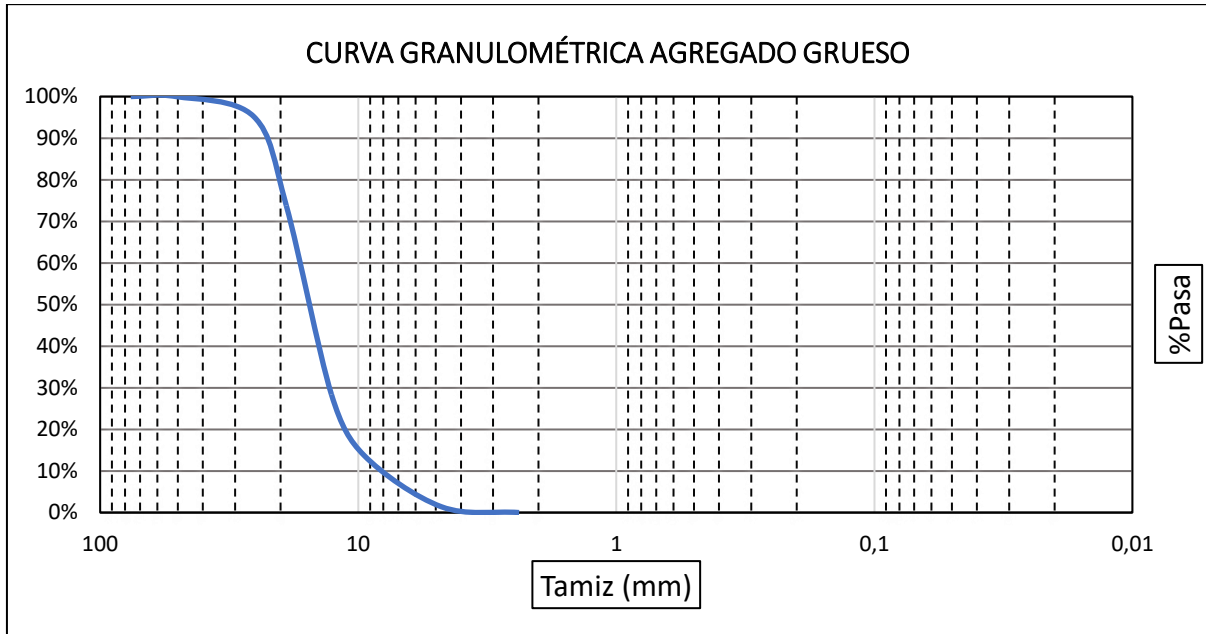
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	%RETENIDO	%RET ACUM	% PASA
3"	76.1	0	0.00%	0.00%	100.00%
2"	50.8	0	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.4	240	4.80%	4.80%	95.20%
3/4"	19	1070	21.40%	26.20%	73.80%
1/2"	12.7	2270	45.40%	71.60%	28.40%
3/8"	9.51	730	14.60%	86.20%	13.80%
No.4	4.76	620	12.40%	98.60%	1.40%
No.8	2.38	70	1.40%	100.00%	0.00%
FONDO		0	0.00%	100.00%	0.00%
TOTAL		5000	100.00%		

De los resultados obtenidos, se identifica el tamaño máximo nominal, el cual corresponde al tamiz superior en el que se obtenga el 15% o más de los retenidos totales, en este caso el tamaño máximo nominal fue de 3/4" (19mm).

En la siguiente grafica puede observar la gradación de la grava, según los resultados obtenidos:

Figura 4

Curva granulométrica agregado grueso



Granulometría del agregado fino (NTC 77)

Para la granulometría de la arena, la norma indica tomar mínimo 300 gramos de muestra representativa, en este caso, se tomó una muestra de 500 gramos.

En la siguiente tabla se observan los datos obtenidos del tamizado:

Tabla 14

Resultados granulometría agregado fino

TAMIZ	ABERTURA [mm]	RETENIDO [g]	%RETENIDO	%RET ACUM	% PASA
No.10	2	0.027	0.01%	0.01%	99.99%
No.16	1.19	0.061	0.01%	0.02%	99.98%
No.30	0.595	16	3.24%	3.26%	96.74%
No.50	0.297	326	65.98%	69.24%	30.76%
No. 100	0.149	123	24.89%	94.13%	5.87%
No.200	0.074	28	5.67%	99.80%	0.20%
FONDO		1	0.20%	100.00%	0.00%
TOTAL		494.088	100.00%		

Con los resultados obtenidos, se procedió a calcular el módulo de finura, para ellos se sumó el porcentaje retenido acumulado desde el tamiz #4 hasta el tamiz #100 y esto se dividió entre 100:

$$MF = \frac{0.01\% + 0.02\% + 3.26\% + 69.24\% + 94.13\%}{100} = 1.67$$

Los módulos de finura no deben ser menores de 2.3 ni mayores de 3.1, por tanto, esta observación se debe considerar para el diseño de mezcla.

En la siguiente grafica puede observar la gradación de la arena, según los resultados obtenidos:

Figura 5

Curva granulométrica agregado fino

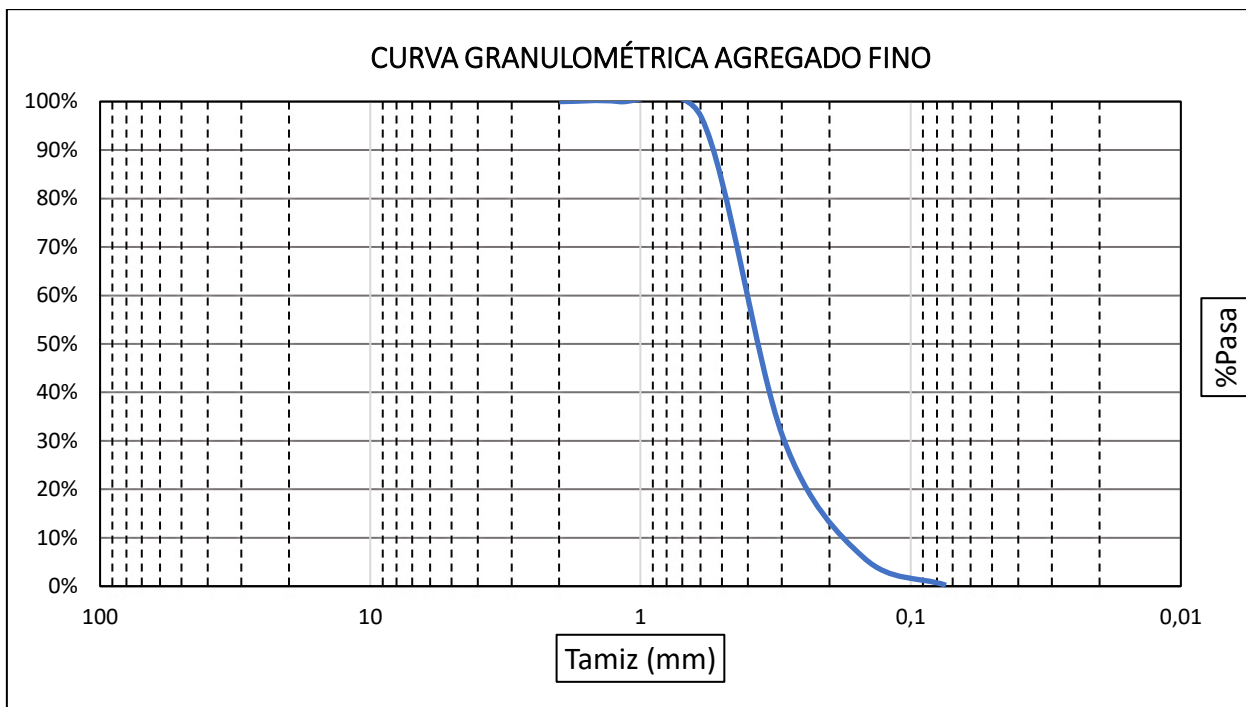


Tabla 15

Nomenclatura y resultados de las masas del agregado grueso

NOMENCLATURA		DATOS LABORATORIO	
A	Masa en el aire de la muestra seca	A [g]	2992
B	Masa en el aire de la muestra saturada y superficialmente seca	B [g]	3010
C	Masa de la muestra sumergida	C [g]	1780

Con la información anterior y aplicando las fórmulas de la normativa (NTC 176, 1995) para agregado grueso se proceder a realizar los cálculos:

Densidad nominal

$$D_{nominal} = \frac{A}{A - C} \tag{10}$$

$$D_{nominal} = \frac{2992}{2992 - 1780} = 2.47 \text{ g/cm}^3$$

Densidad Aparente

$$D_{aparente} = \frac{A}{B - C} \tag{11}$$

$$D_{aparente} = \frac{2992}{3010 - 1780} = 2.43 \text{ g/cm}^3$$

Densidad aparente, saturada y superficialmente seca

$$D_{ASSS} = \frac{B}{B - C} \tag{12}$$

$$D_{ASSS} = \frac{3010}{3010 - 1780} = 2.45 \text{ g/cm}^3$$

Porcentaje de absorción

$$\%Absorción = \left[\frac{B - A}{A} \right] * 100 \tag{13}$$

$$\%Absorción = \left[\frac{3010 - 2992}{2992} \right] * 100 = 0.60\%$$

Densidad y Absorción Del Agregado Fino (NTC 237)

A diferencia del agregado grueso, la normativa establece una muestra de 1000g de agregado fino independiente de sus características, a ella se le aplica un proceso de lavado y secado utilizando herramientas como el cono para medir humedad superficial. A continuación, se evidencian los valores de la masa obteniendo de la aplicación del ensayo:

Tabla 16

Nomenclatura y resultados de las masas del agregado fino

NOMENCLATURA		DATOS LABORATORIO	
A	Masa en el aire de la muestra seca	A [g]	495
B	Masa del picnómetro lleno con agua	B [g]	666
S	Masa de la muestra saturada y superficialmente seca	S [g]	500
C	Masa del picnómetro con la muestra y el agua hasta la marca de calibración	C [g]	972

Con la información anterior y aplicando las fórmulas de la normativa (NTC 237, 1995) para agregado fino se proceder a realizar los cálculos:

Densidad nominal

$$D_{nominal} = \frac{A}{B + A - C} \tag{14}$$

$$D_{nominal} = \frac{495}{666 + 495 - 972} = 2.62 \text{ g/cm}^3$$

Densidad Aparente

$$D_{aparente} = \frac{A}{B + S - C} \quad (15)$$

$$D_{aparente} = \frac{495}{666 + 500 - 972} = 2.55 \text{ g/cm}^3$$

Densidad aparente, saturada y superficialmente seca

$$D_{ASSS} = \frac{B}{B + S - C} \quad (16)$$

$$D_{ASSS} = \frac{500}{666 + 500 - 972} = 2.58 \text{ g/cm}^3$$

Porcentaje de absorción

$$\%Absorción = \left[\frac{S - A}{A} \right] * 100 \quad (17)$$

$$\%Absorción = \left[\frac{500 - 495}{495} \right] * 100 = 1.01\%$$

Análisis de resultados de los ensayos de densidad y absorción de los agregados:

- El porcentaje de absorción nos indica que tanta agua pueden absorber los agregados, según los resultados obtenidos, los valores de ambos agregados tienen porcentajes bajos, esto nos indica que la porción de la mezcla que absorberían es poca, así mismo esto permite identificar que el agregado fino tiene mayor humedad natural, pues absorbe más en relación con el agregado grueso.

- Los resultados del porcentaje de absorción de los agregados nos indican que son adecuado para el diseño de mezcla.

- Los resultados obtenidos de la densidad aparente, saturada y superficialmente seca son los que ofrecerán el control de la cantidad de agua en el diseño de mezcla, garantizando que en el resultado final estos no absorberán ni aportarán agua de más a la mezcla.

Masa Unitaria y Contenido De Vacíos (NTC 92)

En el diseño de mezcla se parte de la cuantificación en masa y en volumen de todos los materiales. Los agregados por su textura, tipología y composición se evalúan en diferentes condiciones de acuerdo con lo planteado por la normativa.

La metodología de los ensayos es igual tanto para el agregado fino como el grueso, se inicia tomando las cantidades de cada una de las muestras y las dimensiones de los moldes que dependerá si es fino o grueso.

Tabla 17

Parámetros para el ensayo de masa unitaria y contenido de vacío.

Parámetros	
G	Masa del molde más agregado (kg)
T	Masa de molde (kg).
V	Volumen del molde (m ³)
S	Gravedad específica aparente (base seca)
W	Densidad del agua (kg/m ³)

Luego de medir el diámetro, la altura y la masa de los moldes, se procede a tomar la masa suelta y luego la compactada siguiendo las indicaciones de la norma, vaciando el agregado en tres capas y en cada capa apasionándolo a 25 golpes con la varilla compactadora.

Masa Unitaria y Contenido De Vacíos Agregado Grueso (NTC 92)

Resultados de las masas y el volumen del molde:

Tabla 18

Dimensiones molde agregado grueso

DIMENSIONES DEL MOLDE	
T	6.49
d [cm]	20.2
h [cm]	30.4
V [cm ³]	9742.41
V [m ³]	0.0097

Tabla 19

Masa suelta y compacta del molde más agregado grueso

DATOS LABORATORIO		
Muestra	Suelto [kg]	Compactado [kg]
G	22.58	23.36

Con la información anterior y aplicando las fórmulas de la normativa (NTC 92, 1995) para agregado grueso se procedió a realizar los cálculos:

Masa unitaria del agregado grueso suelto

$$M = \frac{G - T}{V} \tag{18}$$

$$M = \frac{22.58 \text{ kg} - 6.49 \text{ kg}}{0.0097 \text{ m}^3} = 1651.54 \text{ kg/m}^3$$

Masa unitaria del agregado grueso compactado

$$M = \frac{G - T}{V} = \frac{23.36 \text{ kg} - 6.49 \text{ kg}}{0.0097 \text{ m}^3} = 1731.61 \text{ kg/m}^3$$

Porcentaje de vacíos para la masa unitaria del agregado grueso suelto

$$S = 2.43 \quad W = 998 \text{ Kg/m}^3$$

$$\%Vacios = \frac{100[(S * W) - M]}{(S * W)} \tag{19}$$

$$\%Vacios = \frac{100[(2.43 * 998) - 1651.54]}{(2.43 * 998)} = 31.97$$

Porcentaje de vacíos para la masa unitaria del agregado grueso compactado

$$\%Vacios = \frac{100[(S * W) - M]}{(S * W)} = \frac{100[(2.43 * 998) - 1731.61]}{(2.43 * 998)} = 28.672$$

Masa Unitaria y Contenido De Vacíos Agregado Fino (NTC 92)

Resultados de la masa y el volumen del molde:

Tabla 20

Dimensiones molde agregado fino

DIMENSIONES DEL MOLDE	
T	4.51
d [cm]	15.00
h [cm]	15.80
V [cm ³]	2792.09
V [m ³]	0.0028

Tabla 21

Masa suelta y compacta del molde más agregado fino

DATOS LABORATORIO		
Muestra	Suelto [kg]	Compactado [kg]
G	8.56	8.98

Con la información anterior y aplicando las fórmulas de la normativa (NTC 92, 1995) para agregado fino se realizaron los cálculos:

Masa unitaria del agregado fino suelto

$$M = \frac{G - T}{V} = \frac{8.56 \text{ kg} - 4.51 \text{ kg}}{0.0028 \text{ m}^3} = 1450.53 \text{ kg/m}^3$$

Masa unitaria del agregado fino compactado

$$M = \frac{G - T}{V} = \frac{8.98 \text{ kg} - 4.51 \text{ kg}}{0.0028 \text{ m}^3} = 1600.95 \text{ kg/m}^3$$

Porcentaje de vacío para la masa unitaria del agregado fino suelto

$$S = 2.55 \qquad W = 998 \text{ Kg/m}^3$$

$$\% \text{Vacios} = \frac{100[(S * W) - M]}{(S * W)} = \frac{100[(2.55 * 998) - 1450.53]}{(2.55 * 998)} = 43.037$$

Porcentaje de vacío masa unitaria del agregado fino compactado

$$\% \text{Vacios} = \frac{100[(S * W) - M]}{(S * W)} = \frac{100[(2.55 * 998) - 1600.95]}{(2.55 * 998)} = 37.130$$

Análisis de resultados de los ensayos de masa unitaria y contenido de vacíos de los agregados:

- La Norma Técnica Colombiana NTC 92 establece que la masa volumétrica aproximada para el concreto de peso normal varía de 1200 kg/m³ a 1750 kg/m³. Los valores obtenidos previamente descritos de Masa unitaria o volumétrica suelta y compactada para agregado fino y grueso se encuentran respectivamente dentro del intervalo.

Tabla 22.

Resultados ensayo masa unitaria.

Masa unitaria		
Masa	A. fino	A. grueso
Suelta [kg/m ³]	1450.53	1651.54
Compactada [kg/m ³]	1600.95	1731.61

- De igual manera establece que la variación de la cantidad de vacíos para agregado grueso es de 30% a 45%, como también para el agregado fino de 40% a 50%, los valores obtenidos nos indica que estos porcentajes se encuentran dentro de los intervalos normales.

Tabla 23

Resultados ensayo porcentaje de vacíos.

Porcentaje de vacíos		
Masa	A. fino	A. grueso
Suelta	43.04%	31.97%
Compactada	37.13%	28.67%

- Teniendo en cuenta, los parámetros obtenidos permiten la elaboración de una buena mezcla de concreto, ya que, tener los porcentajes de vacíos y masa unitaria adecuada, según las características del concreto ayudan a controlar los cambios volumétricos (cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado, de curado y secado de la mezcla de concreto) y aportar a la resistencia final del material.

Diseño De Mezcla De Concreto

Para realizar el diseño de mezcla se tuvieron en cuenta unas condiciones y especificaciones del método de la ACI. La caracterización de los materiales definió los lineamientos del diseño de mezcla, ya que se tuvieron en cuenta los resultados de la masa específica, la masa compactada de los agregados, sus porcentajes de absorción, su humedad natural y el módulo de finura. A continuación, se evidencia un resumen de los parámetros obtenidos:

Tabla 24

Parámetros de entrada al diseño de mezcla del agregado fino

Parámetros de entrada del agregado fino	
Tipo de arena	Santo Tomás
Masa específica relativa [gr/cm ³]	2.62
Absorción [%]	1.01%
Módulo de finura	1.67
Humedad natural [Wnat %]	7.527 %

Tabla 25

Parámetros de entrada al diseño de mezcla del agregado grueso

Parámetros de entrada del agregado grueso	
TMN	19 mm
Tipo de grava	Canto rodado
Masa específica relativa [gr/cm ³]	2.47
Absorción [%]	0.60
Masa compactada [kg/m ³]	1651.54
Humedad natural [Wnat %]	0.959%

Tabla 26

Parámetros de entrada al diseño de mezcla del cemento.

Parámetros de entrada del Cemento	
Tipo	GU (uso general)
Masa específica relativa [gr/cm ³]	3.14
Adiciones	NO

Para el diseño se desea una resistencia a la compresión especificada de 21MPa a los 28 días. Con el fin de garantizar la resistencia esperada se utiliza las fórmulas propuestas por la metodología ACI para calcular la resistencia de diseño:

Tabla 27

Resistencia a la compresión media requerida cuando no hay datos disponibles para establecer la desviación estándar

Resistencia a la compresión especificada, f'_c, MPa	Resistencia a la compresión media requerida, MPa
Menos de 21	$f'_c + 7$
21 a 35	$f'_c + 8.5$
Mas de 35	$1.10 f'_c + 5.0$

Nota. Adaptada de la ACI 318.

En este caso como la resistencia a la compresión requerida se encuentra dentro del rango de 21 y 35 MPa, se utilizó la siguiente fórmula para obtener la resistencia media requerida:

$$f_c = f'_c + 8.5 \tag{20}$$

$$f_c = 21 + 8.5 = 29.5 \text{ MPa}$$

Para determinar la cantidad de agua de mezclado y el contenido de aire por cada m³ se consideró una consistencia plástica entre 25mm y 100mm y el resultado de la granulometría del tamaño máximo nominal del agregado grueso de 19mm. Para ello se utilizó la siguiente tabla, en la que se ubicó el sector superior de concreto sin aire incluido, ya que en el diseño no se contempla la adición de ningún aditivo, se identificó el intervalo del asentamiento y luego el del tamaño nominal teniendo un que el agua de mezclado es de 205 kg/m³; así mismo, para determinar el contenido de aire, se identificó el tamaño máximo nominal y este se relacionó con la línea del contenido de aire, con ello se define un porcentaje de aire del 2%.

Tabla 28

Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños nominales del agregado.

Revenimiento (asentamiento) (mm)	Agua, kilogramos por metro cubico de concreto, para los tamaños de agregado indicados.							
	9.5 mm	12.5 mm	19.5 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	194	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
26 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
76 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
151 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposición, porcentaje								
Exposición leve	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Nota. Adaptada de la ACI 211.1

Para establecer la relación agua-cemento se tiene en cuenta la resistencia de diseño según la metodología de la ACI utilizando las siguientes relaciones:

Tabla 29

Dependencia entre la relación agua-material cementante y la resistencia a la compresión del concreto

Resistencia a la compresión a los 28 Días kg/cm ² (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200 (20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.72

Nota. Adaptada de la ACI 211.1 y 211.3

La resistencia a la compresión definida es de 21 MPa y como se observa no hay dato definido para este valor, por ello se utiliza la interpolación considerando los extremos las resistencias de 20 y 25 MPa respectivamente.

$$Y_x = Y_o + \frac{X - x_o}{X_1 - X_o} (Y_1 - Y_o) \tag{21}$$

Tabla 30

Datos de entrada para la interpolación de la relación agua- material.

f'c		a/c	
X ₁	25	Y ₁	0.62
X _o	20	Y _o	0.7
X	21	Y _x?

$$Y_x = 0.7 + \frac{21 - 20}{25 - 20} (0.62 - 0.7) = 0.684$$

Con los parámetros previamente definidos se procede a calcular el contenido expresado en masa de cada uno de los materiales:

Contenido de cemento

Tabla 31

Datos y consideraciones contenido de cemento.

Parámetros para considerar	
Relación a/c	0.684
Agua de mezclado [kg]	205
% De aire en el concreto	2%
Contenido de cemento [kg]	299.71

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{\text{Agua de mezclado}}{\text{Relacion a/c}} \quad (22)$$

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{205}{0.684} = 299.71 \text{ kg}$$

Contenido del agregado grueso

Tabla 32

Datos y consideraciones contenido de agregado grueso

Parámetros para considerar	
Volumen compactado seco [m ³]	0.66
Masa compactada [kg/m ³]	1651.54
Mag [kg]	1090.02

$$\text{Mag} = \text{Volumen compactado seco} * \text{masa compactada} \quad (23)$$

$$\text{Mag} = (0.66\text{m}^3) * (1651.54 \text{ Kg/m}^3) = 1090,02 \text{ kg}$$

Para calcular el contenido del agregado fino debemos conocer el volumen del agua, del cemento y del agregado fino. Para calcular el volumen de agua, aplicamos el concepto que la densidad es igual a masa sobre el volumen:

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (24)$$

Tabla 33

Datos y consideraciones para calcular el volumen de agua

Parámetros para considerar	
Masa del agua [kg]	205
Masa específica del agua [gr/cm ³]	1

$$V_{agua} = \frac{205 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.205 \text{ m}^3$$

Para el cemento:

Tabla 34

Datos y consideraciones para calcular el volumen de cemento

Parámetros para considerar	
Masa del cemento [kg]	299.71
Masa específica del cemento [gr/cm ³]	3.14

$$V_{cemento} = \frac{299.71 \text{ kg}}{3140 \text{ kg/m}^3} = 0.095 \text{ m}^3$$

Para el agregado grueso:

Tabla 35

Datos y consideraciones para calcular el volumen del agregado grueso

Parámetros para considerar	
Masa del agregado grueso [kg]	1090.02
Masa específica del agregado grueso [gr/cm ³]	2.47

$$V_{A.grueso} = \frac{1090.02 \text{ kg}}{2469 \text{ kg/m}^3} = 0.4415 \text{ m}^3$$

Para calcular el volumen de aire:

$$V_{Aire} = 1 * \%Aire \tag{25}$$

$$V_{Aire} = 1 * 2\% = 0.020 \text{ m}^3$$

Conociendo el volumen del agregado grueso, el agua, el cemento y el aire se puede calcular el volumen del agregado fino:

$$V_{A.fino} = 1 - (V_{Aire} + V_{Agua} + V_{A.grueso} + V_{cemento}) \tag{26}$$

$$V_{A.fino} = 1 - (0.020 + 0.205 + 0.4415 + 0.095)m^3 = 0.238 m^3$$

En resumen, para un metro cúbico de mezcla se necesitan las siguientes cantidades de materiales:

Tabla 36

Resultados volumen de los materiales del diseño de mezcla

Resultado volumen de mezcla	
Volumen del agua [m ³]	0.205
Volumen del cemento [m ³]	0.095
Volumen agregado grueso [m ³]	0.4415
Contenido de aire [m ³]	0.020
Volumen agregado fino [m ³]	0.238

Se hace relevante conocer el estado natural de los agregados, es decir su estado húmedo:

$$M_{Hume} = M_A * (1 + w_A) \tag{27}$$

Agregado grueso:

Tabla 37

Consideraciones masa húmeda agregado grueso

Parámetros para considerar	
Mag [kg]	1090.02
Humedad natural agregado grueso [Wnat %]	0.96

Fuente. Elaboración propia.

$$M_{A.grueso-Hume} = 1090.22 * (1 + 0.96\%) = 1100.47 kg$$

Agregado fino:

Tabla 38

Consideraciones masa húmeda agregado fino

Parámetros para considerar	
Masa especifica agregado fino [kg]	2.62
Humedad natural agregado fino [Wnat %]	7.53
Volumen agregado fino [m ³]	0.238

$$M_{A.fino} = V_{A.fino} * G_{SSD} \quad (28)$$

$$M_{A.fino} = 238m^3 * 2.62 \text{ kg/m}^3 = 623.35 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{A.fino-Hume} = 623.35 * (1 + 7.53\%) = 624.427 \text{ kg}$$

Tabla 39

Resultados masa húmeda de los agregados

Resumen masa húmeda	
Masa agregado fino [kg]	623.35
Masa húmeda agregado fino [kg]	624.351
Masa húmeda agregado grueso [kg]	1090.018

Conociendo las cantidades en m³ de cada uno de los materiales se procedió a calcular la cantidad que aportan a la cantidad total necesaria para un m³ de mezcla

$$Agua_A = M_{Hume}(w_A - Abs_A) \quad (29)$$

$$Agua_{A.grueso} = 1100.473 (0.959\% - 0.60\%) = 3.93 \text{ kg}$$

$$Agua_{A.fino} = 624.427(7.526\% - 1.01\%) = 40.69 \text{ kg}$$

$$Agua_{Total} = Agua_{mezclado} - Agua_{A.fino} + Agua_{A.grueso} \quad (30)$$

$$Agua_{Total} = 205 - 40.69 + 3.93 = 160.37 \text{ kg}$$

Tabla 40

Resultados agua total de la mezcla

Resultado agua total de la mezcla	
Agua agregado grueso [kg]	3.93
Agua agregado fino [kg]	40.69
Agua Total [kg]	160.37

La relación entre el cemento y los otros materiales que componen la mezcla expresada en masa se calcula dividiendo la masa kg/m³ de cada uno entre la del cemento, aplicando esto se obtiene la masa normalizada los siguientes resultados.

Tabla 41

Resultado diseño de mezcla

	Masa [kg/m³]	Masa normalizada	Volumen para 1 m³
Agua	217.86	0.73	0.218
Cemento	299.71	1	0.095
Agregado grueso	1090.02	3.64	0.442
Aire	-	-	0.020
Agregado fino	623.35	2.08	0.238

Teniendo en cuenta que un cilindro de 10 x 20 cm tiene un área de 0.007 m² y un volumen de 0.0015 m³, se procede a calcular la cantidad de material necesaria para un cilindro. Para ello, se multiplica la masa por el volumen del cilindro y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 42

Cantidad de material para un cilindro

Material para un cilindro	
Agua [ml]	342.22
Cemento [kg]	0.471
Agregado grueso [kg]	1.712
Aire	-
Agregado fino [kg]	0.979

Preparación De Muestras

Después de obtener el diseño teórico de la mezcla y la caracterización de los materiales de manera experimental, siguiendo los procedimientos de las normas NTC y la ACI, se realizó la preparación de las muestras de concreto bajo la norma NTC 1377 “Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio”. A continuación, se resume la preparación y se evidencia el procedimiento realizado.

Equipo y Herramientas

Para llevar a cabo un adecuado proceso la norma recomienda utilizar ciertos equipos y herramientas, de las cuales, para el desarrollo de este trabajo se utilizó lo disponible en el laboratorio de mezclas y tecnología de los materiales de la universidad, entre los cuales se encuentran:

- Varilla de compactación: de acero lisa, cilíndrica y extremo de apisonamiento redondeado del mismo diámetro de la varilla.
- Mazo, con cabeza de caucho.
- Taras o recipientes para pesar o mezclar el material.

- Balanzas.
- Mezcladora de concreto, tambor giratorio con motor.

Características De Los Moldes y Especímenes

Los moldes utilizados fueron cilíndricos para muestras fundidas verticalmente que cumplen las generalidades especificadas en el ítem 3.1 de la NTC 1377, la medida de estos depende de las dimensiones seleccionadas para los especímenes cilíndricos; los cuales, “pueden ser de varios tamaños, con un mínimo de 50 mm de diámetro x 100 mm de longitud” (NTC 1377, 1994).

Para las muestras de esta investigación se utilizaron moldes cilíndricos de 100 mm de diámetro x 200 mm de longitud y el número de especímenes fundidos fueron 3 para cada porcentaje de reemplazo de agregado fino por viruta de acero al carbono. Según la norma, las edades más comunes o usadas para ensayos de resistencia a la compresión son 7 y 28 días, sin embargo, se contempló adicional a estas una edad promedio de 14 días para evaluar mejor el comportamiento del concreto.

Mezclado Del Concreto

Primero se realizó la preparación y separación de los materiales, que dependió directamente del diseño de mezcla de concreto calculada para la resistencia de 21 MPa, donde, se tuvo en cuenta un desperdicio representativo en cantidad de muestras de 2 especímenes adicionales. A continuación, se presentan las cantidades de material utilizado dependiendo de la cantidad de especímenes realizados.

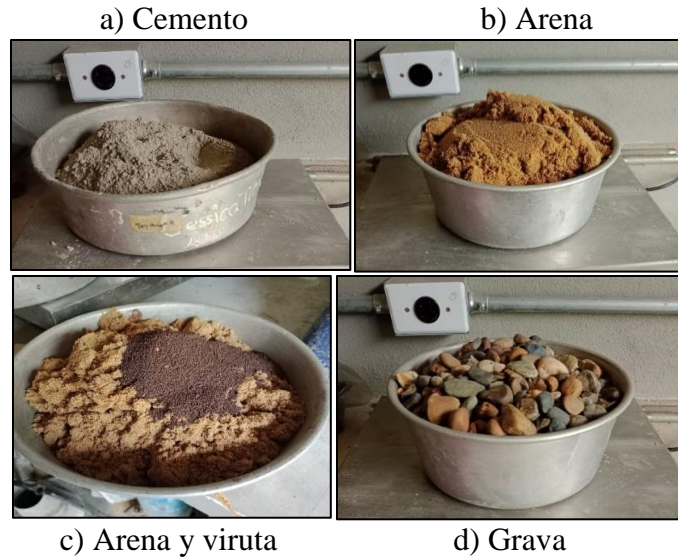
Tabla 43

Cantidad de material según número de muestras

Cantidades de material por porcentaje para 3 cilindros de muestra				
Porcentaje	0%	5%	10%	15%
Agua [L]	1.03	1.03	1.03	1.03
Cemento [kg]	1.88	1.88	1.88	1.88
Agregado grueso [kg]	6.85	6.85	6.85	6.85
Viruta [kg]		0.187	0.356	0.511
Agregado fino [kg]	3.92	3.73	3.56	3.41
Cantidades de material por porcentaje para 6 cilindros de muestra				
Porcentaje	0%	5%	10%	15%
Agua [L]	2.06	2.06	2.06	2.06
Cemento [kg]	3.77	3.77	3.77	3.77
Agregado grueso [kg]	13.70	13.70	13.70	13.70
Viruta [kg]		0.373	0.712	1.022
Agregado fino [kg]	7.83	7.46	7.12	6.81
Cantidades de material por porcentaje para 9 cilindros de muestra				
Porcentaje	0%	5%	10%	15%
Agua [L]	2.83	2.83	2.83	2.83
Cemento [kg]	5.18	5.18	5.18	5.18
Agregado grueso [kg]	18.83	18.83	18.83	18.83
Viruta [kg]		0.513	0.979	1.405
Agregado fino [kg]	10.77	10.26	9.79	9.37

Figura 6

Separación de los materiales

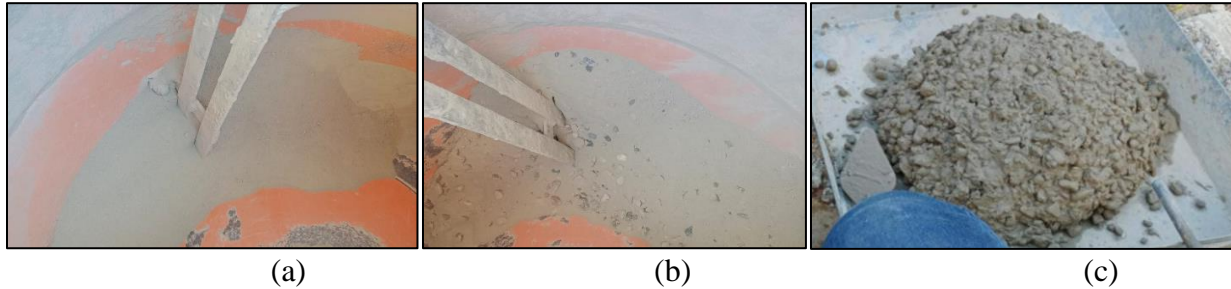


Luego se realizó el mezclado del concreto de manera mecánica, pero bajo el procedimiento de mezclado manual, tratando de homogenizar los materiales antes de agregar el agua; el proceso se resume de la siguiente manera:

- a) Se agregaron los materiales finos (cemento, agregado fino y viruta de acero al carbono) y se mezclan hasta unificarlos.
- b) Se adicionó el agregado grueso que pasó por el tamiz de $\frac{3}{4}$ "', con la finalidad de evitar en la mezcla agregado de mayor dimensión del tamaño máximo nominal obtenido de la granulometría. Luego se mezcló nuevamente y se fue ingresando el agua a la mezcla de a poco hasta conseguir la consistencia deseada.
- c) Se trasladó la mezcla a un recipiente limpio, impermeable y metálico para mezclar con palustre las zonas donde no haya apariencia uniforme.

Figura 7

Procedimiento de mezclado



Elaboración y Compactación De Muestras

El concreto se colocó en los moldes con ayuda de un palustre en 3 secciones o capas y se fue vibrando de manera manual cada una 10 veces con el mazo de caucho y apisonando 25 veces con la varilla compactadora, para finalmente, enrasar la superficie del concreto con una llana hasta conseguir dejarla lo más lisa y homogénea posible. Se moldearon las muestras en el mismo lugar donde se almacenaron durante las primeras 24 horas, siguiendo la recomendación de la norma (NTC 1377, 1994).

Figura 8

Concreto colocado en los moldes cilíndricos

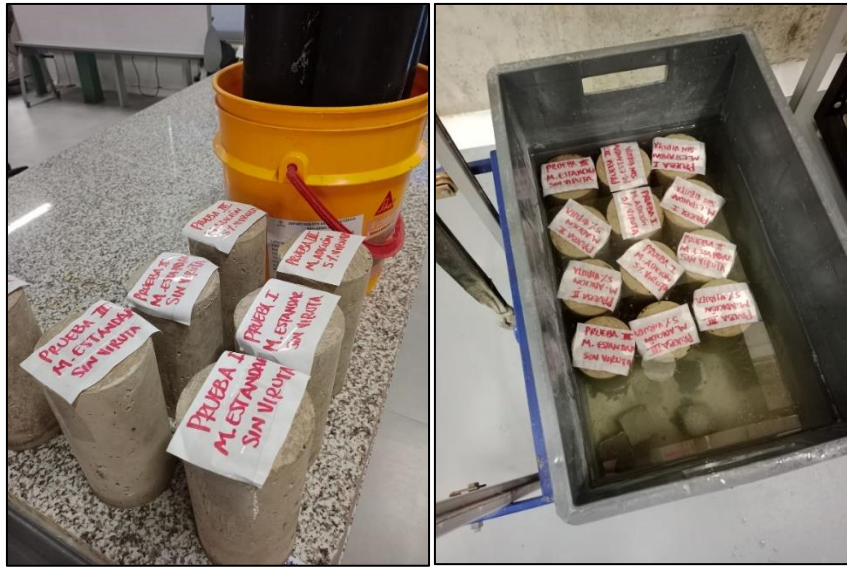


Curado De Especímenes

Los especímenes se retiraron de los moldes en el intervalo considerado en la norma (NTC 1377, 1994) de 24 ± 8 hr después de fundidos para inmediatamente ser ingresados en una piscina o canasta llena de agua, de modo que el nivel quedara hasta encima de la parte superior de los cilindros de concreto. La inmersión de las muestras duró hasta el momento del ensayo de resistencia a la compresión, que es la propiedad que se evaluará.

Figura 9

Desmolde de cilindros y curado en piscina



a) Desencofrado de los cilindros. b) Curado de cilindros.

Resultados y Análisis

Luego de cumplir el tiempo de curado para las tres edades planteadas se fallaron las muestras con ayuda del equipo de laboratorio de resistencia de los materiales con la finalidad de obtener la resistencia a la compresión del concreto diseñado y determinar los resultados para esta investigación.

En consideración a las dimensiones de los cilindros y con el fin de reducir sesgos se fallan 3 cilindros por cada uno de los porcentajes de reemplazo y los resultados se promedian para obtener la resistencia experimental.

Figura 10

Máquina automática para ensayos a compresión



Resistencia a La Compresión 7 Días

La resistencia experimental obtenida se compara con la resistencia teórica o de diseño esperada, conforme al porcentaje determinado para cada edad del concreto. Para el grupo de muestras de la edad de 7 días se espera un porcentaje del 65% con respecto a la resistencia de diseño.

Tabla 44

Resistencia a la compresión 7 días

Resistencia 7 días [MPa]				
Resistencia de diseño 13.65				
N° Muestra	0% viruta	5% viruta	10% viruta	15% viruta
1	12.81	12.87	16.47	12.57
2	13.04	12.12	13.56	12.79
3	10.44	12.40	14.52	12.90
Promedio	12.10	12.46	14.85	12.75
Incremento con respecto a la muestra estándar	0%	3.0%	22.8%	5.4%

De los resultados obtenidos para el tiempo de curado de los 7 días se observa un incremento de todos los porcentajes de viruta con respecto a la muestra patrón, de los cuales se resalta el resultado alcanzado de 14.85 MPa por el reemplazo del 10% de viruta de acero, ya que fue el único que alcanzó y superó con el 8.79% la resistencia de diseño esperada de 13.65 MPa para esta edad de curado.

Se identifica una tendencia de aumento en la resistencia a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo hasta el 10%, pero se ve interrumpida con el porcentaje del 15% como se observa en la Figura, debido a un decrecimiento en la resistencia. De acuerdo con lo anterior, el orden de los resultados para la resistencia a la compresión a los 7 días con reemplazo de agregado

fino por viruta de acero según el incremento con respecto a la muestra patrón sería primero 10%, segundo 15% y tercero 5%, con incrementos del 22.8%, 5.4% y 3.0% respectivamente.

Figura 11

Comportamiento de la resistencia a los 7 días según los porcentajes de reemplazo

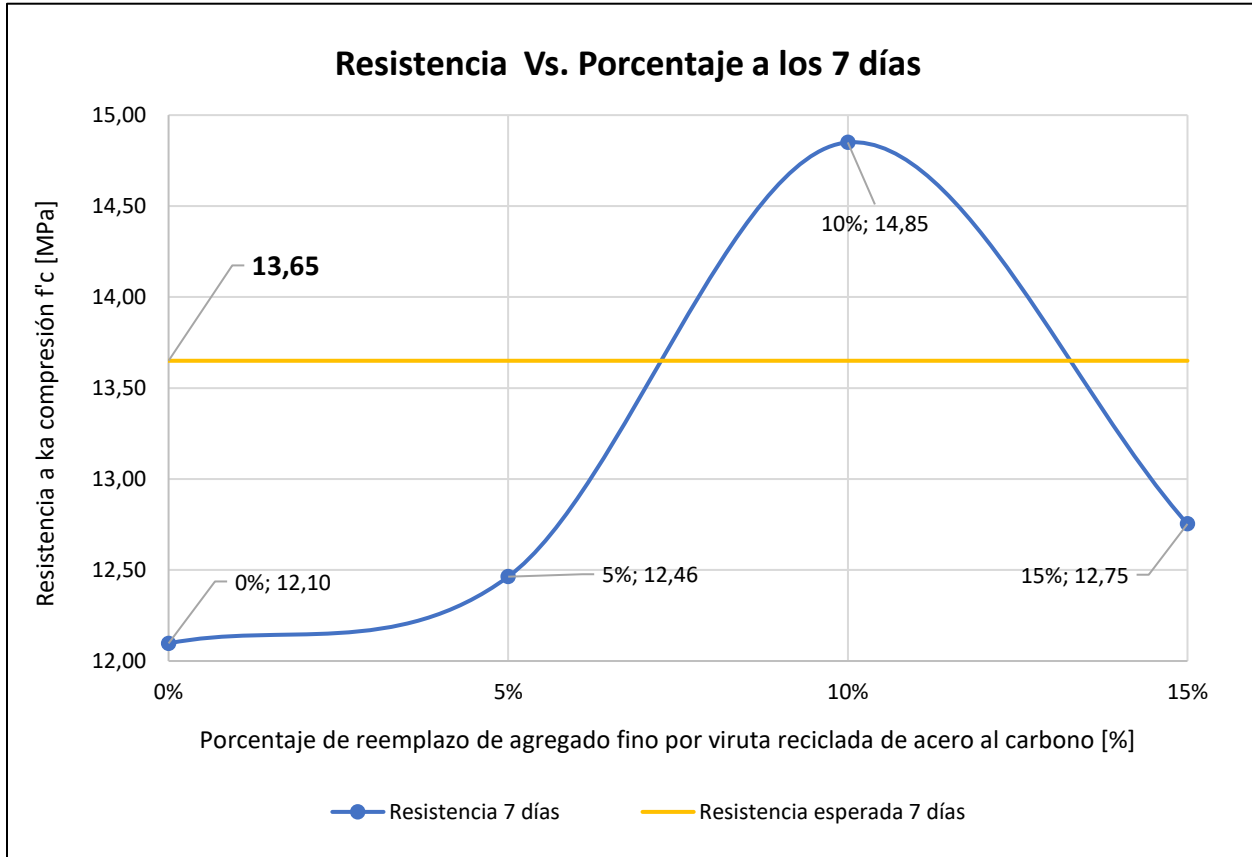


Figura 12

Cilindros estándar sin reemplazo de viruta fallados a los 7 días



Figura 13

Cilindros con reemplazo del 5% de viruta fallados a los 7 días



Figura 14

Cilindros con reemplazo del 10% de viruta fallados a los 7 días



Figura 15

Cilindros con reemplazo del 15% de viruta fallados a los 7 días



Resistencia a La Compresión 14 Días

Para la edad de 14 días se espera un porcentaje del 90% con respecto a la resistencia de diseño, el cual se analizará con la resistencia experimental obtenida.

Tabla 45

Resistencia a la compresión 14 días

Resistencia 14 días [MPa]				
Resistencia de diseño 18.9				
N° Muestra	0% viruta	5% viruta	10% viruta	15% viruta
1	16.18	15.61	19.29	18.63
2	15.34	18	18.57	17.92
3	15.07	18.40	17.42	19.65
Promedio	15.53	17.34	18.43	18.73
Incremento con respecto a la muestra estándar	0%	11.6%	18.7%	20.6%

De los resultados obtenidos de los porcentajes de reemplazo del 5%, 10% y 15% para el tiempo de curado de los 14 días se observa un incremento de 11.65%, 18.66% y 20.60% respectivamente con respecto a la muestra patrón, sin embargo, ninguno de los remplazos igualó o superó a la resistencia teórica esperada.

La tendencia en la Figura representa un crecimiento de la resistencia a medida que el porcentaje de reemplazo aumenta y en todos los resultados se observa un incremento significativo en comparación a la muestra estándar, sobre todo en el porcentaje de reemplazo del 15%, siendo el que mayor incremento obtuvo. Sin embargo, dentro de los alcances de la investigación no fue posible determinar si con un porcentaje de reemplazo mayor se cumpliría con los requisitos de diseño esperados para la resistencia.

Figura 16

Comportamiento de la resistencia a los 14 días según los porcentajes de reemplazo

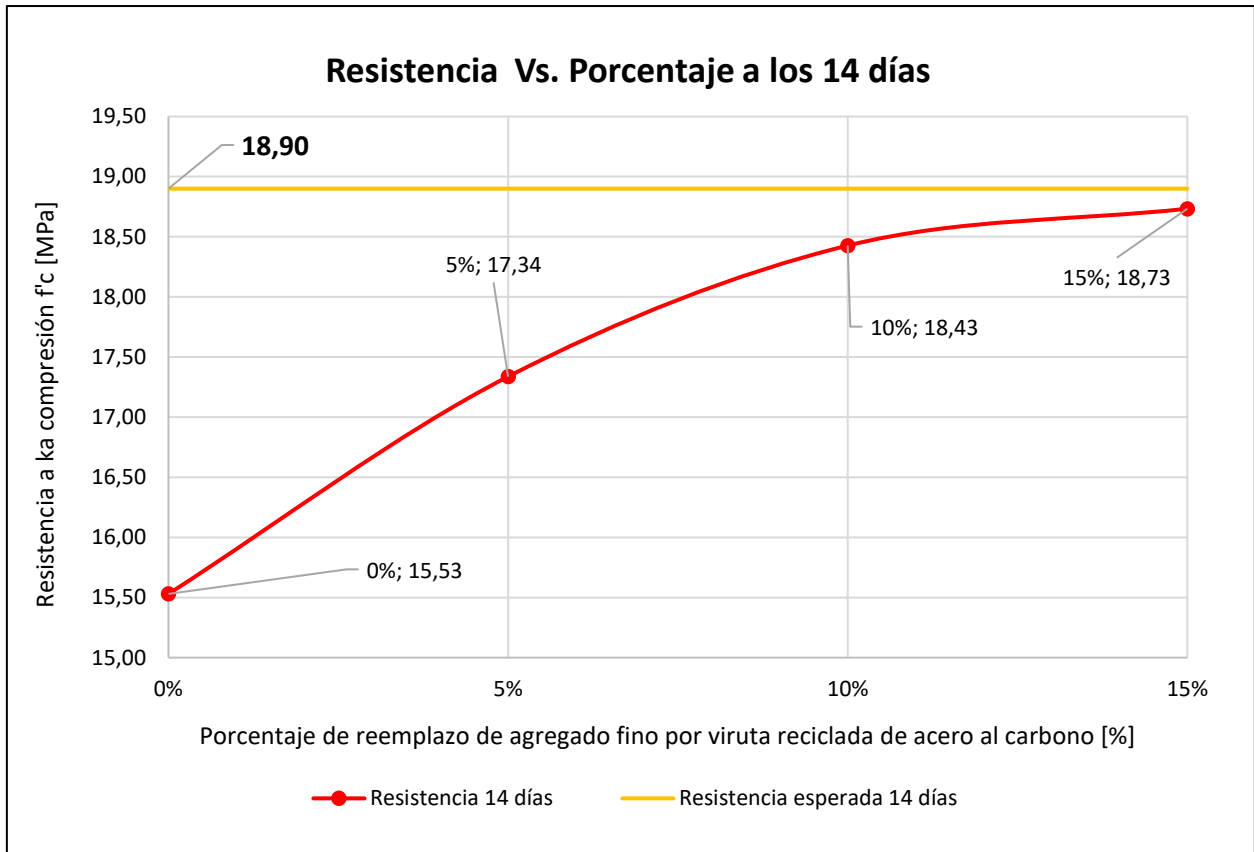


Figura 17

Cilindros estándar sin reemplazo de viruta fallados a los 14 días



Figura 18

Cilindros con reemplazo del 5% de viruta fallados a los 14 días



Figura 19

Cilindros con reemplazo del 10% de viruta fallados a los 14 días



Figura 20

Cilindros con reemplazo del 15% de viruta fallados a los 14 días



Resistencia a La Compresión 28 Días

Teóricamente en la edad de los 28 días el concreto llega a su máxima resistencia, por lo que el resultado mínimo esperado debe ser el 99% de la resistencia de diseño.

Tabla 46

Resistencia a la compresión 28 días

Resistencia 28 días [MPa]				
Resistencia de diseño 20.79				
N° Muestra	0% viruta	5% viruta	10% viruta	15% viruta
1	16.91	16.74	17.74	20.96
2	19.27	23.00	18.99	25.29
3	18.23	23.67	20.14	22.57
Promedio	18.09	21.14	18.96	22.94
Incremento respecto a la muestra estándar	0%	16.8%	4.8%	26.8%

En los resultados de los 28 días de curado los porcentajes de 5 y 15% sobrepasan la resistencia de diseño esperada, obteniendo resistencias de 21.14 y 22.94 MPa respectivamente, sin embargo, todos los porcentajes de reemplazo excedieron la resistencia obtenida por la muestra patrón, logrando con el máximo reemplazo un incremento del 26.8%.

De manera general se esperaba una relación directa entre el porcentaje de reemplazo y la resistencia obtenida, en otras palabras, a mayor reemplazo mayor será la resistencia obtenida. Los porcentajes de 5% y 15% de reemplazo sí cumplieron con dicho comportamiento, a excepción del reemplazo del 10% debido a que es el único que decrece y no logra la tendencia esperada. Este decrecimiento se pudo presentar por factores externos en la elaboración de las muestras asociado a la falta de compactación de estas, sin embargo, se pudo observar que el comportamiento de este porcentaje es diferente a los otros, dado que a medida que se aumenta la edad de curado su resistencia pasa de incrementarse exponencialmente a casi mantenerse constante, tal como se muestra en la Figura 7.

Figura 21

Comportamiento de la resistencia a los 28 días según los porcentajes de reemplazo

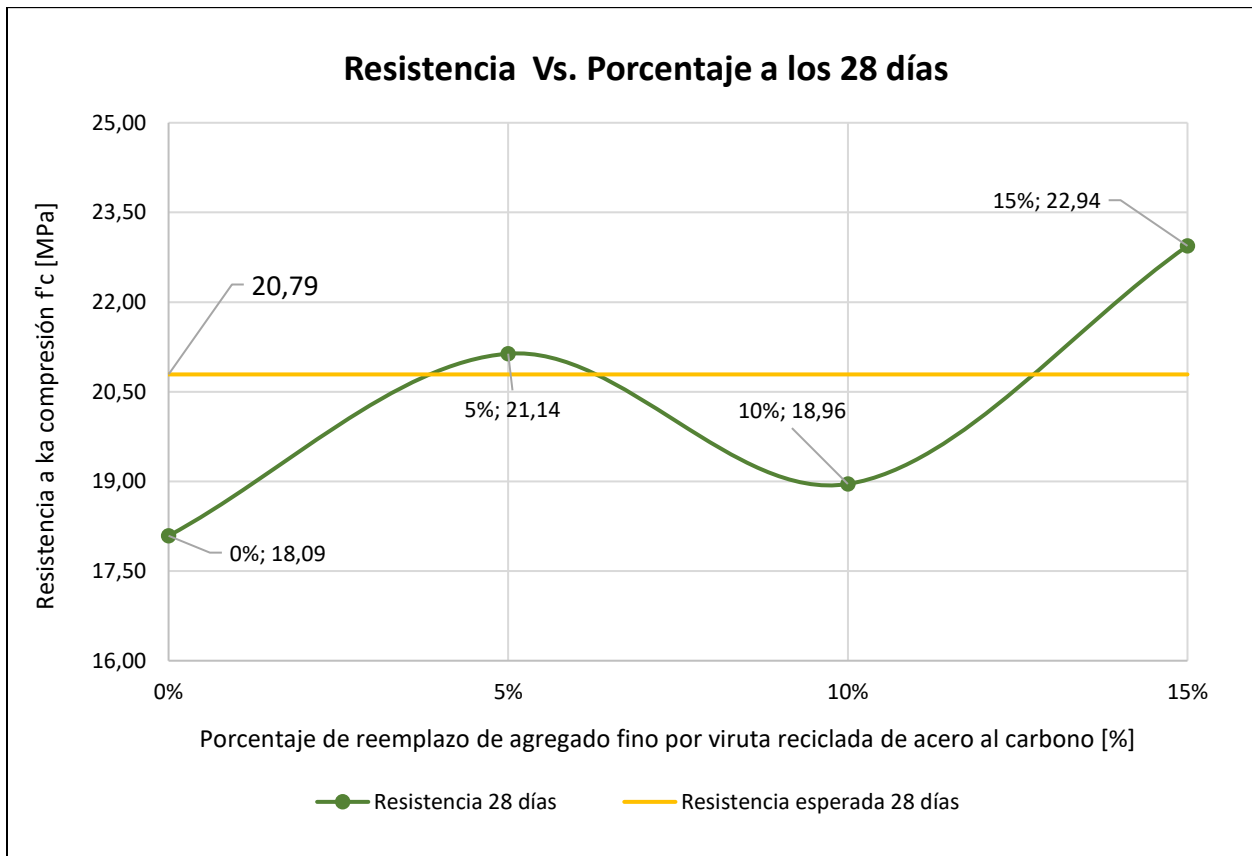


Figura 22

Cilindros estándar sin reemplazo de viruta fallados a los 28 días



Figura 23

Cilindros con reemplazo del 5% de viruta fallados a los 28 días



Figura 24

Cilindros con reemplazo del 10% de viruta fallados a los 28 días



Figura 25

Cilindros con reemplazo del 15% de viruta fallados a los 28 días



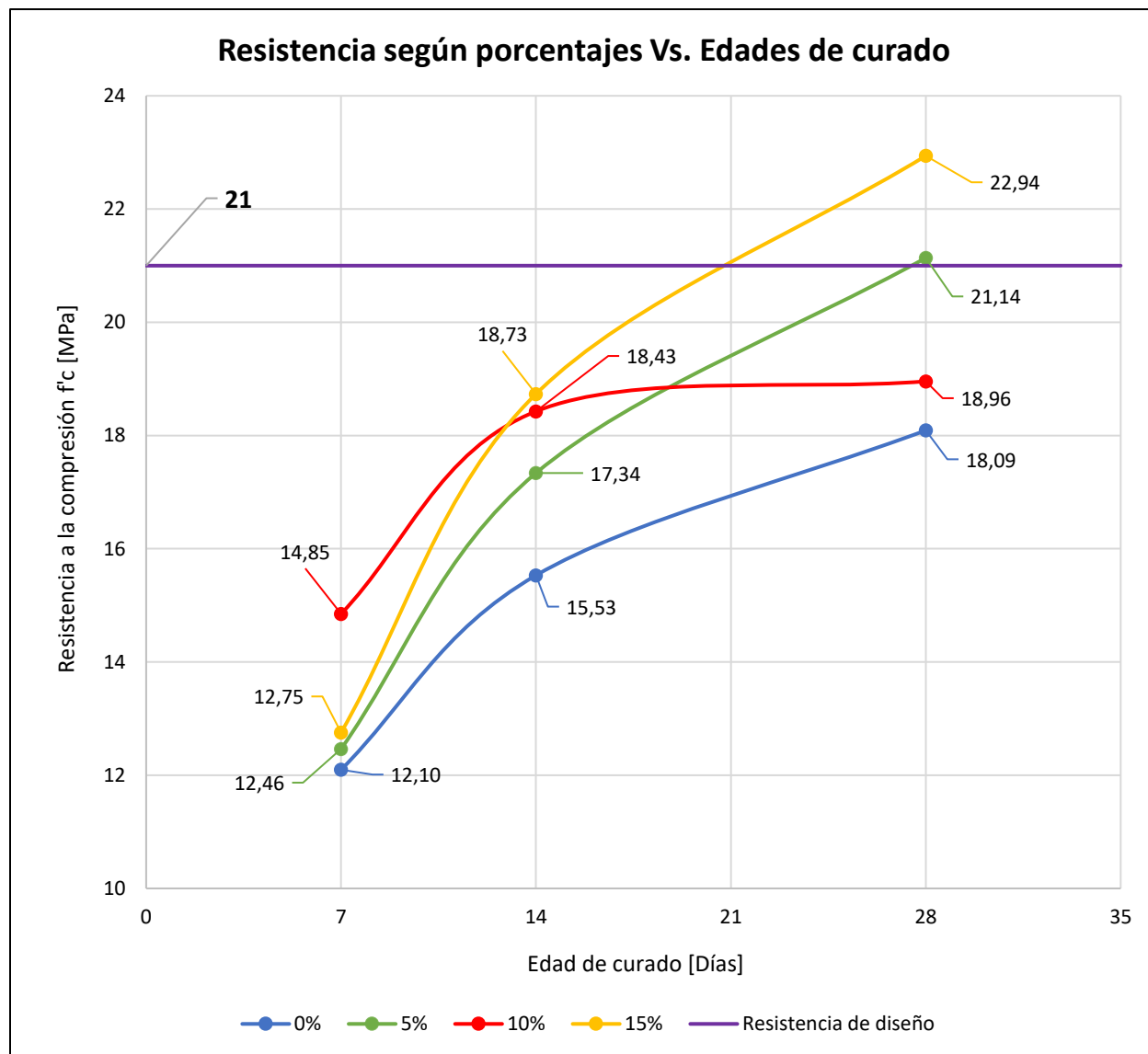
Análisis Por Porcentaje De Reemplazo

De manera general se organizaron Figuras los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión de cada reemplazo de agregado fino por viruta de acero al carbono reciclada en los porcentajes de 0%, 5%, 10% y 15%. Esto, para identificar el comportamiento en cada una de las edades o tiempos de curado del concreto contemplados en esta investigación a los 7, 14 y 28 días.

Todos los resultados presentan como comportamiento un aumento en la resistencia a la compresión a medida que aumenta la edad de curado. A pesar de lo anterior, el único porcentaje que muestra una desviación y decrecimiento en el incremento de la resistencia es el 10% de reemplazo, debido a que luego de los 7 días de curado tiende a mantenerse casi constante su resistencia. La siguiente Figura simplifica los resultados:

Figura 26

Resistencia según porcentaje con respecto a las edades de curado



Recapitulando y comparando las investigaciones seleccionadas para el estado del arte, es posible analizar que la mayoría de los resultados para la resistencia a la compresión cumplieron con el objetivo esperado de mejorar e incrementar la resistencia a la compresión utilizando en la mezcla de concreto la adición o sustitución de viruta de acero, así mismo, para varias de ellas el porcentaje de reemplazo óptimo fue el del 10%.

En la mayoría de las revisiones bibliográficas se evidencia un incremento en la resistencia de los porcentajes de reemplazo en comparación con la muestra estándar, en las investigaciones “Efecto de la Viruta de Acero en la Resistencia a la Compresión del Concreto de $f'c=210\text{kg/cm}^2$ ” (Garate Labajos, 2018) y “Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto adicionado con viruta de acero en porcentajes de 10 y 12 % respecto al agregado fino de la mezcla” (Angarita Pinzón & Rincón Gaona , 2017) se identificaron incrementos de 9.64% y 8.79% respectivamente; lo que valida como satisfactorio los resultados obtenidos en esta propuesta, ya que, se alcanzó para esta investigación un máximo incremento del 26.81%.

El autor Alfonso García quiso indagar si un porcentaje mayor al 10% mejoraría los resultados ya obtenidos y con la investigación “Mejoramiento del concreto con adición de viruta de acero a porcentajes de 12% y 14% respecto al agregado fino de la mezcla” (García Badillo, 2008) evaluó la resistencia a la compresión, pero no obtuvo los resultados esperados, dado que la adición con 12% aumentó solo 18.25%, mientras que la del 14% decreció 5.68%; por lo que, mantuvo la hipótesis de un porcentaje óptimo del 10%. Sin embargo, en este trabajo se observó una discrepancia en el comportamiento del porcentaje de reemplazo del 10%, al igual que sucedió en la investigación “Evaluación de la viruta de acero como agregado fino para concreto estructural” (Gonzalez Ramos, 2018) donde se concluyó que ocurrió un efecto adverso al incremento de resistencia, dado que la resistencia a la compresión de un concreto de 298 kg/cm^2 , incrementó en el porcentaje de sustitución de viruta de acero de 5% y disminuyó en el 10%, con resultados de 310 kg/cm^2 y 225 kg/cm^2 respectivamente.

De la misma manera, en la investigación “Efecto en los esfuerzos a flexión y compresión con la adición de viruta de acero a la mezcla de concreto” se obtuvieron diferentes resultados a los determinados en esta propuesta, donde se destacó que mientras más viruta de metal la resistencia

a la compresión es menor que el concreto convencional sin esta. Contrario a lo obtenido para el porcentaje mayor evaluado en este trabajo, donde fue el que a los 28 días alcanzó la máxima resistencia y el mayor incremento de esta.

A pesar de que en las investigaciones revisadas se evidenciaron algunas similitudes y diferencias con este trabajo, no se logró observar en ellas una explicación detallada de la caracterización de los materiales o del proceso de la preparación de las muestras, por lo que no es posible comprobar que el comportamiento del concreto se deba a los materiales utilizados, al diseño de mezcla u otros factores del procedimiento.

Análisis Económico Por Porcentaje De Reemplazo

Desde un aspecto económico se realizó un análisis del cual se determinó que para cada uno de los porcentajes de reemplazo de agregado fino por viruta de acero al carbono existe un ahorro económico por metro cúbico de concreto. Estos datos se obtuvieron conforme a los valores del mercado establecidos durante el desarrollo de este trabajo.

Tabla 47

Precio de materiales utilizados en la investigación

Cemento [\$/kg]	\$ 586.0
Arena [\$/kg]	\$ 94.8
Grava [\$/kg]	\$ 162.3

Tabla 48

Análisis económico por m³ de concreto

Material	0%	5%	10%	15%
Cemento [\$/kg]	\$ 175,628.65	\$ 175,628.65	\$ 175,628.65	\$ 175,628.65
Arena [\$/kg]	\$ 59,110.91	\$ 56,296.10	\$ 53,737.19	\$ 51,400.79
Grava [\$/kg]	\$ 176,951.02	\$ 176,951.02	\$ 176,951.02	\$ 176,951.02
Total [\$/m ³]	\$ 411,690.58	\$ 408,875.77	\$ 406,316.86	\$ 403,980.46
Diferencia económica [\$/m ³]	\$ -	\$ 2,814.81	\$ 5,373.72	\$ 7,710.12
Ahorro porcentual	0.00%	0.68%	1.31%	1.87%

Se identificaron entonces diferentes ahorros económicos por metro cúbico de mezcla de concreto según el diseño establecido para esta investigación, donde, para el porcentaje del 5% de reemplazo se obtuvo un ahorro de \$2,814/m³, para el 10% un ahorro de \$5,373/m³ y para el 15% un ahorro de \$7,710/m³.

A pesar de los ahorros determinados para cada uno de los porcentajes de reemplazo y de que la viruta esté contemplada como material de desperdicio, se deben tener en cuenta factores de recolección, almacenamiento y transporte de esta. Por ello, si se considera utilizar la viruta de acero al carbono reciclada se debe contemplar una alianza con las industrias metalúrgicas para darle un buen uso y disposición final a este desecho que demostró con los resultados obtenidos en esta investigación ser de gran utilidad para contribuir al incremento de la resistencia a la compresión en un concreto convencional.

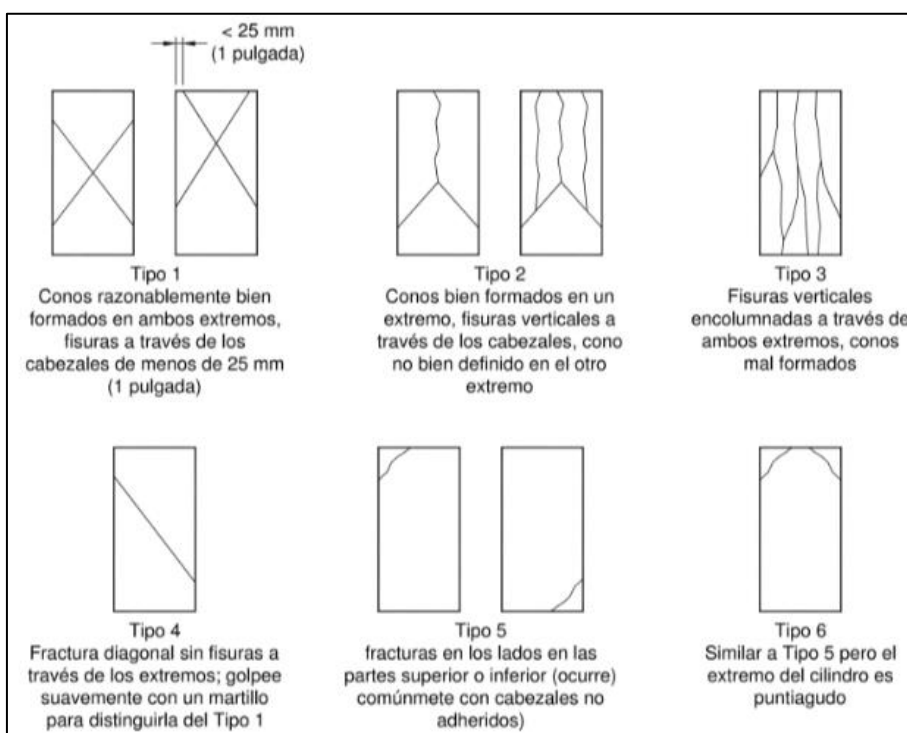
Para estimar el valor de la viruta que se utilizó en esta investigación se debe contemplar que el acero del que proviene este residuo es importado y que por sus características el kg está en aproximadamente \$2,000.

Análisis Por Tipología De Falla

En la norma NTC 673 se identifican modelos de fallas típicas que se presentan al momento de fallar las probetas cilíndricas de concreto, con base a ello fue posible clasificar las tipologías que se manifestaron en las muestras de esta investigación.

Figura 27

Esquema de los modelos de fractura típicos



Nota. Tomado de la (NTC 673, 2010)

Los tipos de falla que se lograron apreciar entre los 36 cilindros de concreto fueron 2, 4, 5 y 6. Para cada edad de curado se registraron las cantidades de falla según su tipología y se determinaron los porcentajes con respecto a los tipos.

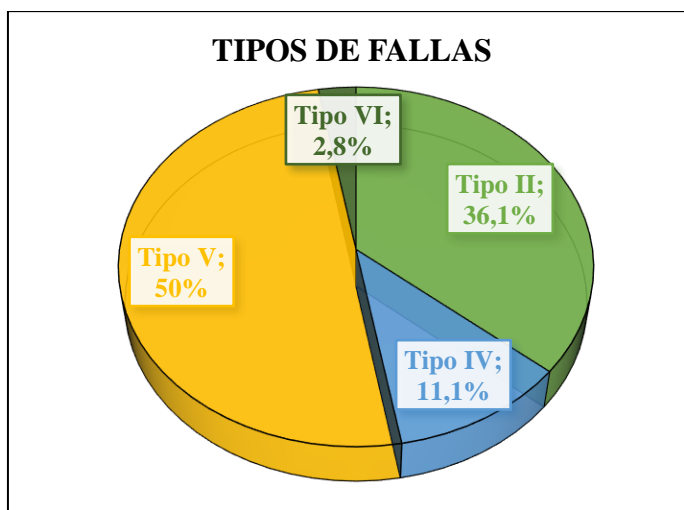
Tabla 49

Cantidad de fallas según la edad de curado

Tipología	7 días	14 días	28 días	Total	%
Tipo II	2	7	4	13	36.1%
Tipo IV	0	3	1	4	11.1%
Tipo V	9	2	7	18	50.0%
Tipo VI	1	0	0	1	2.8%

Figura 28

Distribución porcentual de las tipologías de fallas



De los resultados obtenidos se observó que la mitad de las muestras cilíndricas ensayadas presentaron una falla de tipo 5, un tercio corresponde al tipo 2, la novena parte son de tipo 4 y solo un cilindro presentó falla tipo 6.

Asimismo, se determinó el valor porcentual por tipologías según el porcentaje de reemplazo del agregado fino por viruta de acero al carbono.

Tabla 50

Tipología de falla según los porcentajes de reemplazo

Tipología	Porcentaje de reemplazo			
	0%	5%	10%	15%
Tipo II	22%	44%	33%	44%
Tipo IV	22%	11%	0%	11%
Tipo V	44%	44%	67%	44%
Tipo VI	11%	0%	0%	0%

Según las tipologías observadas, la 2 y 5 son las más representativas en todos los porcentajes evaluados; se destacaron para los porcentajes de reemplazo del 0% y 10% la falla tipo 5, y para el 5% y 15% las fallas tipo 2 y 5.

Conclusiones y Recomendaciones

Al finalizar este trabajo investigativo, es posible establecer que en todas las edades del concreto ensayado se observa el valor agregado de la viruta de acero al carbono, esto se refleja en los incrementos de la resistencia con respecto a las muestras estándar. Para la edad de los 7 días el mayor incremento fue del 22.76% identificado con el porcentaje del 10% de reemplazo de viruta, para la edad de los 14 días con el porcentaje del 15% se obtuvo el mayor incremento de 20.6%, de igual manera para la edad de los 28 días con el porcentaje del 15% se obtuvo un incremento del 26.8%.

En esta investigación se destacó el porcentaje de 15% de reemplazo, dado que, para las edades de curado de 14 y 28 días fue el que mayor incremento logró con respecto a la muestra estándar en ambos tiempos e incluso superó la resistencia de diseño para los 28 días con un aumento del 10.3%, mostrando un comportamiento progresivo a medida que se aumenta el tiempo de curado.

Los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días de 14.85 MPa para el porcentaje de 10% de reemplazo fue el único que cumplió y superó la resistencia de diseño esperada de 13.65 MPa, pero a pesar de obtener incrementos con respecto a la muestra estándar en las edades de 14 y 28 días con este porcentaje, no se cumplieron los objetivos propuestos dado que la resistencia experimental obtenida no cumplió o superó la esperada según el diseño.

La tendencia esperada es que a medida que aumente el porcentaje de reemplazo de agregado fino por viruta se aumente la resistencia a la compresión, sin embargo, esto no es concluyente, debido a que en el porcentaje de reemplazo del 10% se disminuye el incremento de la resistencia con respecto a la muestra estándar a medida que se incrementa el tiempo de curado, a diferencia de los otros porcentajes evaluados.

A pesar de no cumplir o superar la resistencia en todos los tiempos de curado, se evidencia en todos los resultados que la viruta reciclada de acero al carbono le aporta al concreto una resistencia satisfactoria superando a la muestra patrón.

De las imágenes de los cilindros ensayados, para todas las edades de curado, se logra apreciar que existieron fallas controladas, que se asemejan a las tipologías 2, 4, 5 y 6 identificadas de la NTC 673 según los esquemas de modelos de fracturas típicos que se presentan comúnmente en las probetas cilíndricas de ensayos a compresión simple; específicamente se observan fisuras verticales en los cabezales sin definición, fractura diagonal sin fisura en los extremos y fracturas a los lados en las partes superiores o inferiores (NTC 673, 2010). Sin embargo, al finalizar el ensayo de compresión y teniendo en cuenta la apariencia física de algunas probetas surgió la necesidad de analizar si su falla se debió a factores de preparación de las muestras como errores en el vibrado o si realmente su máximo esfuerzo fue el obtenido.

Esta propuesta puede aportar beneficios desde el ámbito económico en el sector de la construcción con la apertura de nuevos mercados, la atracción de nuevas fuentes de financiación y alianzas con el sector metalúrgico; no obstante, se deben tener en cuenta variables como los costos de transporte y/o compra del residuo, ya que, estas inciden en la elección de utilizar o no esta propuesta de mezcla de concreto. Es importante destacar que según la cantidad de metros cúbicos de concreto que se requieran en cualquier proyecto de obra se podría ahorrar desde el 0.68% hasta el 1.87% por metro cúbico en el costo de los materiales dependiendo del porcentaje de reemplazo de agregado fino por viruta de acero que se considere según este estudio de 5, 10 o 15%.

Desde el ámbito ambiental esta propuesta contribuye a reducir la explotación de áridos vírgenes y aprovecha los residuos obtenidos del procesamiento de elementos compuestos de acero al

carbono, impulsando prácticas innovadoras asociadas al desarrollo sostenible en la construcción que garantizan la utilidad y el rendimiento de estos materiales en el mercado. Lo anterior, permite concluir que es posible conseguir un balance económico-ambiental positivo en el sector, aportando a la preservación y cuidado del medio ambiente, e influyendo favorablemente en el impacto social.

Recomendaciones

- Revisar que la máquina de compresión de cilindros este calibrada para los ensayos de las probetas cilíndricas.
- Garantizar que exista un adecuado almacenamiento de los materiales para evitar vencimiento del material cementante o alteración de la humedad natural de los agregados.
- Aplicar suficiente ACPM o aceite que no reaccione ante el cemento para evitar que se queden fragmentos de concreto al momento de desencofrar los cilindros.
- Evaluar el estado natural de los agregados antes de ser mezclados con el material cementante y la viruta de acero al carbono para rectificar que sea el correspondiente al planteado en el diseño de mezcla.
- Identificar las posibles aplicaciones de esta alternativa de concreto en elementos estructurales.
- Estudiar otros porcentajes de reemplazo entre los intervalos de 5-10% y del 10-15% para establecer el comportamiento del material, teniendo en cuenta la tendencia mostrada en el porcentaje del 10% de esta investigación.
- Comprobar si la tendencia de que a mayor porcentaje de viruta mayor será la resistencia, para ello, se recomienda hacer pruebas con porcentajes superiores al 15%.
- Aplicar para esta alternativa de concreto otros métodos de diseño de mezcla (PCA, Fuller and Thomson, Walker o del módulo de finura) y comparar los resultados para evaluar si se observa el mismo comportamiento.

Referencias

- López , L. Y., & Sépiulveda, D. (s.f.). *Caracterización física de diferentes muestras de agregados pétreos para el concreto - zona norte de Bogotá*. Bogotá D.C., Colombia : Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia . Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1801/3/Articulo-Caracterizacion%20fisica%20de%20agregados.pdf>
- Singh, H. (2017). *Steel Fiber Reinforced Concrete*. Ludhiana, Punjab: Springer.
- Abudinen, D. (23 de Marzo de 2020). *Teoría Diseño Mezcla ACI 211.1*. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=GkjeVYN2Kks>
- Angarita Pinzón, P. A., & Rincón Gaona , H. J. (2017). *Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto adicionado con viruta de acero en porcentajes de 10 y 12 % respecto al agregado fino de la mezcla*. Ocaña, Colombia: Universidad San Francisco de Paula Santander.
- Badillo, A. G. (2008). *Mejoramiento del concreto con adición de viruta de acero a porcentajes de 12 y 14 % respecto al agregado fino de la mezcla*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11912/299>
- Bheel, N., Awoyera, P., Aluko, O., Mahro, S., Viloría, A., & Severiche Sierra, C. A. (2020). Sustainable composite development: Novel use of human hair as fiber in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Case 13.

Briones Ponce, A. N., Zambrano Macías , J. C., Muñoz Macías, J. A., Ruiz Párraga, W. E., & Panchana de Calderero , R. A. (2020). Análisis de la prestación mecánica del hormigón empleando virutas de acero como agregado fino. *RIETMAT*, Art 3.

Cabrera, H., Daza, C., Pacheco-Bustos, C., & Murillo, M. (2021). Study on mechanical properties of mortars containing steel shot and sea sand as fine aggregate replacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, <https://doi.org/doi:10.1088/1757-899X/1126/1/012003>.

Camacol. (2018). *La construcción genera casi dos millones de empleos en Colombia*. Eempleo. Obtenido de <https://www.eempleo.com/co/noticias/investigacion-laboral/la-construccion-genera-casi-dos-millones-de-empleos-en-colombia-5573>

Cemex. (05 de Abril de 2019). *¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto?* Obtenido de Cemex: <https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto->

Cemex. (2022). *Agregados cemex*. Obtenido de Cemex: <https://www.cemex.com/es/productos-servicios/productos/agregados>

Componentes y propiedades del cemento. (s.f.). Recuperado el 8 de Mayo de 2022, de Instituto español del cemento y sus aplicaciones: <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/#:~:text=El%20cemento%20es%20un%20conglomerante,estabilidad%20incluso%20bajo%20el%20agua.>

Cruz Hernández, R. A., Franco Durán, D. M., & Pérez Bustos, L. (2014). Reemplazo del Agregado Fino por Escoria de Horno de Cubilote para la Fabricación de Concreto. *INGE CUC*, 83-88.

DANE. (2022). *Estadísticas de Concreto Premezclado*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/concreto/Bol_concreto_dic_22.pdf

De la Iglesia , J., Murillo , M., & Borrero Restrepo, D. (2021). Study of the importance of core cylinders in the monitoring of the compressive strength of the concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, <https://doi.org/https://doi:10.1088/1757-899X/1126/1/012050>.

Deledesma Carrera, S. B. (2019). *Resistencia a compresión de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ sustituyendo agregado fino por fibras y virutas de acero*. Ancash, Perú: Universidad San Pedro.

Deledesma Carrera, Y. Y. (2021). *Resistencia a la compresión de un concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ sustituyendo parcialmente el agregado fino por virutas y limallas de acero*. Lima, Perú: Universidad César Vallejo.

Díaz Herrera, C. A., & Mogollon Peñaranda, B. M. (2020). *Influencia de la viruta de acero al carbón en las propiedades mecánicas del concreto de 3000 psi al incorporarlo como adición*. Cartagena: Universidad de Cartagena.

Durand Diaz, R., & Leiva Mora , D. K. (2018). *Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto, reemplazando el agregado fino por viruta de acero en porcentajes de 7%, 8% y*

9% con respecto de un concreto patrón, con agregados de las canteras de Vicho y Cunyac.

Cusco, Perú: Universidad Andina del Cusco.

Garate Labajos, M. (2018). *Efecto de la Viruta de Acero en la Resistencia a la Compresión del Concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$* . Trujillo, Perú: Universidad Cesar Vallejo.

García Badillo, A. (2008). *Mejoramiento del concreto con adición de viruta de acero a porcentajes de 12 y 14% respecto al agregado fino de la mezcla*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana .

García Córdova, H. A., & Sarmiento Gutierrez, J. E. (2008). *Mejoramiento de un concreto de 3000 psi con adición de viruta de acero con porcentajes de 6%, 8% y 10% respecto al agregado fino de la mezcla*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Obtenido de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/135/digital_15516.pdf?s

González Cuevas, Ó. M., & Robles Fernández-Villegas, F. (2004). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. Azcapotzalco, México: Limusa.

Gonzalez Ramos, M. E. (2018). Evaluación de la viruta de acero como agregado fino para concreto estructural. *Universidad Católica Andrés Bello*.

Guzmán Hidalgo, C. M., & Garate Labajos, M. (2019). *Viruta de Acero en la Resistencia a la Compresión y Flexión del Concreto*. Trujillo, Perú: Universidad Cesar Vallejo.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois, E.E.U.U.: Portland Cement Association.

Labajos, M. G. (2018). *Efecto de la Viruta de Acero en la Resistencia a la Compresión del Concreto*. Trujillo-Peú: Universidad Cesar Vallejo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/37450>

Méndez, H. S. (s.f.). *GUÍAS DE LABORATORIO TECNOLOGÍA DE MATERIALES*. Obtenido de <file:///D:/OneDrive%20-%20Universidad%20de%20la%20Costa%20-%20CUC/8%20semestre/Tecnologia%20de%20los%20materiales/GU%C3%8DAS%20DE%20LABORATORIO%20TECNOLOG%20DE%20MATERIALES%20ESTRUCTURALES.pdf>

Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 601-605. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>.

Mora Castro, J. D. (2021). Reciclaje y reutilización de materiales de construcción en Colombia como aporte a la economía circular. *Universidad de la Salle*, 12.

Muñoz, A. C. (2017). *Comportamiento mecánico y de auto-monitorización de morteros reforzados con residuos metálicos*. Concepcion, Chile: Universidad Del Bio- Bio. Obtenido de <http://repopib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/3218>

Nilson, A. H. (1999). *Diseño de estructuras de concreto*. Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL.

NTC 110. (1991). *Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico*. Bogotá D.C.: INCONTEC.

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

NTC 174. (2000). *Especificaciones de los agregados para concreto*. Bogotá D.C.: ICONTEC.

NTC 176. (1995). *Método de Ensayo para Determinar la Densidad y la Absorción del Agregado Grueso*. Bogotá D.C: INCONTEC.

NTC 221. (1999). *Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra*. Bogotá D.C.: INCONTEC.

NTC 237. (1995). *Método de Ensayo para Determinar la Densidad y la Absorción del Agregado Fino*. Bogotá D.C: INCONTEC.

NTC 33. (1997). *Método para Determinar la Finura del Cemento Hidráulico por medio del Aparato de Blaine de Permeabilidad al Aire*. Bogotá D.C.: INCONTEC.

NTC 550. (2000). *Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra*. Bogotá D.C.: INCONTEC.

NTC 673. (2010). *Ensayo de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*. Bogotá D.C.: INCONTEC.

NTC 77. (1994). *Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*. Bogotá D.C.: INCONTEC.

NTC 92. (1995). *Determinación de la Masa Unitaria y los Vacíos entre Partículas de Agregados*. Bogotá D.C: INCONTEC.

ONU. (2015). *Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles*. Santiago: Naciones Unidas.

Perez Veli, R. Y. (2021). *La viruta de acero como sustituto del agregado fino y sus propiedades en el concreto*. Huancayo, Perú: Universidad Peruana Los Andes.

Ramos., M. E. (2018). *Evaluación de la viruta de acero como agregado fino para concreto estructural*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello. Obtenido de <http://catalogo-gy.ucab.edu.ve/documentos/tesis/33251.pdf>

Rosario, E. P. (2018). *Resistencia de Concreto $f'c=210$ kg/cm² con Sustitución del 10% del Agregado Fino por Viruta Metálica*. Cajamarca - Perú: Universidad San Francisco . Obtenido de <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/7947>

Salazar, Y. (23 de Febrero de 2021). *Tipos de concreto*. Obtenido de Grupo Sapcon: <https://sapcon.com.mx/blog/2021/02/23/tipos-de-concreto/>

Sandoval Unapucha, F. M. (2017). *Análisis comparativo de la resistencia a tracción y compresión del hormigón adicionando virutas de acero comercial fundido y el hormigón con fibras de acero comerciales*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.

Silva, O. J. (2022). *Tipos de agregados y su influencia en el diseño de la mezcla de concreto*. Obtenido de Argos 360: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto/>

Suarez González, O., & Vargas Rincon, A. (2008). *Análisis, observación y comportamiento estadístico en función del tiempo de una mezcla de concreto de 3000 psi con adición de viruta de acero en porcentajes de 9%, 10% y 11% respecto al agregado fino*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.

Tipos de acero según su composición de carbono. (s.f.). Recuperado el 08 de Mayo de 2022, de Universidad de la plata: <https://unlp.edu.ar/frontend/media/73/27873/03be3424af308bf57bee6ac2aa169171.pdf>

Unapucha, F. M. (2017). *Análisis comparativo de la resistencia a tracción y compresión del hormigón adicionando virutas de acero comercial fundido y el hormigón con fibras de acero comerciales*. Ambato- Ecuador: Universidad Tecnica De Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25961>

Valencia Castro, P., & Quintana Cruz, C. (2016). *Análisis comparativo entre el concreto simple y el concreto con adición de fibra de acero al 12% y 14%*. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

Vásquez Tarrillo , C. E. (2021). *Efecto en los esfuerzos a flexión y compresión con la adición de viruta de acero a la mezcla de concreto*. Lambayeque, Perú: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

ANEXOS

Índice De Ecuaciones

Ecuación (1) Número total de muestras del diseño experimental.....	46
Ecuación_(2) Densidad del cemento	48
Ecuación_(3) Densidad relativa del cemento	48
Ecuación_(4) Masa requerida para el ensayo de la finura del cemento.....	49
Ecuación_(5) Superficie específica de la muestra para el ensayo de la finura del cemento.....	50
Ecuación_(6) Volumen de agua para el ensayo de la consistencia normal del cemento.....	51
Ecuación_(7) Masa del agua necesaria para determinar la relación agua/cementante	51
Ecuación_(8) Relación agua/cemento.....	51
Ecuación_(9) Porcentaje de agua para una pasta con consistencia normal	51
Ecuación_(10) Densidad nominal del agregado grueso.....	57
Ecuación_(11) Densidad aparente del agregado grueso	57
Ecuación_(12) Densidad aparente, saturada y superficialmente seca del agregado grueso	57
Ecuación_(13) Porcentaje de absorción del agregado grueso.....	57
Ecuación_(14) Densidad nominal del agregado fino.....	58
Ecuación_(15) Densidad aparente del agregado fino	59
Ecuación_(16) Densidad aparente, saturada y superficialmente seca del agregado fino	59
Ecuación_(17) Porcentaje de absorción del agregado fino.....	59
Ecuación_(18) Masa unitaria de los agregados grueso y fino	61
Ecuación_(19) Porcentaje de vacíos para la masa unitaria de los agregados grueso y fino	62
Ecuación_(20) Resistencia a la compresión media requerida.....	66
Ecuación_(21) Interpolación de datos	68

Ecuación_(22) Contenido de cemento en la mezcla de concreto	69
Ecuación_(23) Masa del agregado grueso en la mezcla de concreto.....	69
Ecuación_(24) Fórmula de densidad	69
Ecuación_(25) Volumen de aire en la mezcla de concreto.....	70
Ecuación_(26) Volumen de agregado fino en la mezcla del concreto.....	71
Ecuación_(27) Masa húmeda de los agregados	71
Ecuación_(28) Masa del agregado fino en la mezcla de concreto.....	72
Ecuación_(29) Cantidad de agua de los agregados.....	72
Ecuación_(30) Agua total de la mezcla de concreto.....	73