

Evaluación del Comportamiento de un Concreto Sustentable con la Reutilización de Fibras de Acero para uso en Pavimento Rígido.

Johan S. Fuertes y Shirley N. Escobar

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico del Putumayo, Mocoa,

Putumayo

Ing. Esp Wuilliams Gilberto Quiroz Botina

30 de mayo de 2025



Nota de Aceptación

Profesional grupo GRAM 1

Profesional grupo GRAM 2

Mocoa Putumayo, 30 de mayo del 2025



Dedicatoria

En primer lugar, dedico este proyecto de grado a Dios que ha sido la guía e iluminación de mi camino de vida, mi mayor fuente de energía, fortaleza y calma en los momentos más difíciles de mi vida personal y profesional, que si no fuera por él no podría haber superado cada los retos que me presenta a diario.

A mi querida madre María Magdalena Nastar Cárdenas, quien ha sido mi mejor inspiración y apoyo incondicional para salir adelante cada día, que con su amor, consejos y enseñanzas me ha mostrado que en la vida nada es fácil y que si trabajas duro todo cosecharas tus frutos para convertirse en alguien importante en esta vida.

A mis hermanos Luis Fuertes y Angela Fuertes que me han impulsado a ser mejor persona y seguir adelante en todas las metas y proyecto que he propuesto.

A mi compañera sentimental y de estudio, Shirley Escobar que sin ella este proyecto no hubiera sido posible debido a que con su amor y fidelidad fue mi mayor apoyo a lo largo de mi carrera profesional, quien deposito su confianza en mi para aventurarnos en el desarrollo de esta investigación y lograr con éxito la meta que nos propusimos al final de nuestra carrera, a ella y los que aquí menciono, gracias totales.

Johan Sebastián Fuertes Nastar

Dedicatoria

En primer lugar, dedico este trabajo de grado a Dios quien me dio fortaleza día a día para no renunciar a mis sueños, quien me levantaba y me empujaba a seguir adelante y jamás soltarme. Le doy gracias a él por cada oración y petición respondida, por cada lágrima secada y cada dolor sanado, por reemplazar la tristeza por alegría y las renunciaciones por sueños. A mis padres por ser el motivo principal de este sueño cumplido, por su amor y su compañía, por su esfuerzo día a día y sacrificio para lograrlo. Gracias a ellos por sus oraciones, su compañía desde la distancia y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y la honestidad. Todo lo que soy se los debo a ustedes.

A mi hermana por su amor incondicional. Por su amistad, su apoyo, sacrificio y sobre todo por la paciencia que siempre me brinda mediante sus consejos y su tiempo.

A mi abuela, por su sabiduría, sus oraciones, su fe y su acompañamiento durante este largo proceso. Gracias a ella por ese amor tan puro y real que me ayudó a avanzar.

A mi pareja por caminar a mi lado como mi compañero de vida, por su paciencia y comprensión. Por ser el puntal para levantarme de cada caída. Gracias por creer en mí incluso cuando yo misma lo dudaba. Gracias a ti por estar conmigo y hacerme sentir que todo es posible con esfuerzo, amor y dedicación.

A mi mejor amigo por estar conmigo desde el primer día hasta el último, por enseñarme a creer y confiar, por ayudarme a reemplazar el llanto por risa. Gracias a él por ser más que un amigo, gracias por ser mi compañero, mi equipo en todo momento, mi consejero, mi impulso y mi refugio en los días donde parecían no ser buenos. A pesar de la distancia, su presencia fue notoria, gracias por cada mensaje y esa amistad tan pura. Este logro también te pertenece a ti.

Gracias a todos y cada uno de ustedes por creer en mí desde el día cero y jamás abandonarme

Shirley Natalia Escobar Guerrero.

Agradecimientos

Los autores de la presente investigación expresamos nuestros agradecimientos principalmente a Dios por la vida, la salud y la sabiduría para afrontar los desafíos de la vida, a nuestros familiares y allegados más cercanos por el apoyo incondicional y motivación en momentos difíciles, a cada uno de los docentes del programa de Ingeniería Civil que hicieron parte de este proceso de formación académica, al personal de laboratorio de la sede principal de Instituto por permitir hacer uso de sus instalaciones el cual fue fundamental para la obtención de datos que ayudaron en la investigación y finalmente dar gracias al Instituto Tecnológico del Putumayo por permitirnos cursar con éxito la carrera de Ingeniería Civil y adquirir conocimientos de gran utilidad para nuestra vida profesional.

Autores de investigación

Tabla de contenido

Resumen.....	11
Introducción	12
Planteamiento del problema	13
Justificación.....	16
Objetivos	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
Marco Referencial	18
Antecedentes	18
Marco Teórico.....	19
Concretos	19
Clasificación de los Concretos.....	20
Propiedades del Concreto en Estado Fresco	21
Trabajabilidad.	21
Consistencia.	22
Revenimiento.	23
Propiedades del Concreto en Estado Endurecido.....	25
Resistencia a la Compresión (RC).	25
Resistencia a la Flexión.	26
Incorporación de Fibras de Acero Reutilizadas en el Concreto.....	27
Fibras Metálicas	27
Propiedades de las Fibras Metálicas	29
Ventajas del uso FRC.....	30
Pavimento Rígido.....	32
Corte Transversal	32
Fisuras	32
Componentes Principales del Sistema	32
Diseño de Mezclas para Pavimentos Rígidos	33
Marco Conceptual.....	34
Marco contextual.....	39
Ubicación geográfica del valle de Sibundoy.....	39

Condiciones Meteorológicas.....	41
Hidrografía.....	42
Geología.....	43
Marco legal	44
Metodología	45
Tipo de investigación.....	46
Diseño de la Investigación	46
Variable Independiente.....	47
Variable dependiente.....	47
Muestra.....	47
Muestreo.....	47
Fases de la investigación.....	48
Procedimiento	51
Fase 1: Obtención y Caracterización de Agregados Pétreos.....	51
Selección de Agregados Grueso y Fino	51
Análisis Granulométrico de los Agregados Grueso y Fino.....	52
Ensayo del Índice de Alargamiento y Aplanamiento del Agregado Grueso	56
Ensayo de Presencia de Impurezas Orgánicas en Arena usadas para la Preparación de Concretos.....	57
Resistencia al desgaste en máquina de los ángeles.....	58
Ensayo de Densidad Bulk (peso unitario) y Porcentaje de Vacíos de los Agregados en estado Suelto y Compacto.	59
Ensayo de Densidad y Absorción del Agregado Fino.	62
Ensayo de densidad y absorción del agregado Grueso.	63
Fase 2: Recolección de alambre calibre 16 y Cálculo de Dosificación de Mezcla de Concreto $f'c$ = 3000 psi con la Adición de Fibras de Acero.....	64
Descripción del tipo de Alambre para usar Fibras de Acero en el Concreto	64
Recolección del Alambre Galvanizado Calibre 16	65
Preparación del Alambre Galvanizado Calibre 16.....	66
Diseño de Mezcla de Concreto de $f'c=3000$ psi por el Método de la ACI.	67
Fase 3: Realización de Ensayos de Calidad del Concreto	79
Ensayo en Estado Fresco: Asentamiento (Slump) de la Mezcla de Concreto	79

Ensayo en Estado Endurecido: Ensayo a compresión del concreto	80
Ensayo en Estado Endurecido: Ensayo a flexión del concreto	81
Resultados	82
Resultados del Ensayo de Asentamiento Slump	82
Resultados del Ensayo de Compresión en Cilindros	83
Resultados de Resistencia a la Compresión ($f'c$)	83
Resultados de Densidad de los cilindros	83
Resultados del Ensayo de Flexión en Cilindros	84
Análisis de resultados	85
Discusión	90
Conclusiones	93
Recomendaciones	94
Referencias	95
Anexos	97

Índice de Tablas

Tabla 1	<i>Clasificación de los concretos según resistencia a la compresión.</i>	20
Tabla 2	<i>Propiedades de fibras DRAMIX 3D</i>	29
Tabla 3	<i>Propiedades de fibras. MR=Módulo de Rotura del concreto y $f'c$=Resistencia a la compresión</i>	30
Tabla 4	<i>Normas que fundamentan el desarrollo de la investigación.</i>	44
Tabla 5	<i>Cilindros de concreto con porcentajes de adición de RFA</i>	48
Tabla 6	<i>Viguetas de concreto con porcentajes de adición de RFA</i>	48
Tabla 7	<i>Granulometría de agregado fino de Rio Mocoa Putumayo.</i>	52
Tabla 8	<i>Granulometría del agregado fino para concreto estructural.</i>	53
Tabla 9	<i>Granulometría del Triturado de Mocoa Putumayo.</i>	54
Tabla 10	<i>Granulometría para agregado grueso en losas de concreto.</i>	56
Tabla 11	<i>Cálculo índice de aplanamiento</i>	56
Tabla 12	<i>Cálculo índice de alargamiento</i>	57
Tabla 13	<i>Resultado del desgaste en máquina de los ángeles.</i>	59
Tabla 14	<i>Densidad Bulk (peso unitario compactado).</i>	60
Tabla 15	<i>Densidad Bulk (peso unitario suelto).</i>	60
Tabla 16	<i>Resultado % de vacíos de los agregados compactados.</i>	61
Tabla 17	<i>Resultado % de vacíos de los agregados sueltos.</i>	61
Tabla 18	<i>Resultados del ensayo de densidad y absorción del agregado fino.</i>	62
Tabla 19	<i>Resultados del ensayo de densidad y absorción del agregado grueso.</i>	63
Tabla 20	<i>Resistencia promedio requerida</i>	68
Tabla 21	<i>Volumen unitario del agua (lt/m³)</i>	69
Tabla 22	<i>Relación (a/c), por resistencia media $F'cr$ a los 28 días.</i>	70
Tabla 23	<i>Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto.</i>	71
Tabla 24	<i>Cantidades de material por metro cubico de concreto.</i>	73
Tabla 25	<i>Cantidad de material para cilindro por cada % de RFA</i>	74
Tabla 26	<i>Cantidad de material para vigueta por cada % de RFA.</i>	74
Tabla 27	<i>Datos de asentamiento con diferentes % FRA.</i>	82
Tabla 28	<i>Resultados de la resistencia a la compresión del concreto</i>	83
Tabla 29	<i>Resultados de densidad del concreto.</i>	84
Tabla 30	<i>Resultados de la resistencia a la flexión del concreto.</i>	84

Índice de Figuras

Figura 1 Molde para prueba de revenimiento	23
Figura 2 Muestra de la forma de revenimiento en una mezcla de concreto.	24
Figura 3 Desempeño en compresión de mezcla de concreto.	25
Figura 4 Tipo de fibras empleadas en experiencias.	28
Figura 5 Localización geográfica del valle de Sibundoy.....	40
Figura 6 Curva Granulométrica del agregado fino del Rio Mocoa.....	53
Figura 7 Curva Granulométrica triturado Mocoa Putumayo.....	55
Figura 8 Determinación del color del líquido que sobrenada sobre la muestra de ensayo.	58
Figura 9 Ficha técnica alambre galvanizado.....	65
Figura 10 Localización de cultivos de frijol.	66
Figura 11 Recolección de alambre desechado.	66
Figura 12 Corte de alambre calibre 16.....	67
Figura 13 Engrasado de moldes.....	75
Figura 14 Cálculo de masa del Agregado fino.	76
Figura 15 Elaboración de mezcla de concreto.	76
Figura 16 Adición de RFA a mezcla de concreto.	77
Figura 17 Incorporación y vibrado de la mezcla en vigueta.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18 Fraguado de los cilindros y viguetas	78
Figuras 19 Proceso de Curado de los cilindros y viguetas.....	79
Figura 20 Prueba de asentamiento (Slump).	80
Figura 21 Ensayo de compresión de cilindros.	80
Figura 22 Ensayo de resistencia a la flexión del concreto.	81
Figura 23 Curva de ensayo de revenimiento (Slupm).....	85
Figura 24 Curva Resistencia a la compresión del concreto.	87
Figura 25 Curva densidad promedio del concreto.	88
Figura 26 Curva resistencia a flexión del concreto.....	89

Resumen

En la actualidad, la sostenibilidad y la protección por el medio ambiente son el eje central para garantizar la estabilidad en el planeta, por lo cual, es de vital importancia contribuir al desarrollo de infraestructuras urbanas sostenibles. En este contexto, una alternativa innovadora para mitigar el impacto ambiental es el uso de materiales reciclables en la construcción de concretos mediante el uso de fibras o polímeros utilizados en la gran demanda de pavimentos rígidos.

De esta manera, esta investigación analiza el comportamiento del módulo de rotura de un concreto de 3000 psi y su resistencia a la compresión, considerando mezclas diferentes porcentajes (0.5%, 0.75%, 1%) de fibras de acero reutilizadas (RFA) en la actividad agrícola presente en el Valle de Sibundoy, departamento del Putumayo que son incorporadas a especímenes como refuerzo sostenible. Con base a los resultados de esta investigación, se observa un incremento significativo en el modulo de rotura de las vigas ensayadas en comparación al concreto convencional evidenciando que con la adición de 0.75% de fibras se aumentó en 15% en la resistencia a flexión respecto al concreto sin fibras.

Por otro lado, se infiere que con altas proporciones de fibras se tuvo un decremento en la trabajabilidad y en el revenimiento de la mezcla, las cuales fueron cercanas a cero para la mezcla de 1% de contenido de fibras de acero. También, se demuestra que el porcentaje de fibra de acero con mejor comportamiento es la de 0.75% obteniendo mayor resistencia a la compresión y a la flexión sin que se vea afectada la trabajabilidad y la consistencia. Por último, se documenta que la adición de fibras de acero al concreto es una alternativa viable para uso en pavimentos rígidos con bajo volumen de tránsito para vías terciarias en el Valle de Sibundoy.

Introducción

Actualmente, la industria de la construcción enfrenta retos para adoptar prácticas más sostenibles con el medio ambiente, tanto en la gestión de recursos como en la reducción del impacto ambiental de sus procesos. Según Mehta y Monteiro (2014) “Uno de los materiales con mayor presencia en esta industria es el concreto, cuya producción y uso generan importantes emisiones de CO₂ y un consumo intensivo de materias primas” (cap. 1). En este contexto, es de muy importante encontrar alternativas para desarrollar concretos sostenibles e innovadores, como es el caso de esta investigación donde se adiciona fibras de acero a un concreto reforzado, realización estas fibras provenientes de la actividad agrícola de la región es estudio.

De la misma manera, se plantea que la adición de fibras de acero reutilizadas no solo ayuda a mitigar los impactos ambientales asociados a disposición inadecuadas de residuos, sino que también como lo menciona ACI Committee (2014) “mejora las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la tracción, la tenacidad y el comportamiento post-fisuración” (p. 14). De este modo, el desarrollo de infraestructuras sostenibles como es caso de pavimentos rígidos se ve en beneficio gracias a los factores anteriormente enunciados y se traducen en mayor durabilidad y menor costo de mantenimiento.

Ahora bien, la presente investigación se enfoca en evaluar el comportamiento de un concreto sustentable de $f'c = 3000$ psi con la reutilización de fibras de acero para uso en pavimento rígido, con énfasis en su aplicación en el Valle de Sibundoy, ubicado en el departamento del Putumayo, Colombia, donde se llevó a cabo pruebas experimentales en ensayos a compresión y flexión con el fin de cuantificar como la adición de diferentes porcentajes del material reutilizable afecta los esfuerzos inducidos bajo estas cargas. Los resultados obtenidos proporcionaron información importante en cuanto al uso de fibras de acero recicladas de la actividad agrícola de frijol en el concreto.

Planteamiento del problema

En los últimos años, América Latina se ha convertido en una de las regiones con más afectación en su medio ambiente, resultado de una variedad de factores, como los cambios en el suelo, la sobreexplotación de materiales, el cambio climático y la contaminación. Esto ha obligado a la región a buscar soluciones sostenibles que promuevan la salud del planeta. Por otro lado, Cambio climático (2023) afirma lo siguiente:

Una de las problemáticas más grandes a las que se encuentra expuesto el planeta tierra es el avance excesivo de emisiones generadas por gases de efecto invernadero (GEI) que actúan de forma parecida al cristal de un invernadero, lo que provoca que se retenga el calor del sol y se impida el escape al espacio, provocando de esa manera el calentamiento global.

Al respecto, es importante recalcar los gases fluorados que hacen parte de los GEI y se clasifican como el tipo más persistente y potente, siendo emitidos por actividades antrópicas como la producción de metales, específicamente la del alambre galvanizado, lo que provoca un efecto miles de veces mayor que el CO₂. Además, “La extracción del mineral de hierro, complementada con la utilización de carbón o gas natural para lograr el respectivo procedimiento y fusión, provoca gran cantidad de estas emisiones”(El impacto ambiental del alambre de acero galvanizado, s. f.).

Asimismo, la organización de naciones unidas (ONU) y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) son entidades globales que plantean objetivos a un periodo de tiempo corto, con el fin de alcanzar el bienestar y salud de entorno biótico y abiótico garantizando una supervivencia segura para todas las generaciones presentes y futuras. Por tal motivo, se ha venido incrementando una consciencia en torno a los impactos ambientales que trae el desarrollo de las actividades humanas sustentables, dando lugar a grandes avances en el desarrollo de tecnologías y materiales destinados a reducir dichos impactos.

En este sentido, se habla de algunas alternativas sostenibles para reducir la huella de carbono y contribuir con el medio ambiente mediante la reutilización de materias primas no renovables desechadas por las industrias y el aprovechamiento de recursos renovables, con especificaciones de calidad en la implementación de producción de recursos que demanda la sociedad. Al respecto, Comunicación (comunicación, 2022) sustenta que:

Uno de los materiales más usados en la industria (después del agua) y que ocasionan daño al medio ambiente es el cemento, caracterizado por ser un componente clave en la producción de concreto y necesario para la construcción; genera entre un 6 y 7% de emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.

De manera similar, en Colombia el sector agrícola también enfrenta desafíos ambientales en cuanto al uso de materiales que afectan el medio ambiente. Este sector es un factor relevante e importante para los seres humanos, ya que de él se obtienen varios beneficios, como el suministro de alimentos, la sostenibilidad y seguridad alimentaria, generación de empleo y desarrollo económico.

Por tal razón, los cultivos agrícolas se han expandido y se han convertido en un fuerte socioeconómico en las regiones del país. Sin embargo, algunos procedimientos realizados para la producción de ellos no son amigables con el medio ambiente, pues materiales como el alambre galvanizado, usado como línea principal de tutorar y sobre la cual se colgarán las plantas, puede afectar adversamente el ecosistema una vez haya cumplido su función en el cultivo; ya que suele ser abandonado en el campo o se acumula en vertederos. Esto genera significativamente un aporte a la contaminación del suelo e incluso del agua, ya que los metales presentes en dicho alambre liberan sustancias químicas nocivas al encontrarse en contacto con el medio natural por un tiempo significativo constante.

En función de lo anteriormente mencionado, el Valle de Sibundoy es caracterizado por su

organización económica enfocado en la agricultura y con una cosmovisión relacionada con el mundo de las plantas vegetales, valora el abastecimiento en suelos fértiles y aprovecha dicha disposición. Siendo así, uno de los valles más conocidos por sus cultivos como el frijol (*Phaseolus vulgaris*), la arveja y la uchuva. No obstante, se enfrenta a desafíos pertinentes en cuanto a la sostenibilidad ambiental, pues el uso de alambre galvanizado interfiere con la regeneración natural del suelo y libera metales tóxicos debido a la presencia continua de lluvia, afectando no solo la calidad del suelo, sino también el hábitat natural de la flora y la fauna.

Por otro lado, las cifras exactas de producción de frijol en el Valle de Sibundoy son limitadas; razón por la cual los datos con los que se cuenta son aproximados, aunque la Cooperativa de Agricultores y Cultivadores de Frijol del Putumayo (Coofrimayo) brindan grandes estimaciones.

Finalmente, en relación se ha propuesto la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál será el comportamiento del concreto con fibras de acero como refuerzo sustentable al someterlo a un ensayo de comprensión y flexión para pavimentos rígidos?

Justificación

Conforme crece la población y se expande la infraestructura urbana se requiere de aspectos fundamentales para el desarrollo de la sociedad como la sostenibilidad y la economía circular, así mismo, se busca estrategias que solucionen la problemática del calentamiento global.

Por consiguiente, la predominante actividad agrícola, fuente principal de economía para la población en el Valle de Sibundoy genera desechos, por lo cual, se requiere que se aprovechen sus residuos promoviendo soluciones que fortalezcan el sector urbano, su infraestructura vial y protejan el medio ambiente, a través de implementación de fibras de acero reutilizadas de cultivos como un aditivo para el concreto usado en pavimentos rígidos. Esta práctica promueve una economía circular, donde los desechos se transforman en recursos valiosos, contribuyendo a la sostenibilidad e innovación del sector agrícola y de la construcción.

Ahora bien, desde el punto de vista técnico, las fibras de acero mejoran las propiedades del concreto, aumentando su resistencia a la tracción. Desde esta perspectiva Shah, Weiis y Yang Silva (como se citó en SILVA, 2022, parr.1), afirman que “Las fibras no alteran considerablemente la contracción libre de concreto y, si son empleadas en cantidades adecuadas, pueden aumentar la resistencia al agrietamiento y disminuir la abertura de las fisuras”. Esto es importante en pavimentos rígidos, donde las condiciones climáticas y el tráfico vehicular pueden comprometer la durabilidad de las vías.

Asimismo, este estudio promueve la investigación y la formación de profesionales en el uso de materiales alternativos. Teniendo en cuenta que el sector con mayor crecimiento en Colombia es el de la construcción y que toda su actividad productiva genera residuos, surge la necesidad evaluar la resistencia del concreto con la reutilización de fibras de acero de la actividad agrícola que se desarrolla en el Valle de Sibundoy, convirtiéndose un material investigativo que permita contemplar nuevas acciones sostenibles.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el comportamiento de un concreto sustentable con la reutilización de fibras de acero para uso en pavimento rígido

Objetivos Específicos

- Caracterizar los agregados pétreos cumpliendo con las especificaciones mínimas de acuerdo a la normatividad INVIAS.
- Dosificar una mezcla de concreto $f'c = 3000$ psi considerando la adición de fibras acero calibre 16 con diferentes porcentajes (0.50%, 0.75%, 1.00%) incorporados a especímenes de prueba.
- Realizar ensayos de calidad al concreto en estado fresco y endurecido: ensayo de revenimiento, resistencia a la compresión y resistencia a flexión.
- Realizar la comparación de resultados obtenidos en los ensayos al concreto sustentable frente a un concreto convencional.

Marco Referencial

Antecedentes

En la antigüedad, los primeros caminos fueron denominados “caminos del deseo”, ya que eran utilizados tanto por humanos como por animales; además, estos caminos dieron paso a la creación de la rueda. Sin embargo, no eran caminos adecuados ni cómodos. Por esta razón, en el siglo III, durante la dinastía china, se construyó una amplia red de caminos por todo el país. Fue entonces, a partir del año 312 a.C., cuando los romanos jugaron un papel importante en la modificación de caminos, ya que edificaron una amplia red de carreteras, conocidas como las famosas vías romanas. Estas vías solían estar conformadas por varias capas de materiales de distinto tamaño y solo presentaban enlosado, además de contar con un sistema de drenaje simple. (Mayta Posadas, 2015)

Posteriormente, “Durante los siglos XV y XVI los caminos fueron rehabilitados, perfeccionados en su magnitud por los Incas con una base de infraestructura estatal muy bien organizada y planificada” (Mayta Posadas, 2015). Al respecto, Mayta (2015) sustenta que:

Durante las tres primeras décadas del siglo XIX, dos ingenieros británicos, Thomas Telford y John Loudon McAdam, perfeccionaron los métodos y técnicas de construcción de carreteras. En este contexto, Telford propuso usar grava o piedra rota de 1 pulgada, con capa de base de 7 pulgadas en la línea central, teniendo en cuenta la zanja de drenaje paralela. Por otro lado, McAdam también propuso el uso de grava o piedra rota de 1 pulgada; sin embargo, sugirió una capa de base de 8 pulgadas en la línea central, considerando igualmente la zanja de drenaje paralela. (p.6)

Ya en el siglo XX, debido al aumento del tráfico de automóviles, los viejos métodos de pavimentación fueron desplazados. En este contexto, se empezó a utilizar el alquitrán de hulla, así

como el alquitrán y aceites, en primer lugar, como aglomerantes de superficie y, en segundo lugar, como soportes de penetración en el pavimento macadam. Así, el pavimento bituminoso consistía en tallas niveladas de piedra quebrada que se recubrían, antes de colocarlas, con un material bituminoso conocido como asfalto, o también con alquitrán, y se apisonaban después con rodillos pesados. (Mayta Posadas, 2015, pág. 7)

Marco Teórico

Concretos

En la actualidad el concreto es uno de los materiales más utilizado en la construcción a nivel mundial debido a su durabilidad, trabajabilidad y fácil disposición de sus compuestos, como indica Parra y Bautista (2010) “el concreto es un material más usado en la construcción por su gran versatilidad que permite usarlo en cualquier tipo de proyecto desde edificios hasta carreteras gracias a su bajo costo en comparación a otros materiales”. Por otro lado, el concreto sigue elaborándose hoy con las mismas materias primas básicas (cemento, agregados y agua); sin embargo nuevos componentes como los aditivos químicos o físicos, las fibras son cada vez más usados permitiendo el desarrollo de nuevos tipos de mezclas que presentan mejores características que el concreto tradicional según dicen las investigaciones y patentes realizadas, al igual que permiten la fabricación de un material más durable, económico y que busca contribuir con las exigencias actuales de sostenibilidad.

De esta manera Abanto (2017) menciona que el concreto es un material muy moldeable cuando recién se ha elaborado y aún no haya iniciado su proceso de endurecimiento, lo que permite adoptar distintas formas. El concreto con forme va endureciendo este incrementa su resistencia a la compresión y por ende mejora las propiedades de adherencia con otros componentes como las fibras de acero. Ahora bien, el concreto desempeña propiedades tales como: manejabilidad,

consistencia y plasticidad que depende de las características que se presenten en estado fresco (plástico), de tal modo se verán reflejadas en las propiedades en estado endurecido.

Hoy en día es de vital importancia conocer la capacidad de resistencia a la compresión del concreto mediante pruebas mecánicas que evalúen esta resistencia mediante muestras y especímenes que serán fallados en laboratorio. Según Guzmán (2001):

El ensayo universalmente más usado para ejecutar pruebas de resistencia mecánica a la compresión simple, es el ensayo de probetas cilíndricas, las cuales se funden en moldes especiales de hierro que tienen un diámetro de 150 mm y una altura de 300 mm, los procedimientos de este ensayo se encuentran en las normas NTC 550 Y 673. (p. 138)

Clasificación de los Concretos

El concreto se clasifica de varias formas, la más usada es según sus propiedades y características, en esta categoría se puede encontrar:

- Concreto convencional
- Concreto ciclópeo conformado por grandes piedras y cemento

Según su resistencia a la compresión, en Colombia es muy usual el concreto de 21 MPa, en la Tabla 1 se muestra la clasificación de los concretos según su resistencia.

Tabla 1

Clasificación de los concretos según resistencia a la compresión.

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

Nota. La tabla muestra la resistencia a la compresión (f'_c) del concreto en diferentes

unidades estándar. Fuente: Reyes y Rodríguez (2010).

Otra clasificación muy importante es según el sistema de colocación y compactación, aquí se encuentran:

- Concreto compactado con rodillo (CCR) de consistencia seca, usado en presas de gravedad y pavimentos.
- Concreto lanzado aplicado con chorros a presión muy útil cuando el uso de formaletas es restringido o muy difícil, se emplea para estabilizar taludes y en reparaciones de concretos ya deteriorados.
- Concreto de bombeo muy versátil y de fácil aplicación actualmente es uno de los más demandados en la industria.

Es por ello, que Colombia la Norma Técnica Colombiana 121 (NTC 121) actualizada en el año 2014 estandariza los tipos de cemento hidráulico clasificados según su uso, Tipo UG – Uso General. Útil para pavimentos, pisos, edificios, estructuras de concreto reforzado, puentes, etc. donde no exista una exposición a agentes agresivos.

Propiedades del Concreto en Estado Fresco

Una de las pruebas a realizar en estado fresco de acuerdo a las especificaciones de la norma I.N.V.E – 404 es el asentamiento del concreto hidráulico (Slump), donde una mezcla de concreto fresco se coloca y consolida por varillado en un molde tronco-cónico. Al levantar el molde el cono se desploma. Se mide la distancia vertical entre las posiciones inicial y final de la superficie superior del concreto en su parte central. Este valor se denomina asentamiento o revenimiento (Slump) (INVIAS, 2013).

Trabajabilidad.

De acuerdo con Abanto (2017), la trabajabilidad del concreto se realiza en su estado

fresco ya que en dicho estado se puede moldear, transportar y vaciar sin perder mucho su homogeneidad. Los aspectos que influyen esta propiedad del concreto son:

- La cantidad de agua en la preparación, a mayor agua es más trabajable el concreto.
- Cuanta más cantidad de agregado fino, el concreto es más trabajable.
- La aplicación de un aditivo plastificante en la mezcla del concreto aumentara su trabajabilidad.
- La forma y el tamaño del encofrado de las estructuras requeridas y también del proceso de compactación.

No hay ningún ensayo que permita medir la trabajabilidad, pero la trabajabilidad y la consistencia son propiedades que están muy relacionadas lo que esto conlleva a la consistencia ser un indicador de la trabajabilidad (Abanto, 2017).

Consistencia.

Un componente muy importante de la trabajabilidad es la consistencia, también llamada fluidez de la mezcla. La consistencia de una mezcla de concreto es un término general que se refiere al carácter de la mezcla con respecto a su grado de fluidez; y abarca todos los grados de fluidez, desde la más seca hasta la más fluida de todas las mezclas posibles.

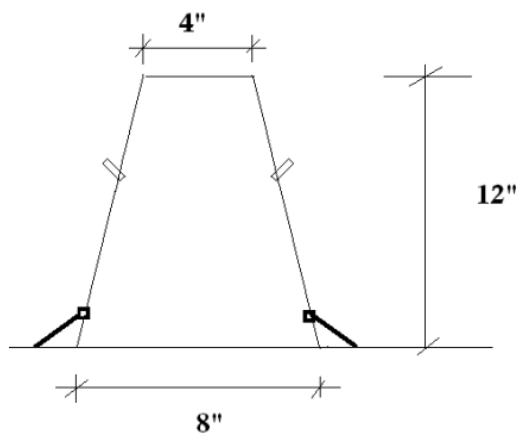
En general, existen varios tipos de consistencia:

- Consistencia seca: aquella en la cual la cantidad de agua es pequeña y simplemente la suficiente para mantener las partículas de cemento y agregados juntas.
- Consistencia dura o rígida: posee un poco más de agua que la del tipo seca.
- Consistencia húmeda. La cantidad de agua es bastante apreciable y se trata de un concreto fluido.

La consistencia se puede medir por medio de la prueba de revenimiento (norma ASTM C143). Para realizar esta prueba se utiliza un molde en forma de cono truncado de 12'' de altura, con un diámetro inferior en su base de 8'', y en la parte superior un diámetro de 4'', tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Molde para prueba de revenimiento



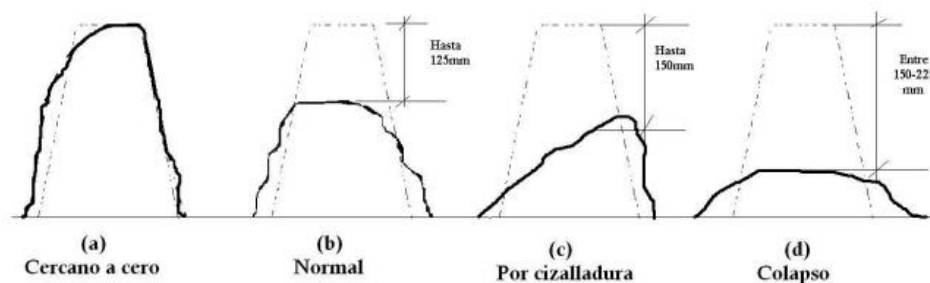
Nota. La figura muestra las dimensiones requeridas del molde que se utiliza en la prueba de revenimiento. Fuente: Universidad Centroamericana (S. f).

Revenimiento.

Se llama revenimiento a la diferencia de altura que hay entre la parte superior del molde y la parte superior de la mezcla fresca cuando ésta se ha asentado después de retirar el molde. Esta distancia se expresa generalmente en cm y varía según la fluidez del concreto (Cañas, 2017). En la Figura 2 se muestra las formas que adopta la mezcla en la prueba del Slump.

Figura 2

Muestra de la forma de revenimiento en una mezcla de concreto.



Nota. La figura muestra las formas que adopta la mezcla de concreto en la prueba de revenimiento. Fuente: Universidad Centroamericana (2014).

Por lo tanto, los resultados de revenimiento se pueden deducir mediante los siguientes criterios:

- Revenimiento cercano a cero: Puede ser el resultado del concreto que tiene todos los requisitos de trabajabilidad, pero con poco contenido de agua, o se trata de un concreto hecho con agregados gruesos que permiten que el agua drene fuera de la mezcla de concreto sin que esto produzca algún cambio de volumen.
- Revenimiento normal: Se trata de concreto con buena o excelente trabajabilidad. El revenimiento usado para concreto estructural se sitúa entre 2 y 7 pulgadas.
- Revenimiento por cizalladura o cortante: Indica que el concreto carece de plasticidad y cohesión. Un resultado satisfactorio de esta prueba es cuestionable.
- Colapso en el revenimiento: Indica un concreto obtenido con concretos pobres, hechos con agregados gruesos en exceso o mezclas extremadamente húmedas. En este tipo de concretos, el mortero tiende a salir del concreto, quedando el material grueso en el centro del cono. Hay segregación.

Propiedades del Concreto en Estado Endurecido

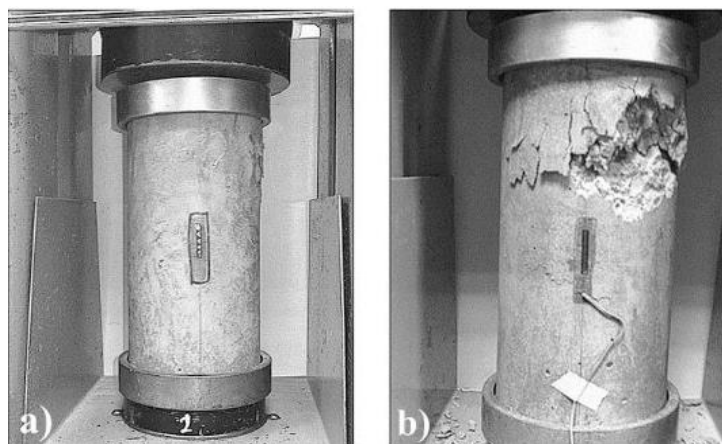
Resistencia a la Compresión (RC).

Al respecto es importante plantear, que la gran mayoría de estructuras se diseñan suponiendo que deben resistir este tipo de esfuerzos; razón por la cual este es un aspecto de gran relevancia, en razón a que sirve como criterio de calidad del concreto. Por lo cual, el espécimen de concreto es cargado hasta su rotura, por medio de una prensa de características y especificaciones definidas, con una velocidad controlada según lo establecido en la norma NTC-673.

De acuerdo con Abanto (2017), realizar fracturaciones de probetas de concreto de forma cilíndrica de diámetro de 15 cm y una longitud de 30 cm, se calcula de la carga máxima de fractura dividida entre el área de la sección de la probeta; es el proceso para el ensayo de RC como se muestra en la Figura 3. El resultado es usado para precisar más que todo si fue diseñada con una resistencia superior a la especificada. Para que la RC del concreto se considere optima y satisfactoria se deben de realizar por lo menos 3 ensayos que sean iguales o superiores a la resistencia especificada en el diseño de mezcla de concreto.

Figura 3

Desempeño en compresión de mezcla de concreto.



Nota. La figura muestra la configuración ensayo de Resistencia a Compresión con deformímetros a) espécimen preparado, b) espécimen fallado. Fuente: J. Cárdenas (2024).

Resistencia a la Flexión.

Es una prueba importante en las estructuras de concreto simple sometidos a este tipo de esfuerzos, como es el caso de las losas de los pavimentos. Para este ensayo se elaboran vigas de concreto de 15x15 cm de sección por una longitud de 60 cm o una luz mínima igual a tres veces su espesor, las cuales son cargadas en su tercio medio o en la parte central de la luz hasta la rotura. La resistencia a la flexión se puede medir de dos formas. Por medio de ensayo de RC se mide así:

$$Mr = a\sqrt{f'c}$$

Donde:

Mr= módulo de rotura en Kg/cm²

a= es un factor con un valor comprendido entre 1.99 y 3.18

f'c= es la resistencia a compresión simple del concreto hidráulico

La resistencia a la flexión también se mide por medio del módulo de rotura, dependiendo del lugar donde ocurra la falla, el módulo se determina utilizando una de las siguientes fórmulas (Concreto, 2000):

Cuando la falla ocurre dentro del tercio medio de su luz

$$Mr = \frac{PL}{bd^2}$$

Cuando la falla ocurre fuera del tercio medio de su luz en no más del 5% de la luz

$$Mr = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Donde:

M_r = módulo de rotura en Kg/cm^2

P = carga máxima soportada por la viga en Kg.

L = luz entre apoyos en cm

b = ancho de la viga en cm

d = altura de la viga en cm

a = distancia de la falla al apoyo más cercano en cm.

Incorporación de Fibras de Acero Reutilizadas en el Concreto

Fibras Metálicas

Uno de los materiales más usados durante generaciones para que las estructuras tuvieran mayor resistencia eran las fibras, por esta razón, las civilizaciones antiguas mezclaron fibras naturales como pasto, fique, juncia o pelo de animal con adobe o barro; los materiales reducen su tendencia a agrietarse y mejoran la resistencia del material a la tensión. Las fibras son partículas de pequeña dimensión y sección transversal que, añadidas al hormigón, deben mejorar determinadas propiedades para que al distribuirse en el hormigón mejoren el resultado esperado. *(Análisis del comportamiento a cortante de concretos de 21mpa y 44mpa reforzado con fibras de acero, 2017)*

Las fibras de acero para refuerzo se hacen presentes desde hace más de 4000 años. En la antigua Mesopotamia y Egipto, se hacía uso de fibras naturales y paja con el fin de reforzar ladrillos y yeso y lograr la mejora en su resistencia. Las fibras sintéticas hacen presencia a partir de 1935. Hay evidencia científica de la utilización del concreto con fibras de acero WinRAR FF3 y WinRAR FF4 (80/60), empleado en losas para pavimento rígido. Se ha determinado que el hormigón reforzado con fibras se comporta de mejor manera mecánicamente que el hormigón no

reforzado, ofreciendo mejoras en la resistencia de hasta aproximadamente un 30% dando como resultado una mayor energía de rotura. («Historias de fibra para hormigón (opus caementicium)», 2012)

La norma de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) y en particular la ASTM A 820 clasifica a las fibras de acero en cuatro diferentes categorías como se muestra en la Figura 4 y que dependen del proceso de elaboración:

- Trefilado en frío
- Cortado de hojas de metal
- Fundido y
- Otros

El concreto reforzado con fibras se desempeña de mejor manera ante esfuerzos cortantes, de tensión y flexión. Por lo tanto, el uso de fibras en el concreto puede garantizar un mejor desempeño en términos de esfuerzo-deformación respecto a las demandas a las que será sometido. (Campoy-Bencomo et al., 2021)

Figura 4

Tipo de fibras empleadas en experiencias.



Fibra de acero
ondulada



Fibras de acero con
ganchos en los extremos



Fibra sintética
trefilada



Fibra sintética
ondulada

Nota: La figura muestra el tipo de fibras. Fuente: Análisis esfuerzo-deformación de concreto reforzado con fibras metálicas y polímeros (2021)

Propiedades de las Fibras Metálicas

El desempeño mecánico del concreto reforzado de fibras (FRC) depende de algunos factores importantes como la resistencia del concreto, el tamaño del espécimen a ensayar, el método de preparación, el tamaño de los agregados y las características de la fibra

Las propiedades del tipo de material usado para la fabricación de las fibras, tales como la resistencia, rigidez y el coeficiente de Poisson, son muy importantes. La geometría de la fibra puede ser lineal con ganchos en los extremos sus propiedades se muestran en la Tabla 2, onduladas, rizadas, entre otros. Además, las fibras también cuentan con propiedades de interfaz como adhesión, fricción y unión mecánica; esta última característica depende de su textura superficial, geometría y relación de aspecto (longitud/diámetro).(Campoy-Bencomo et al., 2021)

Tabla 2

Propiedades de fibras DRAMIX 3D

	Dramix 3D 80/60BG	Dramix 4D 55/60BG
Longitud	60 mm	60 mm
Diámetro	0.75 mm	1.05 mm
Relación de esbeltez	80	55
Resistencia a la tracción	1.225 N/mm ²	1.500 N/mm ²
Densidad	7.9 ton/m ³	
Dosificación mínima	10 kg/m ³	20 kg/m ³
Red de fibra	4,584 fibras/kg	2,339 fibras/kg

Nota: La tabla muestra las propiedades de fibras con ganchos en los extremos. Fuente. Análisis esfuerzo-deformación de concreto reforzado con fibras metálicas y polímeros (2021)

Ventajas del uso FRC.

El uso de fibras en los concretos conlleva diversas ventajas mecánicas además de contribuir con la reducción de residuos si estas son recicladas por otro tanto, Mello (2014) indica que el concreto reforzado con fibra de acero es el que tiene un mejor desempeño comparado con el concreto reforzado con carbono, celulosa y PET. Además, Burrati (2010) indaga que las fibras de acero aportan estructuralmente a la mezcla igual que las de sintéticos, mismas que reducen el agrietamiento por contracción plástica que sufre el concreto en el tiempo de fraguado. Sin embargo, Sing (2004) reportaron que estas tienen como desventaja una baja capacidad de adhesión con el concreto.

De acuerdo con Zollo (1997), el porcentaje de fibra, respecto al volumen de la mezcla de concreto, puede variar de 0.1 a 1 %, los cuales son porcentajes bajos, 1 a 3 % siendo moderados, y 3 a 12 %, los cuales serían porcentajes altos. Sin embargo, en la literatura se han reportado valores desde 0.25 a 2.0 %, como se muestra en la Tabla 3. Los resultados resumidos en la tabla 3 demuestran que las fibras de poliéster y de carbón son las de mejor desempeño, mientras que las fibras de celulosa y PET (polietileno tereftalato) disminuyeron el *MR* (Módulo de ruptura) en 9.56 % y 18.85 %, respectivamente.

Tabla 3

Propiedades de fibras. MR=Módulo de Rotura del concreto y $f'c$ =Resistencia a la compresión

Autor	Año	Relación agua/cemento	$f'c$ Concreto <i>MR</i> concreto		Tipo de Fibra	Porcentaje de Fibra
			MPa	MPa		% de volumen
Kim <i>et al.</i>	2008	0.35	56.00	-	Acero	0.40
						1.20
					Polietileno	0.40
						1.20
					Alcohol de polivinilo	0.40

Autor	Año	Relación agua/cemento	$f'c$ Concreto MR concreto		Tipo de Fibra	Porcentaje de Fibra
			MPa	MPa		% de volumen
Mohammadi <i>et al.</i>	2009	0.35	57.82	5.35	Acero	1.00
						1.50
						2.00
Buratti <i>et al.</i>	2010	0.50	-	4.30	Acero	0.26
						0.45
					Macrosintético	0.22
						0.53
						0.37
Rajkumar y Vasumathi	2012 -		55.00	-	Macrosintético	0.74
						0.30
						0.50
						0.70
Yang <i>et al.</i>	2012	0.29	90.00	5.62	Acero	1.00
					Macrosintético	2.00
Köksal <i>et al.</i>	2013	0.35	71.20	4.40	Acero	0.33
						0.67
						1.00
Mello <i>et al.</i>	2014	0.50	42.90	6.46	Acero	0.50
Bolat <i>et al.</i>	2014	0.45	31.07	-	Poliéster	0.43
					Polipropileno	0.43
					Acero	0.43
Sinha <i>et al.</i>	2014	0.45	40.30	5.04	Acero	0.50
Krishna y Rao	2014	0.55	28.52	4.67	Poliéster	0.10
						0.20
						0.30
						0.40
Shinde <i>et al.</i>	2015	0.45	33.28	2.29	Híbrido: Acero/polipropileno	1 % (0 / 100)
						1 % (25 / 75)
						1 % (50 / 50)
						1 % (75 / 25)
						1 % (100 / 0)
Yazdanbakhsh <i>et al.</i>	2015	0.47	41.70	5.60	Macrosintético	0.50

Nota: La tabla indica el desempeño de MR y $f'c$ de concreto en investigaciones realizadas con diferentes tipos de fibras. Fuente. Análisis esfuerzo-deformación de concreto reforzado con fibras metálicas y polímeros (2021)

Pavimento Rígido

El pavimento rígido está construido con hormigón de cemento portland y materiales granulares, integrado por una capa (losa) de concreto de cemento portland que se apoya en una capa de base, constituida por grava; esta capa descansa en una capa de suelo compactado, llamada subrasante. (Giordani & Leone, 2018, p.6). Teniendo en cuenta lo anterior (Giordani & Leone, 2018) sugieren que la "La resistencia estructural depende principalmente de la losa de concreto" (p.4), por lo tanto, la resistencia y espesor de la losa son necesarias para conocer el rendimiento y durabilidad del pavimento rígido.

Corte Transversal

Un pavimento rígido se compone por diferentes estratos de material de suelo y materiales artificiales como lo es la capa de concreto así pues, "Los pavimentos rígidos están constituidos por una losa de concreto con riego de impregnación de 10 a 18 cm, una base de 10 a 15 cm y una subrasante de 20 a 50 cm" (Giordani & Leone, 2018, p.4)

Fisuras

"Los pavimentos rígidos cuentan con tres tipos de fisuras que se desarrollan de manera natural. Primero, se presenta la fisuración inicial (transversal). Luego, surge la fisuración intermedia (transversal). Finalmente, aparece la fisuración longitudinal, desarrollada a lo largo de la losa"(Giordani & Leone, 2018, p.4)

Componentes Principales del Sistema

Los pavimentos rígidos están compuestos por varios elementos importantes que permiten el adecuado funcionamiento y durabilidad. En primer lugar, las juntas determinan las dimensiones de las losas del pavimento y permiten controlar la formación de fisuras intermedias tanto a edad temprana como durante su vida en servicio. Además, los pasadores, que son las barras de acero

lisas colocadas en las juntas transversales para transferir cargas sin restringir el movimiento horizontal de las losas. Por otro lado, las barras de unión se colocan en las juntas longitudinales para mantener ancladas las mismas garantizando de esta manera que estas provean una transferencia de carga. Finalmente, los pavimentos rígidos incluyen juntas de dilatación, que permiten la contracción de las losas debido a cambios de temperatura y humedad. (Giordani & Leone, 2017, pp 4-5).

Diseño de Mezclas para Pavimentos Rígidos

El diseño se reduce a la combinación correcta de cemento agregado agua y aditivos para lograr la trabajabilidad y la resistencia deseada esto se puede conseguir a través de los principios técnicos o por principios empíricos, donde la interacción de los componentes determina una cualidad del concreto, por ejemplo:

- Relación agregada/cemento: Determina el costo.
- Cemento/agua: Varían resistencia y durabilidad.
- Arena/grava: Trabajabilidad.

Existen variedad de procedimientos para determinar la proporcionalidad de estos materiales estos métodos son:

- Método de peso.
- Método de volúmenes absolutos.
- Uso de tablas de dosificación.

Marco Conceptual

A continuación, se presenta los conceptos más importantes de la presente investigación.

Concreto Sustentable

Se constituye por agregados de materiales reciclados, los cuales sustituyen parcial o totalmente los agregados convencionales. Estos materiales son procedentes de residuos o de demoliciones que se someten a procesos de cribado, triturado y tratamiento para fomentar parte del nuevo concreto.

Concreto Reforzado con Fibras y Polímeros (FRC)

Según Campoy (2021) “Los concretos reforzados con fibras (FRC por sus siglas en inglés) son utilizados en pavimentos y losas generalmente coladas sobre el suelo, incluyendo aeropuertos, autopistas, tableros de puentes y pisos industriales”

En este sentido, un FRC está compuesto por cemento Portland, agua, agregado fino-grueso y fibra, que puede estar compuesta por vidrio sintético, acero o incluso materiales naturales.

Fibra de Alambre Galvanizado

Es un tipo de alambre con bajo contenido de carbono, cuya principal cualidad es su uniformidad en la dimensión y su recubrimiento de Zinc, el cual lo convierte en material galvanizado de alta calidad. Gracias a su resistencia y durabilidad, es usado con frecuencia en el sector de construcción destinado a la fabricación de malla ciclónica y otros usos generales. (*Ficha Técnica Alambre Galvanizado*, 2012)

Consistencia

La consistencia del suelo es una propiedad física que define la resistencia del suelo a ser deformado por las fuerzas que se aplican sobre él. Esta propiedad del suelo lo definen el contenido de humedad, materia orgánica del suelo y tipos de arcilla. La estabilidad estructural también es un

componente importante de la resistencia del suelo. Tradicionalmente la consistencia del suelo se ha manejado como una propiedad mecánica del suelo y ha tenido mucha importancia y aplicación en la ingeniería civil (Mejia, 2002)

Concreto

El hormigón o concreto es un material de construcción por excelencia que está compuesto por la mezcla de cemento, piedra, arena y aditivos, siendo este uno de los materiales más viables en relación con cualquier construcción, ya que posee una buena relación calidad – precio. Sus características principales son su gran resistencia ante movimientos sísmicos, su valor económico, su fácil uso y sobre todo su durabilidad. La durabilidad es una propiedad única del hormigón que se crea de la piedra y se convierte en piedra, en cambio la madera se quema y el acero se oxida; pero el hormigón continúa permaneciendo (Paez, 1986)

Resistencia

La capacidad que posee el concreto para soportar por lo general esfuerzos de compresión y tensión sin perder la integridad de su estructura generalmente se mide a los 28 días en el concreto endurecido o fraguado.

Sustentabilidad

El concepto sostenible surge con la necesidad de que las actividades humanas se enfoquen en equilibrio con el medio ambiente, la sociedad y la economía, es decir un desarrollo más sostenible. La construcción es un sector que genera grandes impactos en los recursos, los residuos, las emisiones, la biodiversidad, el paisaje, las necesidades sociales, la integración, el desarrollo económico del entorno, etc. De esta manera, la ingeniería civil busca incorporar las actividades de construcción al equilibrio ambiental, social y económico, bajo un contexto aplicativo (Fernandez, 2010).

Agregados del concreto

El concreto es una mezcla conformada por varios compuestos inertes y que al combinarse con el cemento y el agua se crea el concreto, al respecto, Abanto (2017), señala que el 75 por ciento del volumen del concreto lo conforman los agregados, la NTC 174 establece los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos, estos deben de estar libres de impurezas, ya que en la elaboración del concreto no tendrá una buena combinación con la pasta de cemento. Por lo general provienen de la roca natural triturada extraída de canteras habitualmente en forma de bloques, losetas o fragmentos de distintos tamaños, aunque existen otros que son procesados e industrializados por el ser humano. Los agregados pétreos se dividen en:

Respecto al agregado fino “Se considera como tal, a la fracción que pase el tamiz de 4,75 mm (nro. 4). Debe provenir de arenas naturales o de la trituración de rocas, gravas, escorias siderúrgicas u otro producto que resulte adecuado” (INVIAS, 2022, pp. 630-2). Este agregado debe estar libre de contaminantes como arcillas, material orgánico, micas y sedimentos. Para que se considere como agregado fino, debe cumplir los límites granulométricos descritos en la NTC 174.

Respecto al agregado grueso “Se denomina agregado grueso la porción del agregado retenida en el tamiz de 4,75 mm (nro. 4). Dicho agregado debe estar compuesto de grava, grava triturada o roca triturada” (INVIAS, 2022, pp. 505-2). Para que se considere como agregado fino, debe cumplir los límites granulométricos descritos en la NTC 174.

Por último, el cemento según Abanto (2017), el componente principal del concreto es el cemento que conforma el 7 al 15 por ciento del volumen de la preparación. Este es un producto que se obtiene de la mezcla de minerales molidos formados por arcilla y piedra caliza, estos minerales son llevados a altas temperaturas en hornos de las plantas cementeras, el material que se somete a este proceso se le conoce como clinker que son diminutas partículas grisáceas; el clinker

enfriado y molido conforma el cemento portland.

Módulo de rotura

El concreto MR (módulo de ruptura) es una tecnología avanzada diseñada específicamente para resistir las tensiones provocadas por el tráfico vehicular en estructuras de pavimento. Este material se destaca por su resistencia a la flexión y sus ventajas significativas en comparación con los pavimentos de asfalto convencionales («Concreto MR (Módulo de Ruptura)», 2011, parr 1).

Según la normativa del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), específicamente la INV E-414-13, el módulo de rotura del concreto es un parámetro clave en el diseño de pavimentos rígidos. Este valor se determina mediante un ensayo de flexión en una viga simple apoyada, cargada en los tercios de su luz libre, y se expresa en kg/cm^2 o MPa. Se recomienda que la resistencia mínima a la flexión del concreto sea de:

- 40 kg/cm^2 para volúmenes de tránsito inferiores a 5 millones de ejes equivalentes (EE).
- 42 kg/cm^2 para volúmenes de tránsito entre 5 y 15 millones de EE.
- 45 kg/cm^2 para volúmenes de tránsito superiores a 15 millones de EE.

Estudio de tráfico

El estudio del tráfico es uno de los parámetros principales al momento de diseñar un pavimento rígido. El estudio da inicio cuando se determinan los tipos de vehículos que suelen frecuentar por una vía específica, teniendo en cuenta que estos podrían cambiar en el tiempo. Otro parámetro importante es la determinación de las cargas que estos vehículos transmiten a través de los ejes que se componen; Asimismo, otro parámetro importante a la hora de diseñar pavimentos rígidos es la determinación de las frecuencias con las que estas cargas se dan en el tiempo. Finalmente, un parámetro tan importante como los anteriores es la predicción del crecimiento de la demanda vehicular de la vía de estudio. Esto se puede hacer mediante el uso de modelos

probabilísticos bien calibrados (Toribio Huamani & Ugaz Arenas, 2021).

Trabajabilidad

Se entiende como el esfuerzo requerido para transportar, colocar, compactar y darle acabado al concreto en estado fresco. Suele evaluarse la trabajabilidad del concreto mediante la prueba de revenimiento, sin embargo, existen otras características no cuantitativas que se deben considerar.

La trabajabilidad del concreto normalmente está ligada a la fluidez o consistencia que se mide a través de la prueba de revenimiento. Por lo regular se considera que un concreto más fluido es más trabajable y uno con menos fluidez tiene menos trabajabilidad. Sin embargo, se debe considerar también la cohesión de la mezcla: un contenido de agua elevado puede presentar segregación (CEMEX, 2015).

ACI

“ACI 318 es un documento guía respetado en todo el mundo que cubre los requisitos mínimos para los materiales, el diseño y los detalles de los edificios de concreto estructural” (ASTM, 2019).

Agregado fino

“Se considera como tal, a la fracción que pase el tamiz de 4,75 mm (nro. 4). Debe provenir de arenas naturales o de la trituración de rocas, gravas, escorias siderúrgicas u otro producto que resulte adecuado” (INVIAS, 2022, pp. 630-2)

Agregado grueso

“Se denomina agregado grueso la porción del agregado retenida en el tamiz de 4,75 mm (nro. 4). Dicho agregado debe estar compuesto de grava, grava triturada o roca triturada” (INVIAS, 2022, pp. 505-2).

“American Society for Testing and Materials, lo que viene a decir, Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales” (Zoroquiain López, 2021)

Compresión

“La Resistencia a la Compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a carga axial” (Corcino Albornoz, 2007, p. 56).

NTC

“Corresponde a Norma Técnica Colombiana, utilizada por el Organismo Nacional de Normalización en la redacción de otras normas técnicas de carácter voluntario” (NTCGP, 2009, p. 1).

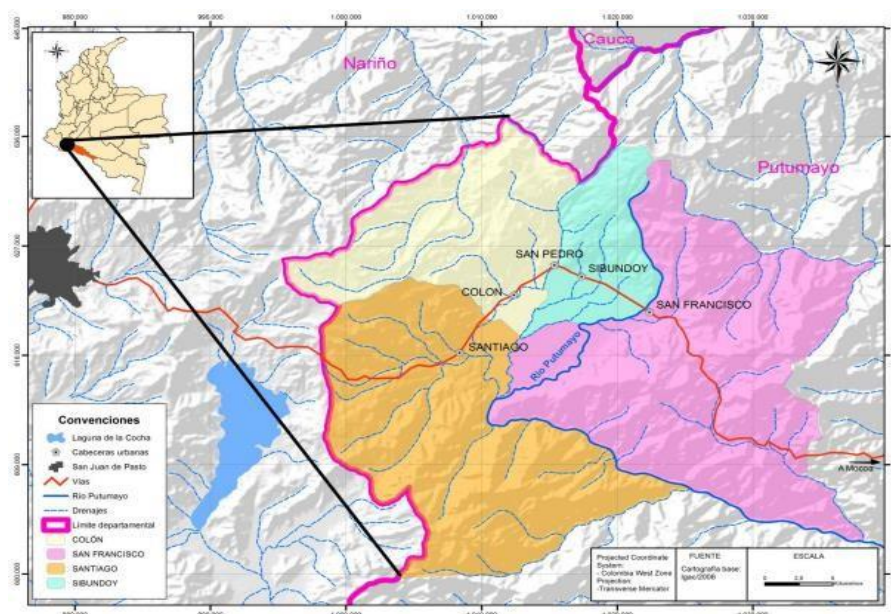
Marco contextual

Ubicación geográfica del valle de Sibundoy

La zona de estudio se encuentra ubicada al en el Valle de Sibundoy, departamento del Putumayo, con una elevación promedio de 2003 metros sobre el nivel del mar correspondiente a los municipios Santiago, Colon, Sibundoy y San Francisco que componen el valle, ver Figura 5. La ubicación del valle hace parte del inicio de piedemonte Amazónico, una de las 8 subregiones en que se divide la Amazonía colombiana, y uno de los territorios más biodiversos en pisos térmicos, fauna y flora del norte de Suramérica, con alrededor de 29 tipos diferentes de ecosistemas (Mora & Andrade, 2018).

Figura 5

Localización geográfica del valle de Sibundoy



Nota. La figura 5 muestra la localización y división geográfica del valle de Sibundoy. Fuente: (Mora & Andrade, 2018).

Las actividades predominantes a lo largo del valle de Sibundoy y que son la base de su economía son la ganadería y la agricultura debido a su ubicación geográfica, el valle cuenta con variedad de suelos con nutrientes suficientes para la producción agrícola como: cultivos de frijol, maíz, granadilla, entre otros, representan un gran desarrollo socioeconómico para muchas de estas familias.

El área cultivada de frijol en el Valle de Sibundoy alcanzó las 1.200 hectáreas para una producción de 2.750 toneladas que benefició a 600 familias indígenas y campesinas productoras. La producción se concentra en los meses de noviembre a febrero, puesto que la siembra y la cosecha coinciden con régimen bimodal de lluvia y sequia respectivamente (Centro nacional de producción más limpia, 2007).

Ahora bien, un estudio más reciente por parte del Ministerio de agricultura y desarrollo

rural (2021), menciona que, en el departamento del Putumayo, se produjeron en el año 2023, alrededor de 6.876 hectáreas de frijol, más, sin embargo, los valores con mayor rendimiento por hectárea en Colombia, se encuentran en el valle de Sibundoy, cuyas cifras alcanzan las 2,02 Toneladas por hectárea (Hernández & Zambrano, 2023).

Condiciones Meteorológicas

El valle de Sibundoy es analizado bajo la variación de las condiciones climáticas, a partir de la información suministrada por las estaciones meteorológicas monitoreadas por el IDEAM en el área de estudio, teniendo un registro de 20 años.

Precipitación(anual) = 1.715mm.

Presenta un comportamiento unimodal estacional, con una época de intensas lluvias que empieza desde el mes de abril hasta agosto y una época de baja pluviosidad en los meses de Octubre a Marzo; los datos más altos de precipitación se presentan en el mes de Junio, con 208 mm y 214 mm en promedio, respectivamente; los promedios más bajos se presentan entre los meses de octubre y enero, con 87,9 y 99 mm, en la estación la Primavera y Michoacán, respectivamente (Corpoamazonia, 2010).

Temperatura(mensual-anual) = 15.98 ° C

Las temperaturas más altas se presentan en los meses de noviembre a enero con 16,8 °C y las más bajas en los meses de Julio y agosto con 10,4 °C (Corpoamazonia, 2010).

Humedad Relativa (mensual multianual) = 81 %

Los mayores valores se presentan en los meses Abril, mayo y junio con 89.9%; y el menor valor en el mes de enero con 75,7%; el comportamiento de la temperatura en los meses de agosto y septiembre no muestran una clara relación con la humedad relativa, por ejemplo, en época con mayor temperatura entre octubre y febrero la humedad relativa es alta (Corpoamazonia, 2010).

De acuerdo al análisis de los promedios multianuales, en las últimas décadas se han presentado períodos de precipitaciones de gran intensidad con una frecuencia de eventos con alguna posibilidad de recurrencia de aproximadamente una década (Se han presentado períodos de precipitaciones con gran intensidad en los años de 1980, 1989 y 2000 (en 1980 con intensidad de 1857,8 mm, para el año 1989 con 4445,6 mm y en el año 2000 con 1951,9 mm); el análisis de tendencia en varios años, indica una frecuencia de eventos con alguna posibilidad de ocurrencia de aproximadamente una década) (Corpoamazonia, 2010). Estos eventos son potencialmente peligrosos por presentar periodos amplios de altas precipitaciones que desencadenan flujos de lodo y otros fenómenos naturales que ponen en riesgo vidas humanas, el colapso de infraestructura y deterioran el medio natural.

Hidrografía

La cuenca alta del río Putumayo, se localiza en una ecorregión estratégica, con una alta oferta hídrica, que garantiza el abastecimiento de agua para consumo humano y para el desarrollo de actividades productivas.

La determinación de la oferta hídrica de la zona de estudio se realizó a través de la información obtenida de las estaciones o miras limnimétricas ubicadas sobre los cauces de los canales A, B y D, que el IDEAM ha registrado desde 1988 en forma periódica hasta el 2001. La oferta media anual bajo condiciones hidrometereológicas de año medio para la cuenca alta del río Putumayo es de 26 m³ seg-1 y, la oferta media neta es de 15,6 m³ seg-1. Para condiciones hidrometereológicas de año seco, la oferta media anual es de 7,59 m³ seg-1, y, la oferta media neta anual es de 4,55 m³ seg-1. La parte alta del río Putumayo muestra un comportamiento relativamente homogéneo en su disponibilidad de agua, pero con excesos hídricos durante todo el año a excepción del mes de octubre cuando no se presentan excedentes, pero tampoco se presenta

déficit. Los mayores excesos se registran desde el mes de marzo a agosto debido a la alta precipitación y baja evaporación con un máximo para la estación Michoacán en el mes de junio de 214,2 mm. En la zona de estudio la pérdida mensual o anual de humedad no excede a la precipitación, por el contrario, se presenta un excedente, con lo cual el suelo se mantiene permanentemente húmedo, esto se debe a que además de presentarse precipitaciones muy altas, la cobertura vegetal es baja y el suelo tiene una capacidad de almacenamiento muy alta (Corpoamazonia, 2010).

Geología

En la zona de estudio reconocen unidades litológicas, cuyo orden cronológico van desde el Precámbrico hasta el Cuaternario. Se destaca el período Cenozoico, el cual está representado por rocas sedimentarias, volcánicas extrusivas del Terciario originadas por las diferentes erupciones de los Volcanes Bordoncillo, Sibundoy, Cascabel y Patascoy, que agrupa una gran cantidad de depósitos volcánicos y vulcano sedimentarios, localizándose en los municipios de Santiago, Colón y Sibundoy. Esta parte de la cuenca hidrográfica del río Putumayo ha sido modelada por la presencia de diferentes períodos de glaciaciones; como consecuencia de ello se encuentran los páramos de Bordoncillo, Cascabel, Patascoy y Paramillo. Por otro lado, la región se encuentra influenciada por el sistema de fallas San Francisco-Yunguillo, que dividen a la cordillera Oriental de la Central, y las fallas Colón, Quinchoa y Sibundoy que influyen el estrechamiento y/o levantamiento de las depresiones interandinas del Valle del Magdalena (Corpoamazonia, 2010).

Marco legal

Para el caso de la investigación se tendrá en cuenta el cumplimiento de la leyes, decretos y normas que reglamentan el uso y ocupación de infraestructura vial en el territorio colombiano, ver Tabla 4.

Tabla 4

Normas que fundamentan el desarrollo de la investigación.

Norma	Tema	Objetivo
Decreto nacional 1505 de 2003	Aprovechamiento en el marco de la gestión integral de residuos solidos	Recuperación e incorporación de residuos sólidos al ciclo económico y productivo de forma eficiente por medio de la reutilización, reciclaje, compostaje o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios ambientales, sociales y/o económicos.
Ley 175 de 1983	Por el cual se reglamenta pavimentación de carreteras nacionales	Establecer lineamientos para la priorización, financiación y ejecución de obras de pavimentación en la red vial nacional, especialmente en las regiones más apartadas o menos desarrolladas del país.
INV E-213-13	Ensayo del Análisis Granulométrico de los Agregados Grueso y Fino	Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de los agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamizado.
INV E-133-13	Ensayo de Equivalente de arena de suelos y agregados finos	Este ensayo tiene por objeto determinar, bajo condiciones normalizadas, las proporciones relativas de polvo y material de apariencia arcilloso o finos plásticos presentes en suelos o agregados finos de tamaño inferior a 4.75 mm.
INV E-230-13	Ensayo del índice de alargamiento y aplanamiento del agregado grueso	Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de los índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados que se van a emplear en la construcción de carreteras.
INV E-212-13	Ensayo de presencia de impurezas orgánicas en arenas usadas para la preparación de morteros o concretos	Esta norma describe el procedimiento para determinar, de manera aproximada, la presencia de impurezas orgánicas nocivas en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos de cemento hidráulico.

INV E-217-13	Ensayo de Densidad Bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto	Esta norma establece el método para determinar la densidad bulk (peso unitario) de agregados finos, gruesos o una mezcla de ambos, en condición suelta o compactada.
INV E-218-13	Ensayo de resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles	Este método se refiere al procedimiento a seguir para medir la resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaño menor a 37.7 mm por medio de la máquina de los ángeles.
INV E-222-13	Ensayo de densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino	Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino, (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado.
INV E-223-13	Ensayo de densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso	Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso, (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado.
NTC 396	Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto	Esta norma establece el método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto en la obra y en el laboratorio
NTC 454	Concreto fresco. Toma de muestras	Esta norma establece los procedimientos para obtener muestras representativas de concreto fresco
Norma	Tema	Objetivo
NTC 504	Refrentado de ensayo para determinar el asentamiento del concreto	Esta norma contempla aparatos, materiales y procedimientos para el refrentado con cemento puro de cilindros de concreto
NTC 550	Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra	Esta norma establece los procedimientos para la elaboración y curado de especímenes cilíndricos y prismáticos
NTC 673	Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto	Este método de ensayo trata sobre la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tales como cilindros moldeados y núcleos perforados

Nota. En la tabla 4 se describen las normas que fundamentan los procedimientos llevados a cabo en el desarrollo de la investigación.

Metodología

El marco metodológico establece una serie de procesos consecutivos diseñados para lograr el cumplimiento de los objetivos de esta investigación con el fin de estudiar y evaluar la efectividad del concreto con fibras de acero reutilizadas enfocadas en pavimentos rígidos. Este marco metodológico muestra un paso a paso donde se logra identificar el tipo de investigación y diseño, la población y muestra a estudiar, como también las técnicas de recolección de información y el análisis de estos.

Tipo de investigación

El tipo de la presente investigación en este estudio es aplicativa y experimental. De acuerdo con Zorrilla, (1993), la investigación aplicativa tiene como objetivo el aplicar conocimientos para resolver problemas específicos; en este caso, se trata de utilizar fibras de acero en concreto para mejorar la sostenibilidad y resistencia en pavimentos. Por otro lado, el diseño experimental se basa en la manipulación de las variables de contenido de fibras de acero, con el fin de medir su efecto en las propiedades mecánicas del concreto. (p.43)

Por otro lado Vargas Cordero, (2009) menciona:

“La investigación aplicada, entendida como la utilización de los conocimientos en la práctica, para aplicarlos en provecho de grupos que participan en esos procesos y en la sociedad en general, además del bagaje de nuevos conocimientos que enriquecen la disciplina” (p. 6)

Diseño de la Investigación

Según Niño Rojas, (2011) “La experimentación establece relaciones de causa-efecto y se ocupa de descubrir, comprobar, confrontar, negar o confirmar teorías, y eventualmente, como consecuencia, formular leyes.” (p. 33)

De acuerdo a lo anterior, se induce que el presente trabajo de investigación es de diseño experimental por la manera en la que permite manipular las variables elegidas a criterio del

investigador, en este caso los porcentajes de reutilización de fibras de acero (RFA), para así ver cómo influyó en el concreto como la variable dependiente, conformado los agregados (grueso y fino), cemento, agua, y así poder tener resultados específicos que se necesitan cumpliendo con los objetivos planteados.

Variable Independiente

Para la variable independiente, se tuvo 3 porcentajes de la RFA que se usaron como un aditivo a la mezcla de concreto.

Variable dependiente

Como variable dependiente se tuvo la resistencia a la compresión del concreto, ya que esta variaba según cada porcentaje de cascarilla agregada a la mezcla.

Muestra

La muestra fueron los cilindros y viguetas de concreto ensayados en laboratorio y la evaluación de su comportamiento según su tiempo de curado, y los porcentajes de la RFA asignados, así pues, se contó con 12 cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, además 8 viguetas de 150mm x 150 mm x 500mm.

Muestreo

Para la presente investigación se tuvo en cuenta el muestreo no probabilístico y por conveniencia de los investigadores; para los porcentajes de la RFA, se tuvieron en cuenta diferentes investigaciones donde se usaron otros tipos de fibras de acero y polímeros para evaluar la resistencia a la compresión y flexión del concreto y. ver Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5

Cilindros de concreto con porcentajes de adición de RFA

Producto	Cantidad (%)	Muestra de cilindros a ensayar en laboratorio según tiempo curado			Muestra parcial	Total, de muestras
		7 días	14 días	28 días		
RFA	0	2	2	2	6	24
	0.5	2	2	2	6	
	0.75	2	2	2	6	
	1	2	2	2	6	

Nota. En la tabla anterior, se puede evidenciar el número de muestras que se ensayaron a compresión, los porcentajes de RFA para cada una de ellos y el tiempo de curado al cual se determinó la resistencia a la compresión del concreto. Fuente: Autores de investigación (2025).

Tabla 6

Viguetas de concreto con porcentajes de adición de RFA

Muestra de viguetas a ensayar en laboratorio			
Producto	Cantidad (%)	Tiempo de curado	Total, de muestras
		28 días	
ACF	0	2	8
	0.5	2	
	0.75	2	
	1	2	

Nota. En la tabla anterior, se puede evidenciar el número de muestras que se ensayaron a flexión, los porcentajes de RFA para cada una de ellos y el tiempo de curado al cual se determinó la resistencia a flexión (Modulo de rotura). Fuente: Autores de investigación (2025).

Fases de la investigación

Al tener en cuenta los objetivos planteados para resolver la pregunta de investigación, se

ha propuesto el desarrollo de este trabajo de grado en fases lógicas, que permitieron guiar de manera estructurada el proceso de evaluación del comportamiento del concreto con fibras de acero recicladas.

Fase 1: Obtención y caracterización de agregados pétreos

Como primer paso, se buscaron datos viables sobre los agregados pétreos que se obtendrán de proveedores ubicados en el municipio de Mocoa, que proveen materiales para la construcción, como arena, grava, entre otros. Es importante que estos materiales cumplan con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Para ello, se tendrán en cuenta las normativas y guías técnicas de INVIAS, con el fin de conocer los requisitos específicos sobre las propiedades de los agregados. Posteriormente, se realizarán ensayos de laboratorio, tales como granulometría, densidad relativa, gravedad específica y entre otros, para determinar las propiedades físicas de los agregados cumplimiento a las especificaciones mínimas y que además fueron datos de entrada para el diseño de mezclas del concreto en aplicaciones de pavimento rígido. Para ello, se utilizarán instrumentos como tamices, balanzas, hornos y demás instrumentos de precisión para realizar cada uno de los ensayos, los cuales permitieron realizar una caracterización adecuada de los agregados pétreos

Fase 2: Recolección de alambre calibre 16 y cálculo de dosificación de mezcla de concreto

$f'c=3000$ psi con la adición de fibras de acero

Se hizo visitas de campo para obtener el alambre de acero calibre 16 presente en diferentes cultivos de frijol localizados en el Valle de Sibundoy donde este alambre es desechado por los cultivadores luego de un largo periodo de servicio para la producción de su producto.

Posteriormente, para garantizar un comportamiento adecuado en el concreto con las fibras de acero, teniendo en cuenta las proporciones de materiales adecuadas, se procedió a realizar la

preparación y dosificación de la mezcla para porcentajes de fibra de acero reciclada (0.50% 0.75% y 1.00%) como un refuerzo para la mezcla de concreto. Para lograr el cumplimiento de este objetivo, se empleó cálculos técnicos, donde se hizo uso de las fórmulas necesarias de diseño de mezcla de concreto según la norma ACI. Se prepararon varias mezclas con las proporciones correspondientes de fibra de acero y demás componentes estándar de la mezcla, tales como cemento, agua y agregados. Los especímenes de concreto se moldearon en cilindros y vigas, los cuales fueron usados para ensayos de calidad. Se hizo uso de balanzas, recipientes de mezcla y batidoras de concreto, con el fin de realizar una correcta dosificación.

Fase 3: Realización de ensayos de calidad del concreto

Para evaluar las mejoras que las fibras de acero puedan aportar al comportamiento del concreto, se realizaran diversos ensayos establecidos por las normativas internacionales (ASTM y ACI), tales como el ensayo de revenimiento, donde se evaluara la trabajabilidad del concreto en estado fresco, utilizando el cono de Abrams. Luego, se llevarán a cabo dos pruebas fundamentales para el concreto endurecido; la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. La prueba de compresión se ejecutará a los 7,14 y 28 días de curado, utilizando una maquina adecuada para medir la capacidad de resistencia del concreto. Por otro lado, el ensayo de flexión se realizará siguiendo los procedimientos establecidos por las normativas para determinar como el concreto es capaz de soportar el esfuerzo mínimo a flexión de acuerdo a las especificaciones generales para pavimentos rígidos de INVIAS.

Fase 4: Comparación de resultados

Una vez obtenidos todos los resultados del concreto con la adición de fibras de acero y del concreto convencional, se procedió con un análisis comparativo entre ambos, con el fin de identificar los posibles beneficios y limitaciones que las fibras de acero puedan ofrecer,

especialmente en términos de durabilidad y resistencia.

Los resultados obtenidos de pruebas de resistencia a la flexión, comprensión y revenimiento fueron organizados en gráficos y tablas, con el propósito de facilitar la comparación, y se hará uso del software estadístico Excel. Todo esto es crucial para determinar si las fibras de acero recicladas pueden ser una alternativa efectiva al concreto convencional en la construcción de pavimentos rígidos.

Procedimiento

El procedimiento llevado a cabo durante el transcurso de la investigación, se describe a continuación:

Fase 1: Obtención y Caracterización de Agregados Pétreos.

Selección de Agregados Grueso y Fino

Para la selección de agregados pétreos fino y grueso, se realizó visitas a diferentes canteras en municipio de Mocoa en busca de información técnica acerca de ensayos granulométricos, encontrando la disponibilidad de material proveniente de las canteras CONCREINSA SAS y CANLIYACO SAS, que extraen el material de Rio Moca y Rio Caliyaco respectivamente. Las empresas estudiadas no contaban con información reciente sobre la caracterización de sus agregados, por lo cual fue necesario realizar dichos ensayos para conocer si sus características cumplían con los requisitos mínimos exigido por la norma INVIAS debido a su importancia en el diseño de la mezcla de concreto.

Dentro de este marco, se realizaron las pruebas de laboratorio determinando que el agregado fino (arena) y grueso (triturado 3/4”) que satisfacía de mejor manera los requerimientos de la normatividad fue el proveniente de la cantera CONCREINSA. Los ensayos realizados fueron los que se describen a continuación.

Análisis Granulométrico de los Agregados Grueso y Fino.

El ensayo se realizó conforme lo exige el artículo 500-22 de las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS, y teniendo en cuenta su manual de ensayos para materiales de carreteras.

En este sentido se llevó a cabo recolección de datos tomados en la prueba de laboratorio de granulometría para cada agregado que, junto con el procedimiento realizado se puede ver en el **Anexo A)** del documento.

En la Tabla 7 se muestra la distribución granulométrica de agregado fino, posteriormente en la Figura 6 se observa su curva de granulométrica.

Tabla 7

Granulometría de agregado fino de Rio Mocoa Putumayo

N° Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	9.5	0	0.00	0.00	100.00
N°4	4.75	10.87	1.11	1.11	98.89
N°8	2.36	206.59	21.10	22.21	77.79
N°16	1.18	217.46	22.21	44.41	55.59
N°30	0.6	271.83	27.76	72.17	27.83
N°50	0.3	184.84	18.88	91.05	8.95
N°100	0.15	87.69	8.95	100.00	0.00
		979.28			
Módulo de finura (MF) según ASTM_C33				2,3 < MF < 3,1	
Módulo de finura (MF)				3,0 "Cumple"	

Nota. En la tabla 7 se muestran los datos obtenidos de la granulometría realizada a la arena extraída del Rio Mocoa ubicada en el Municipio de Mocoa Putumayo, la cual cumple con el módulo de finura según la norma INVIAS, ya que el valor obtenido fue 3,0. Fuente: Autores de investigación (2025).

De manera similar, el agregado fino debe regirse a lo establecido en el número 630.2.1.3.1 de las especificaciones INVIAS que exige que la granulometría debe ajustarse a los porcentajes pasa de la Tabla 8.

Tabla 8

Granulometría del agregado fino para concreto estructural.

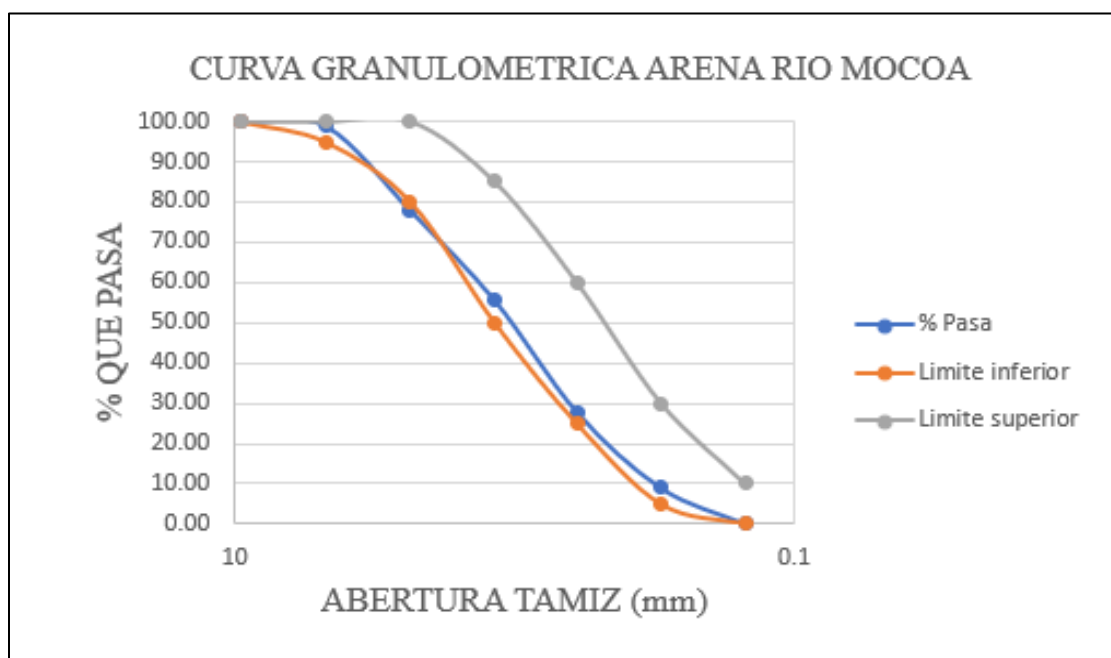
Tabla ag2 para agregado fino								
Tipo de gradación	TAMIZ (mm/ U.S. Standard)							
	3/8 pulg	Nro.4	Nro.8	Nro.16	Nro.30	Nro.50	Nro.100	Nro.200
Única	Pasa tamiz (%)							
	100	95-100	80-100	50-85	25-60	5--30	0-10	0-3

Nota. En la Tabla 8 se muestra la gradación indicada por la normatividad INVIAS, evidenciando que los porcentajes pasa presentes en la Tabla 7 de agregado fino se ajustan los valores permitidos.

Fuente.INVIAS (2022).

Figura 6

Curva Granulométrica del agregado fino del Rio Mocoa



Nota. En la Figura 6 se observa la curva granulométrica de la arena del Municipio de Mocoa Putumayo, en donde se evidencia que la línea de color azul, la cual corresponde al porcentaje de material que pasa por los tamices, se encuentra dentro de los límites. Fuente: Autores de investigación (2025).

Una vez obtenido la granulometría de la grava se procede a realizar el mismo proceso para obtener la granulometría del agregado grueso que corresponde al triturado de tamaño máximo nominal 3/4" de pulgada ver Tabla 9, así pues, se puede hacer la representación gráfica de la curva granulométrica para este agregado como muestra la Figura 7.

Tabla 9

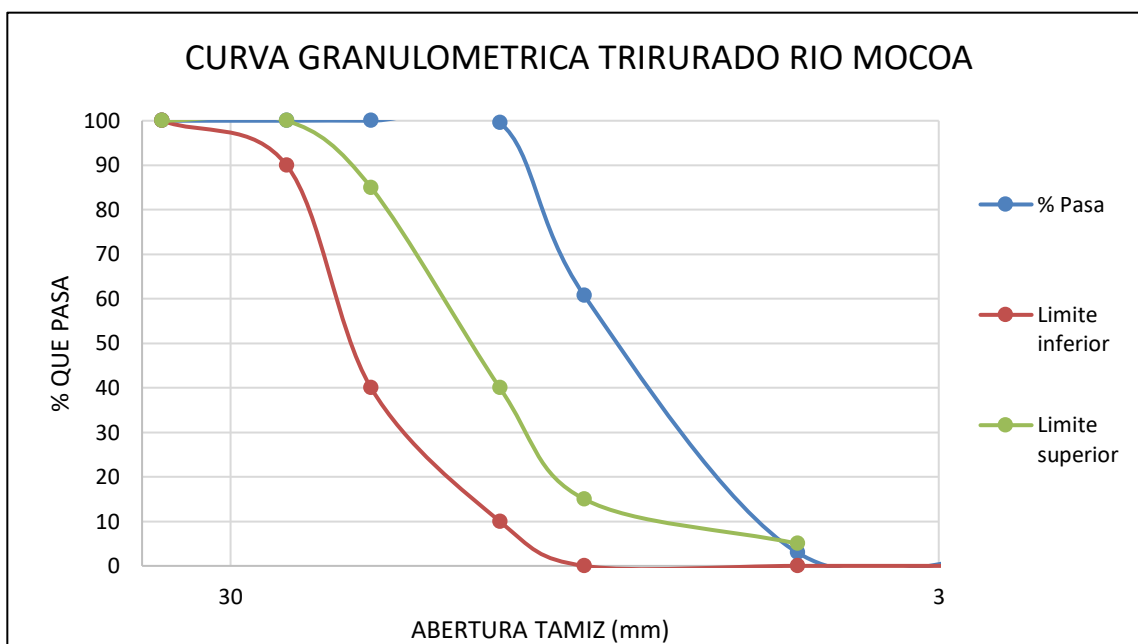
Granulometría del Triturado de Mocoa Putumayo.

N° Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1(1/2")	37.5	0	0.00	0.00	100
1"	25	0	0.00	0.00	100
3/4"	19	0	0.00	0.00	100
1/2"	12.5	14.3	0.42	0.42	100
3/8"	9.5	1319.6	38.82	39.24	61
No 4	4.75	1963.3	57.75	96.99	3
No 8	2.36	21.7	0.64	97.63	2
Fondo		80.6	2.37	100.00	0
		3399.50			

Nota. En la tabla 9 se muestran los datos obtenidos de la granulometría realizada al triturado proveniente del Municipio de Mocoa Putumayo, el cual cuenta con un tamaño máximo de 1" y con un tamaño máximo nominal de 3/4". Fuente. Autores de investigación (2025).

Figura 7

Curva Granulométrica triturado Mocoa Putumayo



Nota. En la Figura 7 se observa la curva granulométrica del triturado proveniente de Mocoa Putumayo, en donde se evidencia que la línea de color azul, la cual corresponde al porcentaje de material que pasa por los tamices, no se encuentra dentro de los límites, reflejando la presencia de un material demasiado grueso. Fuente. Autores de investigación (2025).

Sin embargo, cabe destacar que esta investigación está enfocada en una losa de concreto para pavimentos rígidos y siguiendo las regulaciones de la normatividad INVIAS, la gradación del agregado grueso se debe ajustar a alguna de las señaladas en la tabla 500-1 presente en el artículo 500-22 de las especificaciones generales. Verificando la Tabla, se encontró que el agregado grueso se ajusta al tipo de gradación AG-2 de la fracción 2 que corresponde a un agregado de 3/4" a N°4.

Tabla 10

Granulometría para agregado grueso en losas de concreto.

Tipo de gradación			Tamiz (mm/ U.S. Standard)								
INVIAS		ASTM C33	2 ^{1/2} pulg	2 pulg	1 ^{1/2} pulg	1 pulg	3/4 pulg	1/2 pulg	3/8 pulg	Nro.4	Nro.8
AG-2	Fracción 2:	67	Pasa tamiz (%)								
	3/4 pulg a nro.4		-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5

Nota. En la tabla 10 se muestran que la gradación del agregado grueso cumple con el requisito técnico del INVIAS, evidenciando que este tipo de agregados se usa comúnmente en concreto estructural, pavimento rígido y mezclas donde se necesita buena trabajabilidad y densidad. Fuente. INVIAS (2022).

Ensayo del Índice de Alargamiento y Aplanamiento del Agregado Grueso

El ensayo se realizó conforme lo exige el Instituto Nacional de Vías, en su manual de ensayos para materiales de carreteras el procedimiento en laboratorio de la prueba, se pueden ver en el (

Anexo B. del documento. Los resultados obtenidos del índice de aplanamiento y alargamiento del agregado grueso se describen en la Tabla 11 y Tabla 12 respectivamente.

Índice de aplanamiento INV. E-230-13					
Tamiz		A	B	C	% Aplanamiento < 25%
Pasa	Retenido	(g)	(g)	B/A*100	
3/4"	1/2"	3.6	-	No aplica	2.01%
1/2"	3/8"	609.5	141.2	431.7	
3/8"	1/4"	13950	152.1	9171.6	
Total		14563.1	293.3		Cumple

A: Masa inicial de cada fracción

B: Masa de las partículas aplanadas de cada fracción

C: Porcentaje de alargamiento de la fracción

Tabla 11

Cálculo índice de aplanamiento

Nota. En la tabla 1, se muestran los cálculos realizados para encontrar el índice de aplanamiento de la muestra, el porcentaje obtenido fue de 2.01%, y según la norma el máximo debe ser 25%, razón por la que si se cumple para esta especificación. Fuente. Autores de investigación (2025).

Tabla 12

Cálculo índice de alargamiento

Índice de alargamiento INV. E-230-13					
Tamiz		A	B	C	
Pasa	Retenido	(g)	(g)	B/A*100	% Aplanamiento < 25%
3/4"	1/2"	3.6	0	0	
1/2"	3/8"	609.5	122	20.016407	2.04%
3/8"	1/4"	13950	175	1.2544803	Cumple
Total		14563.1	297		

A: Masa inicial de cada fracción

B: Masa de las partículas largas de cada fracción

C: Porcentaje de alargamiento de la fracción

Nota. En la tabla 2, se muestran los cálculos realizados para encontrar el índice de aplanamiento de la muestra, el porcentaje obtenido fue de 2.04%, y según la norma el máximo debe ser 25%, razón por la que si se cumple para esta especificación. Fuente. Autores de investigación (2025).

Ensayo de Presencia de Impurezas Orgánicas en Arena usadas para la Preparación de Concretos.

El ensayo se realizó conforme lo exige el Instituto Nacional de Vías, en su manual de ensayos para materiales de carreteras, donde se analizó la presencia de materia orgánica en el agregado fino verificando si el porcentaje presente de esta materia no sobrepasa el permitido por los requerimientos de la norma, ver Figura 8.

El procedimiento del ensayo, se puede ver en el (**Anexo C.** del documento. Los resultados obtenidos describen que el color del líquido que sobrenadaba sobre la muestra de ensayo no

sobrepasó el color de referencia N°3 infiriendo que la muestra no contiene componentes orgánicos perjudiciales para el diseño de la mezcla de concreto de la presente investigación.

Figura 8

Determinación del color del líquido que sobrenada sobre la muestra de ensayo.



Nota. En la figura 8 se muestra el resultado de la coloración del líquido que sobrenada sobre la muestra ensayada, la cual coincide con el color de Gardner de referencia N° 11, ya que se encuentra en la placa de referencia N° 3. Fuente. Autores de investigación (2025).

Resistencia al desgaste en máquina de los ángeles

El ensayo se realizó conforme lo exige el Instituto Nacional de Vías, en su manual de ensayos para materiales de carreteras. El procedimiento del ensayo realizado al agregado grueso (triturado 3/4") se pueden ver en el (**Anexo D.** del documento con el objetivo de medir la resistencia a la degradación que tiene el material para usarlo como agregado grueso en la elaboración del concreto de la presente investigación.

Los resultados obtenidos se describen en la Tabla 13.

Tabla 13

Resultado del desgaste en máquina de los ángeles.

Datos de entrada y cálculos		
Muestra N°	1	
Procedencia	Mocoa-Putumayo	
Tamaño máximo nominal	3/4"	
Gradación Usada	B	
N° de esferas	11	
N° de revoluciones	500	
Masa muestra seca tamiz (3/4")	1250.1	
Masa muestra seca tamiz (1/2")	1250.4	
Masa muestra seca tamiz (3/8")	1250.5	
Masa muestra seca tamiz (1/4")	1250.5	
(P1) = Masa muestra seca antes de ensayo (g)	4794.6	
(P2) = Masa muestra seca después del ensayo que pasa tamiz 1,70 mm (N°12) (g)	3221.5	
P1 - P2 = Perdida (g)	1573.1	
% Desgaste = $(P1-P2) / P1 < 40\%$	32.8%	"Cumple"

Nota. En la tabla 13 se muestran los resultados obtenidos del ensayo realizado a la muestra de triturado proveniente del Rio de Mocoa-Putumayo, la cual obtuvo un % de desgaste del 32.8%, el cual está por debajo del máximo exigido por la norma que es de 40%. Fuente: Autores de investigación (2025).

Ensayo de Densidad Bulk (peso unitario) y Porcentaje de Vacíos de los Agregados en estado Suelto y Compacto.

El ensayo se realizó conforme lo exige el Instituto Nacional de Vías, en su manual de ensayos para materiales de carreteras, esta prueba es valiosa para el diseño de mezcla en el desarrollo de la presente investigación.

El procedimiento del ensayo, se pueden ver en el (

Anexo E. del documento. Los resultados densidad bulk (peso unitario) de los agregados

grueso y fino, en condición compactado y suelto se muestran respectivamente en la Tabla 14 y

Tabla 15.

Tabla 14

Densidad Bulk (peso unitario compactado).

Cálculo densidad bulk (peso unitario) compactado de los agregados pétreos		
Ítem	Agregado Grueso	Agregado Fino
B: Peso del recipiente de medida más el agregado, gr	19037,5	7685,7
C: Peso del recipiente de medida, gr	10770,4	4958,2
V: Volumen del recipiente de medida, cm ³	5607,54	1626,4
A: Densidad Bulk (Peso unitario) Compactado, g/cm ³	1,48	1,68

Nota. La tabla 14 indica el valor del peso unitario compactado del agregado grueso y fino, sus valores son 1,48 g/cm³ y 1,68 g/cm³ respectivamente. Fuente: Autores de investigación (2025).

Tabla 15

Densidad Bulk (peso unitario suelto).

Cálculo densidad Bulk (peso unitario) sueltos de los agregados pétreos		
Ítem	Agregado Grueso	Agregado Fino
B: Peso del recipiente de medida más el agregado, gr	18636,3	7492
C: Peso del recipiente de medida, gr	10770,4	4958,2
V: Volumen del recipiente de medida, cm ³	5607,54	1626,4
A: Densidad Bulk (Peso unitario) Compactado, g/cm ³	1,40	1,56

Nota. En la tabla 15 se puede evidenciar el valor del peso unitario suelto tanto del agregado grueso como del agregado fino, cuyos valores son 1,40 g/cm³ y 1,56 g/cm³ respectivamente. Fuente:

Autores de investigación (2025).

Así mismo, en el informe del (

Anexo E. se calculó porcentaje de vacíos de los agregados en estado compactado y suelto sus resultados se muestran respectivamente en la Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 16

Resultado % de vacíos de los agregados compactados.

Cálculo Porcentaje de vacíos (%) en los agregados compactados		
Descripción	Agregado grueso	Agregado fino
S: Gravedad específica bulk (g/cm^3)	2,45	2,69
A: Densidad Bulk (g/cm^3)	1,47	1,68
Pw: Densidad agua (g/cm^3)	1	1
Porcentaje de vacíos (%)	40%	38%

Nota. La tabla 16 indica el % de vacíos tanto del agregado grueso y fino, sus valores corresponden al 43% y 38% respectivamente. Fuente: Autores de investigación (2025).

Tabla 17

Resultado % de vacíos de los agregados sueltos.

Cálculo Porcentaje de vacíos (%) en los agregados sueltos		
Descripción	Agregado grueso	Agregado fino
S: Gravedad específica bulk (g/cm^3)	2,45	2,69
A: Densidad Bulk (g/cm^3)	1,40	1,56
Pw: Densidad agua (g/cm^3)	1	1
Porcentaje de vacíos (%)	43%	42%

Nota. La tabla 17 indica el % de vacíos tanto del agregado grueso y fino, sus valores corresponden al 43% y 42% respectivamente. Fuente: Autores de investigación (2025).

Ensayo de Densidad y Absorción del Agregado Fino.

En este ensayo se realiza con el fin de obtener la densidad relativa en condición seca al horno (SH), densidad relativa en condición saturada y superficialmente seca (SSS) y densidad relativa aparente del agregado en mención. Estas características son importantes para calcular el volumen ocupado por el agregado en mezclas como las del concreto, además se usa en el cálculo de los vacíos del agregado.

La siguiente simbología hace referencia a los datos usados y calculados durante el ensayo:

SH: densidad relativa (gravedad específica) seca al horno.

SSS: densidad relativa (gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca

D_{ra} : densidad relativa aparente (gravedad específica aparente).

%Abs: Porcentaje de absorción.

A: masa material seco al horno.

B: masa picnómetro lleno con agua.

C: masa picnómetro lleno con agua más muestra.

S: masa de la muestra saturada y superficialmente seca.

Ahora bien, el procedimiento seguido cumpliendo los lineamientos de la norma se pueden ver en el (**Anexo F.** sus resultados se muestran en la tabla 18.

Cálculo de densidad relativa del agregado fino proveniente del rio Mocoa-Putumayo
Parámetros

A (g)	B (g)	C (g)	S (g)	SH	SSS	D _{ra}	Absorción (%)
494,4	673,1	989,2	500	2,69	2,72	2,77	1.1

Tabla 18

Resultados del ensayo de densidad y absorción del agregado fino.

Nota. La tabla 18 indica los valores adimensionales obtenidos de densidad SH, SSS y D_{ra}, además del porcentaje de absorción del agregado fino proveniente del río Mocoa-Putumayo.

Fuente. Autores de investigación (2025).

Ensayo de densidad y absorción del agregado Grueso.

Siguiendo el mismo procedimiento del anterior ensayo se obtuvo los resultados de densidad relativa o más bien llamada gravedad específica del agregado grueso como se muestra en él (**Anexo G**). A continuación se describe la simbología referente a los datos usados y calculados durante el ensayo:

SH: densidad relativa (gravedad específica) seca al horno.

SSS: densidad relativa (Gs) en condición saturada y superficialmente seca.

D_{ra}: densidad relativa aparente (gravedad específica aparente).

%Abs: Porcentaje de absorción.

A: masa al aire de la muestra seca al horno

B: masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca

C: masa aparente de la muestra saturada en agua

Ahora bien, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 19.

Cálculo de densidad relativa del agregado grueso proveniente del río Mocoa-Putumayo

Parámetros						
A (g)	B (g)	C (g)	SH	SSS	D _{ra}	Absorción (%)
1994,6	2030,8	1216,3	2,45	2,49	2,56	1.81

Tabla 19

Resultados del ensayo de densidad y absorción del agregado grueso.

Nota. En la tabla 19 se muestran los resultados obtenidos de densidad SH, SSS y Dra, cuyos valores son adimensionales, junto con el resultado del porcentaje de absorción del agregado grueso, proveniente del río Mocoa-Putumayo Fuente. Autores de investigación (2025).

Fase 2: Recolección de alambre calibre 16 y Cálculo de Dosificación de Mezcla de Concreto $f'c = 3000$ psi con la Adición de Fibras de Acero

Descripción del tipo de Alambre para usar Fibras de Acero en el Concreto

En la etapa de recolección de alambre se hizo visitas a diferentes cultivos de frijol y uchuva que usan este material para el amarre y distribución de sus siembras, que luego de un largo periodo de cosecha se evidencio que algunos casos este alambre galvanizado es desechado por los agricultores. Para estos casos se documentó que el alambre usualmente utilizado en estos cultivos es de calibre 16, 14 y 12 pero en su mayoría los cultivos requieren alambre calibre 16 por lo cual se convierte en el material con mayor cantidad de uso y por ende de desecho en el caso de terminación de cultivos.

Por cual, se decidió hacer la recolección del tipo de alambre de acero calibre 16 que, por conveniencia en cantidad e impacto ambiental es ideal para esta investigación. Igualmente, el hecho de que este tipo de alambre no interfiere en la trabajabilidad de la mezcla de concreto si se dosifica en cantidades adecuadas. A continuación, en la Figura 9, se presenta en términos generales la descripción (ficha técnica) del alambre galvanizado en el mercado.

Figura 9

Ficha técnica alambre galvanizado.



FICHA TÉCNICA

ALAMBRE GALVANIZADO

-Es un alambre resistente de acero y recubierto por una gruesa y uniforme capa de zinc que lo protege de la corrosión.

-Usos industriales, ferreteros, agrícolas, hortícolas, manualidades, (calibres finos) etc.

Cumple con las siguientes NORMAS:

ASTM -A-510 Especificación estándar para requisitos generales de alambre redondo, de acero al carbón.

ASTM-A-641 Especificación estándar para alambre de acero al carbón recubierto de zinc (galvanizados).



PROPIEDADES QUÍMICAS

% Carbono	%Magnesio	% Fósforo	% Azufre	% Silicio
0,068 - 0,070	0,300 - 0,310	0,030 - 0,040	0,035- 0,045	0,075-0,085

PROPIEDADES MECÁNICAS

Clave	Calibre	Diámetro(mm)	Diámetro (in)	Resistencia a la Tensión (kgf/mm2) mínimo	Resistencia a la Tensión (kpsi) máximo	Capa de Zn (gr/cm2) min.
IN4001	12,5	2,46 - 2,56	0,097 - 0,101	30	45	25
IN4002	14,5	1,89 - 1,96	0,074 - 0,078	30	45	25
IN4003	16	1,54 - 1,60	0,060 - 0,064	30	45	25
IN4004	18	1,16 - 1,22	0,045 - 0,049	30	45	25
IN4005	20	0,84 - 0,90	0,033 - 0,035	30	45	25

Nota. En la fibra 9 se muestra las propiedades químicas y mecánicas del alambre en diferentes calibres, la resistencia a tracción mínima según la ASTM C1116 debe mayor o igual 345 MPa, se evidencia que el calibre 16 cumple con este requerimiento. Fuente. DOGO TULS (2022).

Recolección del Alambre Galvanizado Calibre 16

Una vez seleccionado el material para el desarrollo de la presente investigación, se realizó la operación de recolección. La Figura 11 muestra los diferentes puntos de producción de frijol

con presencia de alambre.

Figura 10

Localización de cultivos de frijol.



Posteriormente, se solicitar una cantidad aproximadamente de 7 Kg de alambre que será desechado de los cultivos como se evidencia en la Figura 10 y se procedió a su almacenamiento.

Figura 11

Recolección de alambre desechado.



Preparación del Alambre Galvanizado Calibre 16

Ahora bien, ya obtenido el alambre necesario a usar como refuerzo en la mezcla de concreto se procede a preparar el material cumpliendo con los requisitos de la NTC 5541(ASTM C116).

Posteriormente, estos alambres se cortan de manera manual o mecánica utilizando guillotinas,

cizallas o cortadoras industriales, garantizando una longitud uniforme de aproximadamente 100 mm como se muestra en la Figura 12.

Una vez cortadas, las fibras se acondicionan mediante cepillado y lavado, eliminando restos de polvo, grasa y óxido suelto, se clasifican para retirar aquellas que presenten deformaciones excesivas o daños visibles. Finalmente, se almacenan en condiciones secas y protegidas de la humedad para evitar la corrosión, quedando listas para su incorporación en la mezcla de concreto. Este proceso asegura que las fibras recicladas cumplan con las condiciones necesarias de homogeneidad, tamaño y calidad requeridas por normas como la NTC 5541.

Figura 12

Corte de alambre calibre 16



Nota. La figura 12 muestra el proceso de cortado manual del alambre recolectado cada fibra tiene una longitud de 100mm. Fuente. Autores de la investigación (2025).

Diseño de Mezcla de Concreto de $f'c=3000$ psi por el Método de la ACI.

Una vez realizada la caracterización de los materiales pétreos (arena y triturado) se procede con el diseño de mezcla de concreto, donde, este básicamente se enfoca en el cálculo de cantidades de material que se debe utilizar para la elaboración de los cilindros.

Para el diseño de mezcla se tomó como referencia el método ACI el cual hace un procedimiento básico logrando obtener las cantidades precisas para una unidad cubica, los cuales se logran siguiendo unos lineamientos que están plasmados en una guía la cual está conformada por tablas con información significativa para lograr los resultados esperados.

El diseño se realizó teniendo en cuenta los datos obtenidos de los ensayos de los agregados que se mencionaron anteriormente.

A continuación, se describen los cálculos realizados conforme estipula el método de la ACI para el diseño de la mezcla de concreto. (**Anexo H.**

Determinación del asentamiento. Para el diseño de la mezcla en estado plástico se tuvo en cuenta un asentamiento entre 3 pulgadas y 4 pulgadas (75 y 100 mm) ya que, según los valores de asentamiento recomendados por ACI, el concreto se puede usar en pavimentos y losas medianamente reforzadas.

Determinación del tamaño máximo del agregado grueso. Para la presente investigación se realizaron ensayos de granulometría a materiales provenientes de la cantera Concreinsa.SAS municipio de Mocoa; con los resultados obtenidos en laboratorio se cumplió con las especificaciones generales de construcción de carreteras, cuyo tamaño máximo nominal fue de 3/4”.

Determinación de la resistencia promedio requerida (F'_{cr}). Para el cálculo de la resistencia promedio se tuvo en cuenta la resistencia especificada, que en este caso fue de 3000 psi, lo que equivale a 210.9 kg/cm^2 , a este valor, se le sumó una constante, que se determina teniendo la siguiente Tabla.

Tabla 20

Resistencia promedio requerida

F'c Especificado	F'cr (Kg/cm ²)
< 210	Fc + 70
210-350	Fc + 84
>350	Fc + 98

Nota. En la tabla 20, se muestra el valor de la constante que se debe sumar a la resistencia especificada, que en este caso fue de 84 kg/cm² ya que la resistencia especificada (F'cr) es mayor a 210 kg/ cm², su resultado de resistencia promedio requerida es 294.9 kg/ cm².

Determinación del volumen unitario de agua y contenido de aire estimado. El agua, desempeña un papel importante puesto que es capaz de hidratar y dar fluidez a una mezcla de concreto, pero a su vez se debe tener cuidado con las partículas indeseadas las cuales puede afectar en el correcto funcionamiento del mismo puesto que el agua constituye del 14% al 18% del volumen de la mezcla (Vélez, 2010)

Ahora bien, para el cálculo del volumen unitario de agua del diseño de mezcla de la presente investigación, se tuvo en cuenta la Tabla 21, así como también para el cálculo del contenido de aire atrapado.

Tabla 21

Volumen unitario del agua (lt/m³)

TMN de la grava	% de aire natural estimado	Asentamiento, in		
		1" a 2"	3" a 4"	6" a 7"
3/8"	3	207	228	243
1/2"	2.5	199	216	228
3/4"	2	190	205	216
1"	1.5	179	193	202
1 1/2"	1	166	181	190
2"	0.5	154	169	178

Nota. En La tabla 21 indica los valores de cantidad de agua por m³ y contenido de aire estimado determinado para un concreto en relación al asentamiento y el tamaño máximo del agregado grueso dando como resultado 205 lt/m³ y 2% de aire atrapado.

Determinación de la relación agua cemento (a/c). No se puede subestimar la importancia del agua en la relación agua/cemento, ya que juega un papel crucial en la determinación de numerosas propiedades del material final. La interacción entre el agua y el cemento influye en gran medida en la fluidez de la mezcla, y la adición de más agua normalmente da como resultado una mayor trabajabilidad y plasticidad. Estas cualidades son muy ventajosas en la construcción. Sin embargo, es importante señalar que un contenido excesivo de agua conduce a una disminución de la resistencia debido a la creación de espacios vacíos adicionales.

Es así que la relación de agua-cemento Tabla 22 se rige a lineamientos de los parámetros establecidos por el método ACI donde tiene como referencia la resistencia de diseño requerida la cual es F'_{cr} 294.9 kg/cm² dando como resultado tras una interpolación de 0.556 puesto que esta no contiene aire incorporado.

Tabla 22 media F'_{cr} a los 28

Relación días.

(a/c), por

F'_{cr} (Kg/cm ²)	Relación agua/cemento en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.8	0.71
200	0.7	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.4
400	0.43	

resistencia

Nota: Teniendo en cuenta que la mezcla no contiene aditivos se toma como referencia el concreto sin aire incorporado y puesto que la resistencia de diseño requerida es de 294.9 kg/cm² se debe hacer una interpolación para obtener el valor de la relación de agua cemento necesaria para el diseño.

Determinación del factor cemento. Una vez determinado el valor de la relación agua cemento se calcula el contenido de cemento por metro cubico para un concreto de 2500 psi dividiendo el agua de mezclado entre la relación agua/cemento.

$$Cemento = \frac{Cagua}{X}$$
$$Cemento = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{0.556} = 368.71 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

Cagua: contenido de agua de mezclado en kg/m³

X: Relación agua/cemento

Para un metro cubico (1 m³) de concreto de F'c = 3000 psi es necesario 368.71 kg de cemento.

Determinación del peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto. El volumen del agregado grueso está ligado a la Tabla 23 establecida en el método ACI donde tiene como referencia el tamaño máximo nominal del agregado grueso el cual es 3/4" y el módulo de fineza del agregado fino el cual es 3 dando, así como resultado 0.6 m³, como se muestra a continuación:

Tabla 23

Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto.

**Volumen de agregado grueso compactada por m3 de hormigón
para diferentes módulos de finura de agregado fino**

TMN de la grava	2.4	2.6	2.8	3
3/8"	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.6
1"	0.71	0.69	0.67	0.65

Nota. De acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado grueso y el módulo de fineza del agregado fino se logró obtener el volumen del agregado grueso de 0.6 m3

Una vez obtenido el resultado se procede hacer el cálculo del peso del agregado grueso con el peso unitario compactado del mismo.

$$Peso\ a.\ g = Volumen\ a.\ g * Pu\ ag$$

$$Peso\ a.\ g = 0.6m3 * 1474.3 \frac{kg}{m3} = 884.57\ kg$$

Donde

Pu a.g: Peso unitario seco del agregado grueso.

Dando como resultado 884.57 kg de agregado grueso que se deben utilizar para un metro cubico de concreto.

Determinación del peso del agregado fino por unidad de volumen de concreto. Para determinar la cantidad del agregado fino, se realizó la suma de los volúmenes de los demás componentes (cemento, agua, aire, agregado grueso) y este resultado, se restó a 1 unidad volumen de concreto, para posteriormente multiplicar el resultado por el peso específico seco del agregado fino y así obtener su peso en Kg.

$$Vol_{absoluto} = Vol_{cemento} + Vol_{agua} + Vol_{aire} + Vol_{A.G}$$

$$Vol_{absoluto} = 0.117\ m3 + 0.205\ m3 + 0.02\ m3 + 0.362\ m3 = 0.704\ m3$$

$$Vol_{A.f} = 1 m^3 - Vol_{absoluto}$$

$$Vol_{A.f} = 1 m^3 - 0.704 m^3 = 0.296 m^3$$

A continuación, se procede a calcular la cantidad de agregado fino multiplicando el volumen por el peso específico.

$$Peso_{A.f} = Vol_{A.f} * Peso_{especifico}$$

$$Peso_{A.f} = 0.296 m^3 * 2683 kg/m^3 = 774.17 kg$$

Dando como resultado 774.17 kg de agregado fino que se deben utilizar para un metro cubico de concreto.

Luego de seguir todos los pasos del diseño de mezclas por el método ACI se logra obtener los datos de peso y volumen necesarios para la elaboración de los especímenes de concreto los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 24

Cantidades de material por metro cubico de concreto.

Elemento	Proporción real
Cemento=	368.71 Kg
Agua=	205 Lt
Agregado fino=	794.17 Kg
Agregado grueso=	884.57 Kg
Peso total por m3 de concreto=	2252.44 Kg

Nota. Se logra apreciar la cantidad necesaria del material para un metro cubico de concreto de 3000 psi, cabe recalcar que las cantidades son exactas por ello es necesario tener en cuenta un porcentaje de desperdicio, que, para este caso, fue tomado como el 15%, con el fin de satisfacer el volumen de mezcla necesaria para el ensayo de asentamiento.

Ahora bien, en la Tabla 25 se muestra los datos obtenidos del diseño de mezcla y la cantidad de fibra de acero necesaria para espécimen de cilindro de dimensiones 150mm x 300mm con sus

diferentes porcentajes (0.5 %, 0.75%, 1%).

Tabla 25

Cantidad de material para cilindro por cada % de RFA

Cantidad de material por porcentaje en Kg					
RFA (%)	Arena	Triturado	Agua	Cemento	FRA
0	4.84	5.39	1.10	2.25	0.00
0.5	4.84	5.39	1.10	2.25	0.0597
0.75	4.84	5.39	1.10	2.25	0.0895
1	4.84	5.39	1.10	2.25	0.1194

Nota. Al determinar la cantidad de material requerido para un metro cúbico de concreto de 3000 psi, fue posible calcular la cantidad específica de material que se debe sustituirse en las muestras en función de los distintos porcentajes empleados en el estudio.

De la misma forma, la Tabla 26 se presenta las cantidades de mezcla de concreto necesarias para elaborar una vigueta de dimensiones 150mm x 150mm x 500 mm con la cantidad de fibra de acero en sus diferentes porcentajes (0.5 %, 0.75%, 1%).

Tabla 26

Cantidad de material para vigueta por cada % de RFA.

Cantidad de material por porcentaje en Kg					
RFA (%)	Arena	Triturado	Agua	Cemento	FRA
0	9.65	10.75	2.49	4.48	0.00
0.5	9.65	10.75	2.49	4.48	0.1368
0.75	9.65	10.75	2.49	4.48	0.2053
1	9.65	10.75	2.49	4.48	0.2737

Elaboración y Curado de los Cilindros y Viguetas de Concreto de $f'c = 3000$ psi con la Adición de los Distintos Porcentajes de RFA.

Teniendo en cuenta los datos de la cantidad de material necesario en la elaboración de cada

cilindro y vigueta de concreto, se realizó el proceso de elaboración y puesta en curado de los mismos, esto, conforme a los parámetros de la NTC 550. El proceso se describe a continuación.

El registro fotográfico del procedimiento se puede ver en el (**Anexo I.** del presente documento.

Ahora bien, para la elaboración de cilindros y viguetas se hizo uso de moldes disponibles en el laboratorio del Instituto Tecnológico del Putumayo, además se hizo el prestamos de moldes faltante para cumplir con el muestreo planteado en la metodología de esta investigación. Posteriormente, se siguió los siguientes pasos:

Engrasado de moldes. Una vez recolectado los moldes, se engrasó cada uno de ellos con Acpm, como se observa en la Figura 13; esto, con el fin de evitar que el concreto se adhiera al molde y ocasionar algún desperfecto en los cilindros y viguetas al momento de desencofrarlos.

Figura 13

Engrasado de moldes



Cálculo de la masa de los materiales. Teniendo en cuenta el diseño de mezcla, se pesó cada uno de los materiales (Grava, Arena, Cemento, FRA, Agua), con el fin de usar la cantidad exacta de material en la elaboración de cada uno de los cilindros de concreto (Figura 14)

Figura 14

Cálculo de masa del Agregado fino.



Elaboración de la mezcla de concreto. Se realizó la mezcla de concreto con cada uno de los materiales (Grava, Arena, Cemento, Agua), hasta obtener una mezcla homogénea ver Figura 15, esto se efectuó para cada uno de los cilindros y viguetas con el fin de elaborarlos con las medidas exactas de cada material.

Figura 15

Elaboración de mezcla de concreto.



Adición de fibras de acero. Una vez realizada la mezcla de concreto con cada uno de los materiales (Grava, Arena, Cemento, Agua) se añadió las fibras de acero a la mezcla de manera homogénea y dispersa por toda su superficie y se mezcló nuevamente como se observa en siguiente figura.

Figura 16

Adición de RFA a mezcla de concreto.



Fundición y vibrado de cilindros y viguetas. Una vez realizada la mezcla de concreto con la adición de RFA se procedió a hacer la fundición y vibrado de cada molde cilíndrico y rectangular como se muestra en la Figura 17. Se añadiendo la mezcla en 3 capas iguales realizando el vibrado con una varilla de acero de punta redonda con 25 golpes por cada capa de mezcla incorporada uniformemente sobre su superficie, así mismo, se dio de 10 a 15 golpes con un martillo de goma alrededor de los cilindros y viguetas y finalmente se enrasó con la misma varilla con el fin de dejar la superficie del cilindro nivelada.

Figura 17

Incorporación y vibrado de la mezcla en vigueta.



Tiempo de fraguado cilindros de concreto y viguetas. Al terminar de fundir los cilindros y viguetas, se dejaron en un sitio sin mover durante 24 horas para posteriormente ser desencofrados, como se observa en la siguiente figura.

Figura 18

Fraguado de los cilindros y viguetas



Proceso de curado cilindros de concreto. Una vez terminado el tiempo de fraguado de los cilindros y viguetas, se desencofraron, se marcaron y se dejaron inmersos en recipientes plásticos con agua hasta que cumplieran sus respectivas edades de curado, que para la presente investigación fueron (7 días, 14 días, y 28 días), cabe destacar que el tiempo de curado para las viguetas fue únicamente de 28 días. Ver Figura 19.

Figuras 19

Proceso de Curado de los cilindros y viguetas.



Fase 3: Realización de Ensayos de Calidad del Concreto

Ensayo en Estado Fresco: Asentamiento (Slump) de la Mezcla de Concreto

La prueba de revenimiento es crucial en esta investigación porque permite evaluar la trabajabilidad del concreto fresco reforzado con fibras recicladas. Este ensayo proporciona una medida de la consistencia de la mezcla, lo cual es clave para asegurar una adecuada colocación, compactación y acabado del concreto en campo como en el caso de pavimentos rígidos.

Ahora bien, dado que la inclusión de fibras puede reducir la fluidez de la mezcla e influir en su manejabilidad, el ensayo de revenimiento permite verificar si la dosificación utilizada mantiene una trabajabilidad aceptable sin comprometer la homogeneidad ni provocar segregación o aglomeración de fibras.

Por lo tanto, se realizó el ensayo para los diferentes porcentajes de fibras y sin la adición de las mismas, colocando el cono de Abrams sobre una bandeja metálica lisa, se fijó y mantuvo seguro hasta ser llenado con la mezcla en tres capas, dando 25 golpes con la varilla de punta

redonda en cada capa (Figura 20), finalmente se retiró el cono de manera vertical para tomar la lectura de asentamiento para los 4 ensayos de revenimiento.

Figura 20

Prueba de asentamiento (Slump).



Ensayo en Estado Endurecido: Ensayo a compresión del concreto

Una vez finalizado el respectivo tiempo de curado de cada uno de los cilindros, se llevó a cabo el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros a diferentes edades de curado (7, 14 28 días), teniendo en cuenta los parámetros exigidos por la norma técnica colombiana NTC 673. (**Anexo J.**

Este método consiste en la aplicación de una carga axial de compresión a cilindros a una velocidad que está dentro de un intervalo prescrito hasta que ocurra la falla (Figura 21). La resistencia a compresión (f'_c) se calcula dividiendo la máxima carga alcanzada durante el ensayo entre el área de la sección transversal del espécimen

Figura 21

Ensayo de compresión de cilindros.



Ensayo en Estado Endurecido: Ensayo a flexión del concreto

De manera similar al anterior ensayo de laboratorio después de un tiempo de curado de 28 días se procedió a hacer la prueba a flexión de las viguetas teniendo en cuenta la norma técnica colombiana NTC 4025.

Este método permite determinar la resistencia a la tracción indirecta del concreto, útil especialmente para estructuras como losas, pavimentos y elementos sometidos a flexión. Consiste en aplicar una carga progresiva a una viga prismática de concreto, apoyada en sus extremos ver Figura 22, mediante dos puntos de carga ubicados en los tercios de la luz. Se mide la carga máxima soportada antes de la fractura, permitiendo calcular la resistencia a la flexión del concreto. (**Anexo K.**

Figura 22

Ensayo de resistencia a la flexión del concreto.



Resultados

Resultados del Ensayo de Asentamiento Slump

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir del ensayo de revenimiento.

Tabla 27

Datos de asentamiento con diferentes % FRA.

% Fibras de Acero	Reducción Estimada (%)	Asentamiento (cm)
0	0.0%	7.62
0.5	30.0%	5.334
0.75	45.0%	4.191
1	60.0%	3.048

Nota. En la tabla 27 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de revenimiento donde

se evidencia que una reducción de revenimiento a medida que se aumenta el porcentaje de

FRA. Fuente: Autores de investigación (2025).

Resultados del Ensayo de Compresión en Cilindros

Resultados de Resistencia a la Compresión (f'_c).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir del ensayo. Para observar a detalle los cálculos realizados se recomienda (**Anexo L**).

Tabla 28

Resultados de la resistencia a la compresión del concreto

Evaluación de la resistencia a la compresión del concreto (kg/cm^2)			
Adición FRA (%)	Tiempo de curado		
	7 días	14 días	28 días
0.00%	127.61	190.87	211.59
0.50%	147.68	226.46	232.04
0.75%	157.56	230.96	241.49
1.00%	153.23	222.84	234.66

Nota. En la tabla 28 se muestran los resultados obtenidos a los distintos días de curado, en donde se puede apreciar que los cilindros sin adición de ACF, obtuvieron el 100% de la resistencia para el que fueron diseñados a los 28 días de curado, cumpliendo con el F'_c de 210.9 Kg/cm^2 requerido por norma, además, se evidencia los cilindros con la adición FRA aumentaron su resistencia a compresión. Fuente: Autores de investigación (2025).

Resultados de Densidad de los cilindros.

A continuación, se muestran los resultados de densidad obtenidos en el ensayo. Para observar a detalle los cálculos realizados se recomienda (**Anexo L**).

Tabla 29

Resultados de densidad del concreto.

Evaluación de la densidad promedio del concreto (kg/m³)			
Adición RFA (%)	Tiempo de curado		
	7 días	14 días	28 días
0.00%	2403.04	2399.32	2377.91
0.50%	2352.78	2383.50	2380.70
0.75%	2326.72	2335.10	2408.63
1.00%	2500.76	2454.23	2439.34

Nota. En la tabla 29 presenta la densidad promedio del concreto (en kg/m³) con diferentes porcentajes de adición de fibras de acero recicladas (RFA) a 7, 14 y 28 días de curado. Se observa que la densidad varía ligeramente con el contenido de fibras y el tiempo de curado, destacando un incremento notable en la mezcla con 1.00 % de adición a lo largo del tiempo evaluado. Fuente: Autores de investigación (2025).

Resultados del Ensayo de Flexión en Cilindros

En la Tabla 30 se muestran los resultados experimentales de la prueba a flexión de las viguetas elaboradas en esta investigación.

Tabla 30

Resultados de la resistencia a la flexión del concreto.

Evaluación de la resistencia a la flexión (Mr)				
Adición de FRA (%)	Tiempo de curado (días)	Densidad prom (kg/m³)	Resistencia a la flexión prom (Mpa)	Tipo de falla promedio
0.00%	28	2474.20	3.38	En el centro
0.50%		2444.50	3.89	Cerca al centro
0.75%		2473.29	4.0	Cerca al centro
1.00%		2489.82	3.66	Cerca al centro

Nota. La tabla 30 presenta a los resultados de resistencia a la flexión del concreto con distintas adiciones de fibras de acero recicladas (FRA) tras 28 días de curado. Se observa un incremento en la resistencia con 0.75 % de FRA, alcanzando un valor máximo de 4.00 MPa. La mayoría de las fallas ocurrieron cerca del centro de la viga, indicando un comportamiento estructural uniforme en las mezclas evaluadas. Fuente: Autores de investigación (2025).

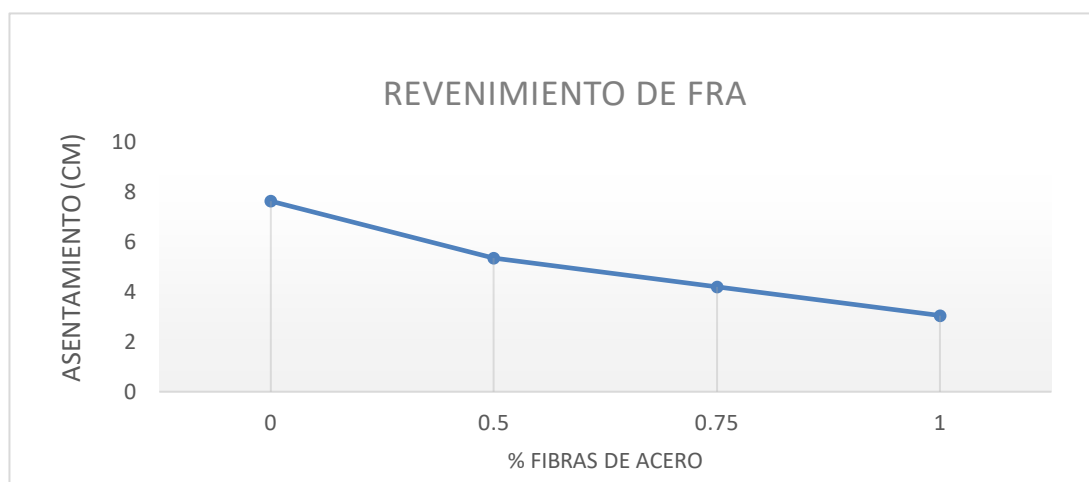
Análisis de resultados

En el desarrollo experimental de esta investigación se evaluó el comportamiento del concreto con adición de fibras de acero recicladas y siendo estas el material alternativo, aplicando tres ensayos fundamentales: Estimación de asentamiento (Slump), Resistencia a la compresión y resistencia a la flexión.

La Figura 23 muestra la curva de revenimiento, este ensayo Slump se realizó con el objetivo de evaluar la consistencia y trabajabilidad del concreto al incorporar fibras de acero reutilizadas, específicamente alambre galvanizado calibre 16, para diferentes porcentajes: 0%, 0.5%, 0.75% y 1%.

Figura 23

Curva de ensayo de revenimiento (Slump).



Nota. El gráfico muestra la disminución del asentamiento del concreto con el aumento del porcentaje de fibras de acero recicladas (FRA). A medida que se incrementa la cantidad de fibras, se reduce la trabajabilidad de la mezcla, reflejando una menor fluidez, lo cual es un comportamiento esperado debido a la interferencia mecánica de las fibras en el movimiento del concreto fresco. Fuente: Autores de investigación (2025).

Los resultados obtenidos del ensayo Slump muestran una tendencia descendente en el asentamiento conforme aumenta el contenido de fibras. La mezcla sin fibras presentó el mayor revenimiento (7.62 cm), lo que indica una elevada trabajabilidad. En cambio, la mezcla con 1% de fibras mostró una reducción del 60%, con un asentamiento de apenas 3.048 cm.

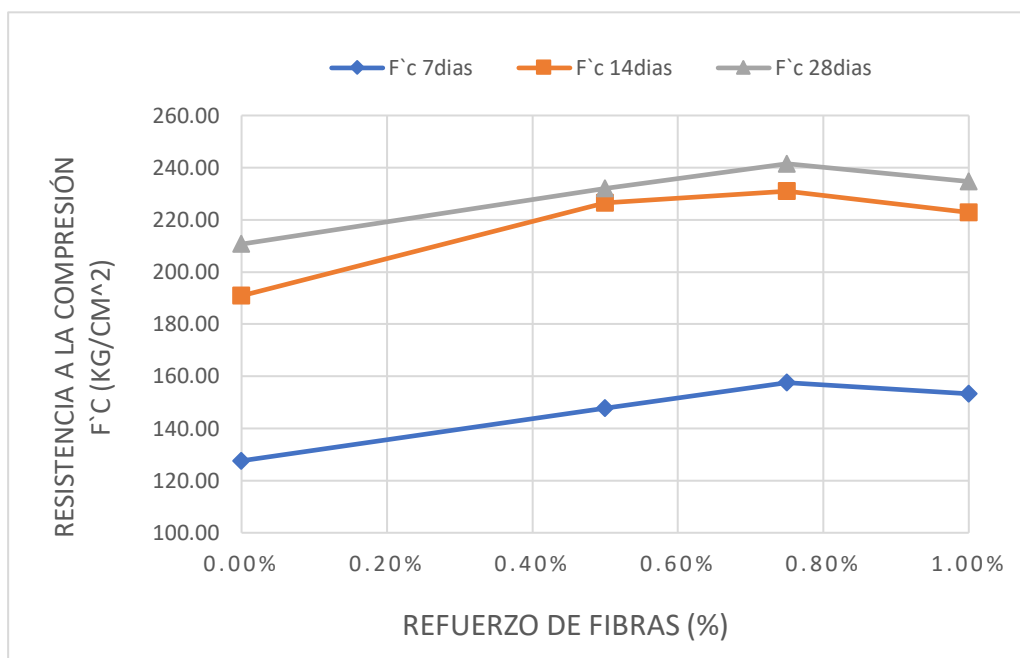
Esta disminución se debe principalmente a la presencia de las fibras de alambre galvanizado que, al ser elementos alargados e irregulares, generan una mayor fricción interna en la mezcla y dificultan su movilidad. Además, el uso de material reciclado puede implicar una mayor rugosidad superficial, lo cual también contribuye a una reducción en la fluidez del concreto.

Sin embargo, a pesar de la pérdida de asentamiento, los valores obtenidos se encuentran dentro de rangos viables para mezclas de concreto, especialmente en elementos que no requieren una alta fluidez. No obstante, se sugiere que, en aplicaciones prácticas, este tipo de mezcla sea colocada con adecuada vibración o asistencia mecánica, para asegurar una correcta compactación y evitar vacíos.

Ahora bien, en el ensayo a compresión de los cilindros se llevó a cabo con el fin de evaluar el efecto del uso de fibras de acero reutilizadas (alambre galvanizado calibre 16) en la resistencia a la compresión del concreto a distintas edades de curado: 7, 14 y 28 días ver Figura 24. Se emplearon cuatro porcentajes de adición de fibras: 0%, 0.5%, 0.75% y 1.0%

Figura 24

Curva Resistencia a la compresión del concreto.



Nota. En la Figura 24 se observan las curvas obtenidas en ensayo a compresión para 7, 14 y 28 días de curado. Fuente: Autores de investigación (2025).

Al hacer un énfasis en cuanto a la resistencia de la compresión del concreto se observa que todas las mezclas mostraron un incremento en resistencia con el aumento de los días de curado, lo cual indica un buen desarrollo del fraguado y ganancia de resistencia en el tiempo.

Las mezclas con 0% de fibras obtuvo las resistencias más bajas en todos los intervalos de tiempo. A medida que se incorporaron fibras, la resistencia aumentó, alcanzando su valor máximo con 0.75% de fibras a los 28 días de curado, la mezcla alcanzo 241.49 Kg/cm², con un incremento del 14.6% respecto a la mezcla sin fibras.

No obstante, al incrementar el contenido de fibras al 1%, se observa una ligera disminución en la resistencia (234.66 Kg/cm²), aunque sigue siendo mayor que la mezcla de partida.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este ensayo, se puede deducir que las fibras

de acero mejoran la cohesión interna del concreto, limitando la formación y propagación de microgrietas, lo que contribuye al incremento en la resistencia a compresión.

Sin embargo, a partir de cierto porcentaje $>0.75\%$, puede haber saturación o mala distribución de fibras, lo que genera discontinuidades en la matriz del concreto y disminuye su desempeño.

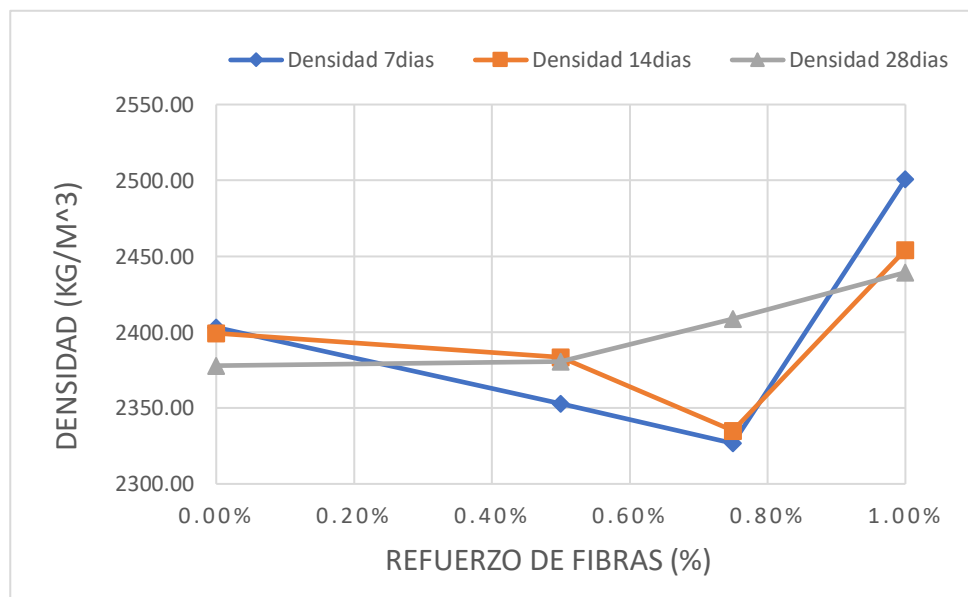
Dentro de este marco, la curva de la densidad promedio del concreto (Figura 25) muestran disminución inicial de la densidad con 0.5% y 0.75% de fibras, sobre todo a los 7 y 14 días. Esto puede deberse a una distribución no homogénea de las fibras, que ocasiona una ligera pérdida de compacidad o incorporación de aire en el mezclado.

Igualmente se observar que la densidad del concreto aumenta considerablemente con 1% de fibras, alcanzando un valor de 2500.76 Kg/m^3 a los 7 días, el más alto de todos.

Este comportamiento puede explicarse por una mayor cantidad de fibras de acero en la mezcla, que aportan peso y densidad al concreto. Además, su efecto de confinamiento mejora la cohesión interna, lo que puede facilitar una compactación más eficiente.

Figura 25

Curva densidad promedio del concreto.



Nota. La gráfica presenta la variación de la densidad del concreto a 7, 14 y 28 días de curado con diferentes porcentajes FRA. Se observa una disminución progresiva de la densidad hasta 0.75 % de fibras, seguida de un aumento significativo al 1.00 %, lo que puede indicar una mejor compactación o distribución de fibras a ese nivel de adición.

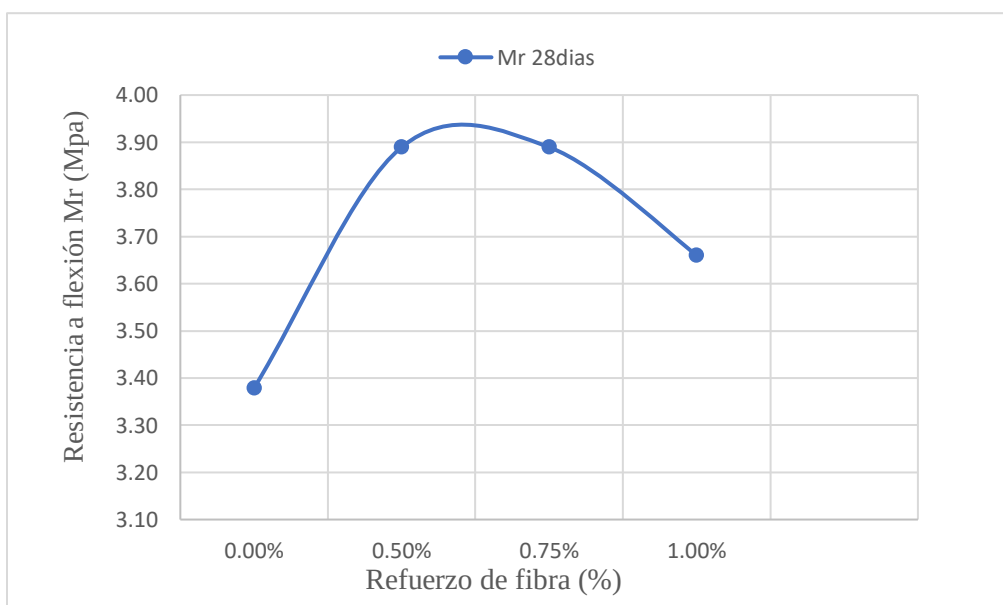
Fuente: Autores de investigación (2025).

La mezcla con 0.75% de fibras, pese a tener una densidad más baja a 7 y 14 días, obtiene la mayor resistencia a la compresión a los 28 días. Esto sugiere que no solo la densidad importa, sino también la interacción adecuada de las fibras, así como la trabajabilidad y distribución interna de los componentes.

Por último, la Figura 26 muestra la curva obtenida del ensayo de resistencia a la flexión que se realizó para un tiempo de curado de 28 días con el fin de observar el comportamiento del concreto con fibras de acero reutilizadas (FRA)

Figura 26

Curva resistencia a flexión del concreto.



Nota. En la Figura 26 se observan la curva obtenida para el ensayo a flexión donde

se tiene en cuenta la resistencia a flexión (M_r) y el % de fibra. Fuente: Autores de investigación (2025).

La grafica muestra una tendencia parabólica, donde el pico máximo de resistencia se da entre 0.5% y 0.75% de fibras logrando un incremento del 15% en la resistencia a la flexión respecto al concreto sin fibras. Visto de esta forma, los porcentajes muestran una efectiva distribución y anclaje de las fibras, actuando como puentes de transferencia de esfuerzos de tracción.

Aunque la resistencia a la flexión con 1% de fibras sigue siendo superior a la del concreto sin fibras, presenta una ligera disminución frente a los resultados de 0.5% y 0.75%. Este descenso puede deberse a una sobrecarga de fibras, que dificulta la trabajabilidad y provoca vacíos o malas compactaciones.

Discusión

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados evidencian el impacto que tiene la incorporación de fibras de acero reutilizadas, específicamente alambre galvanizado calibre 16, en las propiedades del concreto. Su comportamiento se analizó en función de la trabajabilidad, la resistencia a la compresión, la densidad y la resistencia a la flexión, con porcentajes de fibra de 0%, 0,5%, 0,75% y 1%.

En primer lugar, el ensayo de revenimiento mostro una reducción progresiva en la trabajabilidad del concreto conforme se aumentó el contenido de fibras. Esta tendencia, reconocida por la normativa INVIAS (INV.E-225), es coherente con la naturaleza física del refuerzo: al ser elementos alargados, las fibras incrementan la fricción interna de la mezcla, dificultando su fluidez. No obstante, los valores obtenidos, aunque decrecientes, se mantuvieron dentro de rangos aceptables para concretos estructurales. Este resultado sugiere que el uso de fibras recicladas puede ser viable si se ajustan los métodos de colocación y compactación, utilizando vibradores o aditivos plastificantes si fuera necesario.

Respecto a la resistencia a la compresión, se evidencio un aumento significativo con la inclusión de fibras, especialmente con 0.75% de adición. A los 28 días de curado, se obtuvo un incremento del 14.6% en comparación con la mezcla convencional. Este comportamiento puede atribuirse a la función de las fibras como puentes que limitan el crecimiento de micro fisuras y mejoran la cohesión interna del concreto. Sin embargo, al aumentar a 1% de fibras, la resistencia disminuyo ligeramente, lo que sugiere un límite optimo de refuerzo. Esta situación podría estar relacionada con una distribución heterogénea de las fibras o con la formación de zonas débiles debido a la sobresaturación del refuerzo, un fenómeno también reconocido en estudios técnicos y congruente con la teoría del concreto reforzado con fibras (FRA).

La densidad del concreto se comportó de manera variable. Aunque en los primeros días la mezcla con un porcentaje de fibra de 0.75% presento valores menores, esto no se tradujo en una disminución de resistencia, lo cual evidencia que una densidad ligeramente menor no implica necesariamente un mal desempeño mecánico si las fibras están bien distribuidas. A los 7 días de curado, la mezcla con 1% de fibras mostro la mayor densidad. Sin embargo, esta mayor densidad no se tradujo en el mejor comportamiento, lo que sugiere que el contenido de fibras debe optimizarse, no maximizarse.

Finalmente, el ensayo de resistencia a la flexión reflejo el aporte más representativo del refuerzo con fibras. La curva obtenida mostro una tendencia parabólica, alcanzando su punto máximo entre 0.5% y 0.75% de fibras, donde se presentó un aumento del 15% respecto a la mezcla sin fibras. Este comportamiento confirma el papel de las fibras como mecanismo de absorción y transferencia de esfuerzos de tracción, muy útil en elementos sometidos a cargas flexionantes como viguetas, placas o losas. La ligera caída observada al 1% de adición reafirma la importancia de una dosificación optima, ya que un exceso puede entorpecer la compactación y generar zonas débiles.

Todos estos resultados indican que la adición de fibras de acero reutilizadas mejora significativamente el comportamiento del concreto, especial su resistencia a flexión y compresión, siempre que se mantenga una proporción adecuada, preferiblemente entre 0.5% y 0.75%. Además, se destaca el potencial del uso de materiales reciclados en mezclas estructurales, lo cual representa una oportunidad desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. Este enfoque está alineado con prácticas sostenibles de la construcción y con las recomendaciones generales de innovación en materiales que promueve la normativa colombiana.

Conclusiones

Los agregados pétreos que se utilizaron en la mezcla se lograron caracterizar de manera adecuada, lo que ayudó a cumplir con las especificaciones establecidas en la norma INVIAS, en cuanto a granulometría, densidad relativa, desgaste, gravedad específica y demás parámetros. Teniendo en cuenta la caracterización, se aseguró una buena la calidad en el diseño de mezcla para la elaboración del concreto, siendo de vital importancia para garantizar el buen desempeño.

Se incorporaron de manera correcta las fibras de acero recicladas calibre 16 para los porcentajes de 0.50%, 0.75% y 1.0%. También se desarrollaron mezclas de concreto con una resistencia característica de 3000 psi. La dosificación realizada mostró que, para una adición con el porcentaje de 0.75%, se obtuvieron mejores resultados, lo que permitió un equilibrio entre trabajabilidad y desempeño mecánico, sin comprometer la homogeneidad de la mezcla.

El revenimiento mostró una ligera reducción de trabajabilidad con el aumento de fibras, sin afectar significativamente la colocación.

Para una mezcla con un porcentaje de 0.75% de fibras, en cuanto a la resistencia a la compresión, se presentó un incremento del 14.6% respecto a la mezcla sin fibras. Mientras tanto, los ensayos de flexión reflejaron un aumento del 15% en los especímenes con 0.5% y 0.75% de fibras, demostrando una mejora en la ductilidad y tenacidad del concreto.

Al realizar la comparación de resultados se evidencio que el concreto reforzado con fibras de acero calibre 16 tuvo un mejor comportamiento mecánico frente al concreto convencional. Sin embargo, aunque la densidad mostró valores variables, la mezcla con mayor densidad (1%) no fue la que presentó mejores propiedades resistentes, lo cual indica que la resistencia no depende únicamente de la densidad, sino que también tiene en cuenta la importancia de una adecuada integración de materiales.

El uso de fibras recicladas representa una alternativa sostenible y funcional para mejorar

el comportamiento del concreto.

Recomendaciones

Se recomienda implementar ensayos adicionales como resistencia al impacto, absorción de agua y durabilidad; con el fin de ampliar la caracterización del concreto reforzado con fibras de acero reciclado y validar su comportamiento en condiciones reales de uso.

Se recomienda emplear fibras de acero recicladas en proporciones entre 0.5% y 0.75% en peso respecto al total de la mezcla. Estos rangos han demostrado proporcionar un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica, trabajabilidad y cohesión de la mezcla.

Es indispensable garantizar una distribución uniforme de las fibras dentro del concreto. Para ello, se recomienda un tiempo de mezclado prolongado al igual que el uso de equipos adecuados de compactación y vibrado con el fin de asegurar la correcta integración de fibras sin formación de grumos o zonas débiles.

Cuando se realicen mezclas con adición de fibras de acero recicladas, se recomienda incorporar el uso de aditivos superplastificantes para mejorar la trabajabilidad sin afectar la relación agua/cemento. Todo esto con el fin de facilitar el manejo de la mezcla y evitar problemas de pérdida de asentamiento.

El uso de ensayos post-fisuración es de vital importancia para elementos estructurales como vigas ya que ayudan a evaluar la capacidad del concreto reforzado con fibras para controlar y limitar la propagación de fisuras bajo cargas posteriores al agrietamiento inicial. Es por ello que se recomienda profundizar en la investigación y tener en cuenta este tipo de ensayos.

Se sugiere realizar mezclas experimentales con diferentes contenidos de fibras de acero, variando entre 0.5% y 1.0% en peso, con incrementos graduales como lo es para 0.1%, con el fin de establecer de forma precisa el comportamiento del material y determinar la dosificación óptima según el tipo de aplicación.

Referencias

<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870/chapter/chapter14>

Abanto, T. (2017). *Tecnología del concreto. (Tercera edición)*. Lima: San Marcos.

ACI Committe 544. (2014). Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*.

Burrati. (2010). Experimental study on the flexural behaviour of fibre reinforced concretes strengthened with steel and macro-synthetic fibres. . 23-28.

Cañas, S. (2017). *Prueba de Revenimiento*.

CEMEX. (2015). *Soluciones en Concreto para un Futuro Sostenible*. Obtenido de <https://www.cemex.com/documents/20143/245957/2015-informe-sustentable.pdf/77520ab6-5fc1-8577-fc04-9fc8b5c01981?t=1495648896118>

Centro nacional de producción más limpia. (Noviembre de 2007). *Guía ambiental para la producción limpia en el cultivo de frijol a partir del estudio de caso de los cultivos en el Valle de Sibundoy - Putumayo*. Obtenido de Producción Limpia y buenas prácticas ambientales aplicadas al cultivo de frijol en el Valle de Sibundoy - Putumayo: https://www.corpoamazonia.gov.co/files/otros/publicaciones/Publicaci%C3%B3n_%20Fr%C3%ADjol.pdf

Concreto, I. d. (2000). *Asocreto tecnologia y porpiedades*. Bogota.

Corpoamazonia. (2010). *Plan de Ordenación y manejo de la cuenca alta del rio Putumayo*. Mocoa.

Fernandez. (2010). *Que es la ingenieria sostenible*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/347521471_QUE_ES_LA_INGENIERA_CIVIL_SOSTENIBLE_PDF

Guzmán, D. S. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. (P. U. Javeriana, Ed.). Obtenido de Bhandar Editores LTDA: <https://books.google.com.co/books?id=EWq-QPJhsRAC>

investigación, A. d. (2025). *ANEXO A*. Mocoa.

Hernández, A. D., & Zambrano, E. C. (2023). Evaluación de la resistencia a la compresión del concreto

de $f'c = 2500$ psi al aprovechar la cascarilla del frijol (*Phaseolus vulgaris*) como material de

agregado fino. *título de Ingeniero Civil*. Instituto Tecnológico del Putumayo, Colon.

INVIAS. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*.

Monteiro, P., & Kumar, M. (2014). *El hormigón en la era del calentamiento global y la sostenibilidad*.

(4. e.-H. Education., Ed.) Obtenido de Cap. 14 en Hormigón: Microestructura, propiedades y materiales:

Mayta Posadas, J. (2015). *HISTORIA DE LOS CAMINOS INTRODUCCION*. Obtenido de

https://www.academia.edu/13901084/HISTORIA_DE_LOS_CAMINOS_INTRODUCCION

Mejia. (2002). *Consistecia*. Obtenido de

<https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/La%20Consistencia%20del%20Suelo.pdf>

Mello, e. a. (2014). Improving Concrete Properties with Fibers Addition. Scielo. *scielo*, 249-254.

Mora, L. F., & Andrade, G. (2018). *Construcción de vulnerabilidad en humedales altoandinos integrados*

con sistemas ganaderos. valle de Sibundoy, Putumayo, Colombia: Especial cambio climático,

4(1), 29.

Paez. (1986). *Importancia del Hormigon en la ingenieria*. Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/337772988_IMPORTANCIA_DEL_HORMIGON_EN
_LA_INGENIERIA_CIVIL_UNIVERSIDAD_TECNICA_DE_MANABI_FACULTAD_DE
_CIENCIAS_MATEMATICAS_FISICAS_Y_QUIMICAS_CARRERA_DE_INGENIERIA_CIVIL_PROFESOR](https://www.researchgate.net/publication/337772988_IMPORTANCIA_DEL_HORMIGON_EN_LA_INGENIERIA_CIVIL_UNIVERSIDAD_TECNICA_DE_MANABI_FACULTAD_DE_CIENCIAS_MATEMATICAS_FISICAS_Y_QUIMICAS_CARRERA_DE_INGENIERIA_CIVIL_PROFESOR)

Sing, S. (2004). Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Scielo*.

Toribio Huamani, D. R., & Ugaz Arenas, J. A. (2021). *EVALUACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO*

CON FIBRAS DE ACERO RECICLADAS PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES DE UN

PAVIMENTO RÍGIDO. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL, Perú.

Vélez, L. M. (2010). *Permeabilidad y Porosidad en concreto*. Obtenido de Facultad de Tecnologías,

Instituto Tecnológico Metropolitano:

<https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/869/131-Manuscrito-245-1-10->

20170208.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Zollo, R. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 107-122.

Anexos

Anexo A. Informe de granulometría. Se encuentra en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo B. Informe del alargamiento. Se encuentra en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo C. Informe presencia de impurezas orgánicas en arenas usadas para la preparación de morteros o concretos. Se encuentra en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo D. Informe Resistencia al desgaste en máquina de los ángeles. Se encuentra en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo E. Informe de densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto. Se encuentra en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo F. Informe del ensayo de densidad y absorción del agregado fino. Se encuentra en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo G. Informe de densidad y absorción del agregado grueso. Se encuentra en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo H. Cálculos para el diseño de mezcla de concreto de $f'c=3000$ psi por el método

ACI. Se encuentra en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo I. Registro fotográfico de la elaboración y curado de los cilindros de concreto de $f'c=3000$ psi con la adición de los distintos porcentajes de FRA. Se encuentra en el siguiente enlace. https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo J. Informe del ensayo de resistencia a la compresión del concreto. Se encuentra en el siguiente enlace. https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo K. Informe del ensayo de resistencia a la flexión del concreto. Se encuentra en el siguiente enlace. https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo L. Cálculos del ensayo de resistencia a la compresión del concreto. Se encuentra en el siguiente enlace. https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo M. Cálculos de los ensayos de los agregados grueso y fino. Se encuentra en el siguiente enlace. https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl

Anexo N. Cálculos de la cantidad de materiales para la elaboración de los cilindros de concreto. Se encuentra en el siguiente enlace https://drive.google.com/drive/folders/1_dKmM-bhh1NP4DayvU4it-wyXhfwyKtl