

**EFFECTO DEL USO DE RESIDUOS DE ALUMINIO, ADICIONADO EN DIFERENTES
PORCENTAJES EN UNA MEZCLA DE HORMIGON.**



**FABIAN ANDRES GALVIS VASQUEZ
LUIS MIGUEL VERGARA ARRIETA**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS**

2017

**EFFECTO DEL USO DE RESIDUOS DE ALUMINIO, ADICIONADO EN DIFERENTES
PORCENTAJES EN UNA MEZCLA DE HORMIGON.**

GEOTECNIA Y MATERIALES (GEOMAVIT)

Grupo de investigación

MATERIALES DE CONSTRUCCION

Línea de investigación

FABIAN ANDRES GALVIS VASQUEZ

LUIS MIGUEL VERGARA ARRIETA

Autores

MODESTO BARRIOS FONTALVO

Director

TRABAJO DE GRADO



**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS**

2017

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	10
1. MARCO REFERENCIAL	12
1.1. ANTECEDENTES.....	12
1.2. ESTADO DEL ARTE	16
1.3. MARCO TEORICO	20
1.3.1. El cemento	20
1.3.2. Cemento portland.....	21
1.3.2.1. Propiedades físicas y mecánicas del cemento portland.....	21
1.3.2.1.1. Densidad	22
1.3.2.1.2. Finura.....	22
1.3.2.1.3. Consistencia normal.....	22
1.3.2.1.4. Fraguado.....	22
1.3.2.1.5. Calor de hidratación	23
1.3.2.1.6. Resistencia del cemento.....	23
1.3.3. Los agregados o áridos.....	23
1.3.3.1. Clasificación de los agregados	24
1.3.3.1.1. Clasificación según su origen.....	24
1.3.3.1.1.1. Agregados naturales.....	24
1.3.3.1.1.2. Agregados artificiales.....	24
1.3.3.1.2. Clasificación según su densidad.....	24
1.3.3.1.3. Clasificación según su tamaño.....	24
1.3.3.2. Propiedades físicas de los agregados.....	25
1.3.3.2.1. Granulometría.....	25
1.3.3.2.2. Módulo de finura.....	25
1.3.3.2.3. Tamaño Máximo.....	25
1.3.3.2.4. Tamaño Máximo Nominal.....	25
1.3.3.2.5. Densidad.....	26
1.3.3.2.5.1. Densidad real.....	26
1.3.3.2.5.2. Densidad nominal.....	26

1.3.3.2.5.3. Densidad aparente.....	26
1.3.3.2.6. Absorción y humedad.....	26
1.3.3.2.7. Masa unitaria.....	27
1.3.3.2.8. Resistencia.....	27
1.3.3.2.9. Manejo y almacenamiento de los agregados.....	28
1.3.4. Agua de una mezcla.....	28
1.3.5. El concreto.....	29
1.3.5.1. Propiedades del concreto.....	30
1.3.5.1.1. Manejabilidad del concreto.....	30
1.3.5.1.2. Medición de la manejabilidad del concreto.....	30
1.3.5.1.3. Resistencia a la compresión del concreto.....	31
1.3.5.1.4. Resistencia a la flexión del concreto.....	33
1.3.5.2. Factores que afectan la resistencia del concreto.....	35
1.3.5.2.1. Tipo de agregado.....	35
1.3.5.2.2. Tiempo, temperatura y humedad.....	35
1.3.5.2.3. Curado del concreto.....	35
1.3.5.2.4. Tipo de cemento.....	36
1.3.6. El aluminio.....	36
1.3.6.1. Generalidades técnicas del aluminio.....	37
1.3.6.2. Propiedades físicas del aluminio.....	37
1.3.6.2.1. Color.....	37
1.3.6.2.2. Conductividad.....	38
1.3.6.2.3. Resistencia a la corrosión.....	38
1.3.6.2.4. Elasticidad.....	38
1.3.6.3. Propiedades mecánicas del aluminio.....	38
1.3.6.3.1. Resistencia a la ruptura.....	38
1.3.6.3.2. Resistencia a la tensión.....	39
1.3.6.3.3. Resistencia a la flexión.....	39
1.3.6.3.4. Módulo de elasticidad.....	39
2. OBJETIVOS.....	40
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	40
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	40

3. ALCANCE	42
3.1. DELIMITACIÓN ESPACIAL.....	42
3.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL	42
3.3 DELIMITACIÓN CONCEPTUAL.....	43
3.4. RESULTADOS ESPERADOS	43
3.5. PRODUCTO FINAL A ENTREGAR.....	43
3.6. PRODUCTOS COMPLEMENTARIOS.....	44
3.7. LIMITACIONES.....	44
4. METODOLOGIA	45
4.1. REVISION BIBLIOGRAFICA.....	45
4.2. RECOLECCION DEL MATERIAL RECICLADO	46
4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA VIRUTA DE ALUMINIO	46
4.4. ELABORACION DE MUESTRAS DE CONCRETO	46
4.5. ENSAYO DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO	47
4.6. ANALISIS DE RESULTADOS	47
5. RESULTADOS Y DISCUSION	48
5.1. CARACTERIZACION DE LA VIRUTA DE ALUMINIO	48
5.1.1. GRANULOMETRIA.....	48
5.1.2. PESO UNITARIO (BULK)	50
5.2. ENSAYO DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO	53
5.2.1. PROPIEDADES FISICAS.....	53
5.2.2. ENSAYOS MECANICOS.....	56
6. CONCLUSIONES	61
7. RECOMENDACIONES	64
8. BIBLIOGRAFIA	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ensayo de asentamiento	31
Figura 2. Máquina de ensayo a compresión	33
Figura 3. Ubicación de la Universidad de Cartagena, sede Piedra de Bolívar.	42
Figura 4. Metodología a seguir para el cumplimiento de los objetivos.....	45
Figura 5. Limpieza manual de la viruta de aluminio.....	48
Figura 6. Tamizado de la viruta de aluminio.....	49
Figura 7. Curva granulométrica de la viruta de aluminio.....	50
Figura 8. Proceso de medición del peso unitario viruta de aluminio en el laboratorio... ..	51
Figura 9. Mediciones para determinar la densidad y la absorción.	54
Figura 10. Porcentaje de adición de viruta de aluminio en la mezcla vs densidad del concreto resultante.....	55
Figura 11. Concreto expandido en estado fraguado y en momentos posteriores al vaciado en estado plástico	56
Figura 12. Resistencia a la compresión vs edades del concreto a diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio.	58
Figura 13. Resistencia a la compresión y flexión a edad de 28 días vs porcentajes de adición de viruta de aluminio.	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de análisis granulométrico para la viruta de aluminio	49
Tabla 2. Datos de la calibración de la capacidad del balde	50
Tabla 3. Calculo del peso unitario compactado de la viruta de aluminio.....	51
Tabla 4. Calculo del peso unitario suelto de la viruta de aluminio	52
Tabla 5. Peso unitario de la viruta de aluminio	52
Tabla 6. Medida de asentamiento de mezclas con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio	53
Tabla 7. Absorción del concreto a diferentes porcentajes de adición de aluminio	54
Tabla 8. Densidad del concreto a diferentes porcentajes de adición de aluminio	54
Tabla 9. Cargas máximas soportadas a la compresión	56
Tabla 10. Esfuerzo a la compresión de muestras con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio en MPa y psi.....	57
Tabla 11. Variación del esfuerzo a la compresión de muestras con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio	57
Tabla 12. Módulo de rotura de muestras de concreto con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio en Mpa.....	59
Tabla 13. Variación del Módulo de rotura de muestras de concreto con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio	59

RESUMEN

Con el siguiente trabajo de investigación se buscó determinar si el hormigón simple adicionado con viruta de aluminio, puede ser utilizado como material alternativo para la construcción, a través del estudio de su influencia en la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, absorción, el peso específico, y la manejabilidad del mismo. De esta manera se podrá dar una disposición a los residuos de aluminio en estado de viruta.

La forma de determinar la variación en las características físicas y mecánicas del hormigón, fue a través del estudio de muestras de concreto las cuales fueron adicionadas con 5%, 10% y 20% de viruta de aluminio, que por su parte fue obtenida a partir de una recolección en distintos lugares donde dicho material era utilizado. Esta fue debidamente caracterizada y así se procedió a la elaboración y posterior comparación con muestras de concreto realizadas con un diseño de mezcla tradicional (sin adición), en el laboratorio. Para la densidad del concreto se encontró una disminución de la misma hasta del 15, 23% con respecto a la muestra patrón (0% de adición) a medida que aumentaba el porcentaje de adición de aluminio.

En cuanto a características mecánicas se encontró una disminución de la Resistencia a la compresión $F'c$ del 72%, 74% y 84%, para muestras con 5%, 10% y 20% de adición de aluminio respectivamente, tomando como referencia las muestras sin adición de aluminio, lo cual es una variación muy desfavorable en una característica tan importante del concreto como material estructural. Por esto último y además por mal comportamiento a flexión no se recomienda el uso de concreto adicionado con viruta de aluminio en ninguno caso.

Palabras claves: Concreto, adición, viruta de aluminio, resistencia a compresión, resistencia a flexión, peso específico, absorción, manejabilidad.

ABSTRACT

The intention of the following research is to determine if the simple concrete added with aluminum chip, can be used as alternative material for construction, through the study of its influence on the resistance to compression, the resistance to flexion, absorption, specific weight, and manageability of it. Thus a provision may be waste of aluminum in chip status.

The way to determine the variation in physical and mechanical characteristics of concrete, was through the study of samples of concrete added with 5%, 10% and 20% aluminum chip and the comparison with samples of concrete made with a mix design traditional (without addition), in the laboratory. For concrete density pattern (0% addition) found a decrease of the same up to the 15, 23% with respect to the sample as it increased the percentage of aluminum addition.

In terms of mechanical characteristics was found a decrease in resistance to compression F_c 72%, 74% and 84% for samples with 5%, 10% and 20% of addition of aluminum respectively, taking as a reference the samples without addition of aluminum, which is one very unfavorable variation in an important characteristic of concrete as a structural material. For this last, and also by bad behavior to bending is not recommended the use of concrete added with aluminum in none case chip.

Key words: concrete, addition, chip aluminium, compressive strength, flexural strength, weight specific, absorption, manageability.

INTRODUCCION

En la actualidad la gran mayoría de los procesos o tecnologías desarrolladas para la construcción de un producto tienen un gran enfoque ambiental con el fin de disminuir el impacto producido hacia el medio ambiente. (UNICEF). De esta manera se han ido utilizando nuevas técnicas al momento de realizar la producción del concreto buscando optimizar sus propiedades y al mismo tiempo darle un mejor uso, por ejemplo, a algunos residuos resultantes de diferentes procesos de producción y transformación de materia prima.

Las pocas alternativas de aprovechamiento que hay actualmente para los desechos resultantes de trabajos con aluminio, llevaron a generar la incógnita acerca de la posibilidad de darle una alternativa útil en una mezcla de concreto tradicional de tal manera que se obtuvieran mejores resultados en las propiedades del mismo y al tiempo disminuir el impacto ambiental que pudiera generar la mala disposición de los residuos de aluminio, teniendo en cuenta que no tiene ningún uso programado.

Cabe resaltar que no se encontraron antecedentes de un estudio donde se utilizara la adición o reemplazo del mismo material empleado en este trabajo de investigación en una mezcla de concreto simple en el departamento de Bolívar, lo que lo convierte en un tema de interés ya que amplía el conocimiento, buscando nuevas alternativas para mejorar las características de un material en el campo de la construcción como lo es el concreto que está en constante estudio con el fin de su optimización y evolución, y a la vez una manera diferente para la disposición final de un residuo bastante común en la ciudad de Cartagena y el cual no está teniendo ningún tipo de alternativa útil y está afectando por ende de manera negativa el medio ambiente.

Sin embargo se hallaron investigaciones que incorporaban otro tipo de materiales reciclados a nivel nacional y global como plásticos, restos de neumáticos, restos vegetales

como el cuesco de palmas africanas y materiales de construcción reciclados, compartiendo los fines y asemejándose sus objetivos a los de este documento.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la ciudad de Cartagena con materiales propios de la zona. Se realizó la modificación de un diseño de mezcla de concreto hidráulico tradicional, adicionando diferentes proporciones del residuo de aluminio respecto al volumen total de la mezcla.

A las muestras de concreto fresco y fraguado se les realizó un análisis adecuado de a las propiedades físicas y mecánicas seleccionadas bajo los parámetros de las Normas Técnicas Colombianas (NTC) y las normas establecidas por el Instituto Nacional de Vías INVIAS. Los resultados se compararon con el comportamiento del concreto de la mezcla original (concreto sin adición de aluminio) para determinar las variaciones de las propiedades del mismo.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. ANTECEDENTES

En el proceso de revisión bibliográfica, no se encontraron en las bases de datos referencias de estudios en los que se analizaran el efecto y las variaciones en las propiedades físicas y mecánicas del concreto con la implementación de virutas de aluminio como agregado fino, ni a manera de aditivo, ni de reemplazo.

Sin embargo, si se mira la utilización del aluminio en el hormigón como la incorporación de un material reciclado en la mezcla tradicional del mismo como línea de investigación, se puede decir que se encontraron investigaciones del mismo tema. Desde la utilización de materiales metálicos, como virutas de acero y granallas residuos de procesos industriales, hasta materiales orgánicos, e incluso el reciclaje de agregados procedentes de construcciones que ya cumplieron su vida útil y por ende fueron demolidas.

Todo lo anterior buscando economía o mejores propiedades en el hormigón simple, tales como la resistencia a la compresión, la tracción o la densidad, comparadas con muestras patrón de concretos fabricados sin ningún material diferente a los tradicionales. Además también fueron comunes los estudios de la adiciones de escorias de diferentes materiales a cementos para mejorar la resistencia.

En las investigaciones consultadas no se encontró un cumplimiento total de los resultados esperados en lo que concierne a las características y propiedades de la mezcla de concreto adicionado con diferentes materiales, principalmente, en cuanto a mejorías en la resistencia a la compresión y a la flexión, lo que motiva a seguir innovando con otros materiales, con el fin de encontrar como resultado un mejor comportamiento mecánico del concreto. A continuación se mencionan algunos casos de estudio a nivel local.

- **Estudio y caracterización del residuo de la fabricación de tuberías en acero para determinar su uso en la producción de morteros y concretos.** (Luis Carlos Martínez Conde & Marco Antonio Hurtado Cardona, 2014) Universidad de Cartagena.

En este trabajo de grado se muestra la influencia del residuo generado en la producción de tuberías en acero en la matriz del cemento a través de ensayos a muestras de morteros y concretos para comprobar si puede ser usado como material alternativo en la industria de la construcción. Para tal fin se agregaron proporciones establecidas de residuo de acero al cemento y al concreto del 5, 10, 15, 20, 25 % en peso, y se realizaron ensayos de finura, peso específico, tiempo de fraguado y consistencia normal. Para la realización de los ensayos se utilizó cemento argos, canto rodado, arena, el residuo generado en la fabricación de las tuberías en acero, kerosene y equipos de prueba tales como la maquina universal, tamices, balanzas, aparato de vicat, frasco volumétrico de le chatelier, termómetro, embudo de vidrio, vaso de precipitado, cronometro, entre otros. Después de realizar los ensayos se pudo obtener que el residuo produce un efecto negativo sobre la mezcla de mortero y concretos, lo cual no era lo esperado, aunque se tuvo en cuenta que los materiales que conforman la mezcla de concreto son totalmente influyentes en la resistencia final de la misma, además del correcto cuidado de la mezcla post-fraguado, donde se presenta perdida de humedad, contrarrestada con un correcto curado; los resultados obtenidos se presentan como: aumento de la consistencia normal en el 90% de las muestras ensayadas, disminución de las penetraciones en el 94% de las muestras ensayadas, aumento del peso específico del cemento en el 100% de las muestras ensayadas; además disminuyó la finura siendo la muestra con el 25 % de proporción la más afectada; así mismo disminuyó la consistencia normal y el tiempo de fraguado. Después de analizar los resultados se recomienda no usar el residuo generado por la fabricación de tuberías en acero, para aumentar la resistencia de morteros y concretos ya que produce un efecto contrario al esperado; así mismo se recomienda realizar una investigación de las propiedades físico-químicas, ayudados de otras disciplinas, para analizar las reacciones químicas entre el residuo, el cemento y/o agregados para saber la causa de la disminución de la resistencia.

- **Variación en las propiedades físicas y mecánicas de una matriz de concreto al incorporar cuesco de palma africana como agregado grueso.** (Arleth Denisse Torne Angulo & Gervis David Gomez Hernandez, 2015) Universidad de Cartagena.

Para establecer la variación a la que el título hace referencia, se fabricaron varios especímenes con diferentes proporciones del material estudiado en reemplazo del agregado grueso y unos especímenes patrón fabricados con agregados convencionales, estos especímenes fueron ensayados a compresión, tracción indirecta y flexión a diferentes edades y se realizó un análisis comparativo. Se obtuvo una disminución considerable en el peso de las muestras con cuesco de palma africana y se pudo observar una disminución considerable tanto en la resistencia a compresión como en la resistencia a flexión y un comportamiento aceptable a tracción. El producto final de esta investigación es un concreto de agregado ligero de baja resistencia que puede ser usado en elementos no estructurales que no ameriten mucha resistencia, esto ayudara a dar un uso al cuesco de palma el cual es un foco de contaminación que afecta las poblaciones aledañas a las plantas de extracción y ayudara a disminuir costos en la edificación al presentarse menores cargas en la estructura. Los ensayos fueron realizados de acuerdo a lo establecido en las normas NTC 673 (resistencia a la compresión), NTC 722 (resistencia a la tensión indirecta), y ASTM C293 (resistencia a la flexión).

- **Evaluación de la resistencia mecánica del concreto modificado con residuo de granalla de silicato de aluminio.** (Daniel Eduardo Ramírez Brewer & María Fernanda Vergara Álviz, 2013) Universidad de Cartagena.

En esta investigación se realizó una evaluación mecánica del residuo de granalla de silicato de aluminio mediante ensayos normalizados con el fin de obtener un concreto de alto rendimiento y generar una alternativa de disposición final del residuo; en primer lugar se hizo la caracterización fisicoquímica del residuo y materia prima del concreto tales como cemento tipo I marca argos, arena y grava triturada, se llevaron a cabo ensayos de granulometría, peso específico y absorción de agua que fueron determinantes a la hora de realizar el diseño de mezcla de concreto para los porcentajes de 0%, 10%, 30% y 50% de sustitución de residuo con respecto al peso de la arena, para luego elaborar las probetas y

viguetas de acuerdo a la norma ASTM C31; se realizaron un total de 56 muestras incluyendo la réplica a las cuales se le efectuaron ensayos de compresión, tracción indirecta y flexión de acuerdo a las normas ASTM C39, INV. E-411-07, INV. E-415-07 respectivamente. Los resultados indican que la muestra patrón presentó mayor resistencia a la compresión, en comparación a las otras muestras, sin embargo la muestra al 30% de sustitución presentó mayor resistencia a la tracción indirecta y a la flexión, mientras que la muestra al 50% de sustitución exhibió muy baja resistencia en todas las pruebas, este comportamiento se debe a que el residuo tiene un mayor módulo de finura que la arena por lo cual confiere una mejor resistencia mecánica pero al 50% la baja resistencia se debe al exceso de materia orgánica que contiene el residuo que afecta directamente la durabilidad y la resistencia mecánica, por lo anterior se concluye que el residuo se puede utilizar en aplicaciones de construcción como lo son pisos, andenes, losas y placas de contrapiso.

- **Aprovechamiento de escombros como agregado grueso para la fabricación de adoquines estándar.** (Cristian Eduardo Venegas Pérez & Ramón Enrique Ucros Oyola, 2015) Universidad de Cartagena.

En este proyecto se evalúan las características más importantes de los adoquines con diferentes porcentajes de agregados reciclados, como su porcentaje de absorción de agua, la resistencia a la flexo tracción y la resistencia al desgaste ajustable por medio de un índice. Para la elaboración de los adoquines y la evaluación de estas propiedades, los escombros fueron triturados y evaluados como agregados, con los cuales se elaboraron las mezcla previamente diseñados según proporciones agregado natural/agregado reciclado encontradas en estudios previos, teniendo en cuenta la proporción agua cemento recomendada por el ICPC para la fabricación de adoquines.

Comparando los resultados con otras investigaciones realizadas en Serbia, Canadá, Croacia, Chile y Colombia, fue posible concluir que el porcentaje más adecuado para su viabilidad técnica es sustituir el 30% del total del agregado natural por el material reciclado tanto de concreto como de ladrillo y donde la resistencia a la tracción, uno de los aspectos más importantes no se encuentra muy alejado de lo recomendado con 3.9 Mpa de módulo de rotura frente a 4,2 Mpa exigidos por las normas técnicas, mostrando con esto la viabilidad

técnica del uso de estos escombros como agregados, y se pueden tener mejores resultados si se mejora la compactación y el vibrado de los adoquines en su fabricación.

1.2. ESTADO DEL ARTE

Son muchos los procesos tanto domésticos, como industriales en los que se generan grandes cantidades de desechos.

El campo de la ingeniería ha intentado a través de investigaciones darle una disposición final particular a estos residuos, reduciendo costos de otras actividades, ya que se trata de material desechado. Específicamente en la ingeniería de la construcción se ha intentado reutilizar desechos de diferentes tipos de materiales y procedentes de diferentes actividades para su implementación en mezclas de hormigón, buscando optimizar sus características al mismo tiempo que se recicla un material.

Es importante destacar que a nivel internacional tampoco se encontraron referencias bibliográficas de estudios donde se utilice exactamente el mismo material del presente estudio (viruta aluminio), sin embargo se hallaron investigaciones que utilizaban la incorporación de otros materiales reciclados con el mismo fin de mejorar las características del concreto. A continuación se mencionan y describen algunas referencias, las cuales pertenecen a la misma línea de investigación descrita anteriormente y corresponde a la línea del presente documento.

- **Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado.** (Libardo Enrique Arriaga Tafhurt, 2013) Escuela Colombiana de Ingeniería.

Este trabajo de grado se basó en el estudio del comportamiento estructural de elementos de concreto reforzado con agregado grueso de concreto reciclado y la realización de las respectivas comparaciones frente a concretos de control o convencionales. Se determinó la resistencia a flexión y cortante de elementos estructurales de concreto reforzado con agregado grueso de concreto reciclado con sustitución del 20% del agregado natural y se analizó e interpretó el comportamiento y desempeño de los elementos estructurales

ensayados. Se ensayaron vigas con un apoyo intermedio y con luces entre apoyos de 2,50 m cargada con dos cargas puntuales de igual magnitud cada una de estas localizada a 1,10 m del apoyo central buscando simetría en el montaje. Durante los ensayos se observó que las fisuras del concreto con agregado de concreto reciclado son ligeramente de mayor espesor que las correspondientes al concreto convencional; las mayores fisuras tenían un espesor de 0,40 mm en las placas de concreto con agregado de concreto reciclado mientras que en el concreto convencional eran del orden de 0,35 mm. Además se observan comportamientos similares en el concreto convencional y en el concreto con agregado de concreto reciclado, toda vez que sus propiedades físico-mecánicas de acuerdo a los cilindros ensayados presentaron similitud ya que los concretos ensayados tan sólo tenían una diferencia de edad de 1 día.

- **Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho** (Hermes Andrés Torres Ospina, 2014) Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Para el desarrollo del trabajo se prepararon cuatro tipos de mezclas, la primera sin adición de grano de caucho, la segunda reemplazando el 10% del agregado fino por la misma cantidad en volumen de caucho, la tercera y cuarta mezcla de la misma forma pero con porcentajes de reemplazo de 20% y 30% respectivamente. Se evaluaron las propiedades mecánicas como: resistencia a la compresión y a la flexión; ensayos de durabilidad como: penetración de cloruros, carbonatación, absorción y propiedades eléctricas como resistividad e impedancia. Los ensayos mecánicos y de durabilidad se evaluaron en edades de 28 y 90 días y en el caso de la resistencia a la compresión se ensayaron las muestras a los 3, 7, 28 y 90 días.

Finalmente se concluye que la resistencia a la compresión y flexión disminuye con la adición de caucho en la mezcla. Respecto a los ensayos de durabilidad: la penetración de cloruros para en ensayos RCPT aumenta con los porcentajes de 20% y 30% de adición de caucho, sin embargo para el 10% la penetración disminuye respecto a la muestra con 0% de reemplazo en ensayos realizados a 90 días, para los ensayos realizados con el método NTBUILD-492 la penetración del ion cloruro es directamente proporcional con el aumento en porcentaje de sustitución de caucho; el aumento en los valores de profundidad de

carbonatación son directamente proporcionales con el aumento de porcentaje de adición de caucho; respecto a los valores de absorción superficial, estos disminuyen con el reemplazo parcial de caucho para edades de 28 días, sin embargo este comportamiento se invierte para ensayos realizados a 90 días, teniendo mejor comportamiento las muestras con menos porcentaje de sustitución de caucho.

- **Propuesta de concreto modificado traslucido no estructural utilizando vidrio y fibra óptica.** (Edwin Hernando Pérez Sánchez & Karen Andrea Torrado Verjel, 2009) Universidad Industrial de Santander.

En esta investigación se buscó incorporar materiales no convencionales en la ingeniería civil tales como la fibra óptica, el vidrio, y el metacaolín, que se presenta como una alternativa novedosa en la fabricación de concretos con características arquitectónicas de brillo y traslucidez, con el objetivo de observar el comportamiento físico y mecánico de estos materiales

Se utilizó un diseño de mezcla teórico para lograr una resistencia de 21 Mpa, pero debido a los componentes de este material, las resistencias que se obtuvieron con y sin fibra óptica fueron respectivamente 14,73 Mpa y 18,41 Mpa (compresión), lo que indica que el vidrio y la fibra óptica disminuyen considerablemente la resistencia del material, por lo que se recomienda no darle uso estructural a este material, además de que no fue el fin de esta investigación.

La traslucidez fue medida a partir de los ensayos de transmitancia y espectrofotometría, dando como resultado un material traslucido aunque no en gran medida según los aparatos utilizados para calcularla, pero como se observó en este estudio, la cantidad de luz que atraviesa los especímenes es suficiente para que el ojo humano pueda captarla.

- **Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition (El hormigón fabricado con caucho reciclado de neumáticos: Efecto de la activación alcalina y la adición de humo de sílice)** (Fernando Pelisser, Nilomar Zavarise, Tiago Arent Longo & Adriano Michael Bernardin, 2010) Universidad de Santa Catarina Extremo Sur.

Esta investigación, realizada en Santa Catarina, Brasil, trata la posible utilización de cauchos de neumáticos reciclados en matrices de concreto, lo cual contribuye al desarrollo del hormigón como un material con un menor impacto ambiental y de este modo, se contribuye también al desarrollo de la construcción de una manera sostenible. Las formulaciones de hormigón fueron producidas con la sustitución del 10% de agregado de arena por el caucho de neumático reciclado, utilizando caucho convencional y caucho modificado con la activación alcalina y humo de sílice para mejorar las propiedades mecánicas. La relación agua / cemento (o composición) y la edad de pruebas se utilizaron como variables adicionales. La caracterización del hormigón se realizó mediante la prueba de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, densidad y microestructura (SEM). El caucho de neumático reciclado demostró ser un excelente agregado para utilizar en el hormigón. Se observó que su resistencia a la compresión sólo se redujo un 14% a la edad de 28 días, en comparación con el hormigón convencional, alcanzando 48 MPa para la mezcla con la resistencia más alta. También se encontró que las composiciones de hormigón tienden a ser más ligeras y no se observó una interfaz reducida entre el caucho y la matriz de cemento después del tratamiento químico. Finalmente el hormigón recubierto de goma puede apoyar la sostenibilidad de la construcción, reducir al mínimo el consumo de recursos naturales mediante el uso de un residuo industrial y producir un material con características especiales.

- **Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete (El reciclado de botellas de PET como agregado fino en el concreto)** (Mariaenrica Frigione, 2010) Universidad de Salento.

En Italia se intentó por medio de este estudio, sustituir en un 5% en peso de agregado fino (arena natural) del concreto, por un agregado fabricado de botellas plásticas (PET) después de realizarles un lavado. Las partículas WPET (como se le llamo al agregado) poseían una granulometría similar a la de la arena sustituida. Se fabricaron muestras con diferentes contenidos de cemento y relación agua / cemento. La caracterización de hormigón fresco y las pruebas mecánicas a las edades de 28 y 365 días se realizaron en los WPET / hormigones, así como en hormigones de referencia que contienen agregado fino natural con el fin de investigar la influencia de la sustitución de WPET al agregado fino en hormigón.

Se encontró que los hormigones WPET muestran características similares de trabajabilidad, resistencia a la compresión y resistencia a la tracción indirecta ligeramente más bajas que el hormigón de referencia y una ductilidad moderadamente superior.

- **Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance (El hormigón fabricado con árido de neumáticos usados: rendimiento relacionado a aumentar la durabilidad)** (Miguel Bravo & Jorge de Brito, 2011) Universidad Técnica de Lisboa.

Este estudio llevado a cabo en Portugal, se evalúa el rendimiento de una mezcla de hormigón que contiene granulados de caucho obtenidos a partir de neumáticos usados. Se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión, absorción de agua por inmersión y capilaridad, carbonatación y resistencia a la penetración de cloruros. Las mezclas de concreto se realizaron sustituyendo el 5%, 10% y 15% del volumen de agregados naturales, por agregado derivado de neumáticos usados. El agregado fino y grueso se sustituyó por separado y simultáneamente. Esta investigación también estudió la influencia del proceso de molienda de goma. Por lo tanto, algunas mezclas de hormigón se hicieron con el agregado natural mecánicamente y otros con agregados combinados producidos con tecnología criogénica.

1.3. MARCO TEORICO

1.3.1. El cemento

La historia de los materiales cementantes es tan antigua como la humanidad; el yeso fue utilizado por los egipcios, y los griegos y romanos usaron la cal común y la cal hidráulica. La primera se obtiene al calcinar la piedra caliza y sólo endurece en presencia del bióxido de carbono (CO₂) contenido en el aire; la segunda se obtiene cuando la piedra caliza contiene impurezas de arcilla y endurece principalmente por la reacción que se produce entre sus elementos constitutivos, bajo los efectos del agua. Los griegos y los romanos usaron ceniza volcánica que mezclaban con la cal, para obtener un producto de mejor calidad. Estos materiales que mezclados con la cal dan un producto que adquiere consistencia en presencia del agua se llamaron puzolanas, nombre que se deriva de Puzol

ciudad que queda en el Golfo de Nápoles, sitio del cual los romanos extraían el material volcánico que mezclaban con la cal. Los griegos la obtenían de la Isla de Santorin. La era del cemento se inicia en 1750 con John Smeaton quien mezcló cal con arcillas y obtuvo un buen producto que empleó en la reparación del Faro de Eddyston pero su descubrimiento no tuvo mayor trascendencia. En 1824 Joseph Aspdin, conoció los estudios de Smeaton y prosiguió sus investigaciones patentando el "Cemento Portland", material que presentaba un aspecto parecido a unas piedras de construcción extraídas en Portland, ciudad que queda al sur de Inglaterra, de allí su nombre. Las investigaciones sobre el tema continúan y en 1845 el inglés Isaac Johnson le da a la mezcla la temperatura adecuada para formar el Clinker, producto que después de molido ofrece óptima calidad como cementante y es el que actualmente se usa. Sólo a finales del siglo pasado Michaelis Le Chatelier y Vicat, presentan las bases de la tecnología del cemento Portland. En Colombia se inicia la producción de cemento Portland en 1909 con la creación de la fábrica de cementos Samper en Bogotá.

Por otro lado, el cemento Portland se define, como el producto obtenido al pulverizar el Clinker con adición de yeso.

El Clinker resulta de la calcinación hasta una fusión incipiente de una mezcla debidamente dosificada de materiales silíceos, calcáreos y férricos. (Guzman, 2001).

1.3.2. Cemento portland

El cemento Portland es un aluminio silicato de calcio, patentado por J. Aspdin en 1824, y denominado Portland por su semejanza a una piedra que abunda en esa localidad de Inglaterra. Se obtiene por calentamiento incipiente (aproximadamente 1300 °C) de una mezcla de minerales finamente molidos, formados por piedra caliza y arcilla. El calentamiento se efectúa en hornos giratorios levemente inclinados de 3m de diámetro y 100 m de largo.

1.3.2.1. Propiedades físicas y mecánicas del cemento portland

La mayor parte de las especificaciones para cemento Portland establecen límites a la composición química y algunas propiedades físicas (NTC 121 y 321), por lo tanto, el

conocimiento de algunas de estas propiedades es provechoso para interpretar los resultados de las pruebas del cemento. (Rivera, G.)

1.3.2.1.1. Densidad

La densidad del cemento Portland varía generalmente entre 2,90 y 3,20 g/cm³ dependiendo básicamente de la cantidad y densidad del material puzolánico que se adicione. La densidad de un cemento no indica la calidad del mismo; su uso principal radica en dosificación y control de mezclas.

La densidad del cemento se determina generalmente con el frasco de LE CHATELIER (NTC 221). (Rivera, G.)

1.3.2.1.2. Finura

La importancia de la finura en el cemento radica en que a mayor finura el cemento desarrolla mayor resistencia, pero desprende más calor; esto es debido principalmente, a que granos gruesos pueden durar varios años en hidratarse, e inclusive no llegar jamás a realizarlo totalmente, mientras que, cuanto más fino sea el cemento, mayor será la cantidad de material que se hidrata, ya que la superficie total en contacto con el agua es mucho más grande. Al hidratarse un mayor porcentaje de la masa total del cemento, ésta masa reacciona, logrando un desarrollo más alto de resistencia, pero como desprende calor al realizar este proceso, también será mayor la cantidad de calor desprendido. (Rivera, G.).

1.3.2.1.3. Consistencia normal.

Con el propósito de poder determinar algunas propiedades del cemento como tiempos de fraguado o estabilidad volumétrica, se debe realizar una mezcla de cemento y agua llamada pasta; puesto que las propiedades de la pasta se ven afectadas por las cantidades de cada uno de los componentes que entran a formar parte de la mezcla, se debe preparar una pasta "normalizada", con la cantidad de agua necesaria para que la hidratación del cemento sea lo más exacta posible; ésta pasta se denomina de consistencia normal. (Rivera, G.)

1.3.2.1.4. Fraguado

Fraguado se refiere al paso de la mezcla del estado fluido o plástico al estado sólido. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere alguna resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último término se refiere al aumento de resistencia de una pasta de cemento fraguada. (Rivera, G.)

1.3.2.1.5. Calor de hidratación

El calor de hidratación es el calor generado cuando reaccionan el cemento y el agua. La cantidad de calor generado depende principalmente de la composición química del cemento; a tasa de generación de calor la afecta la finura y temperatura de curado, así como la composición química. (Rivera, G.)

1.3.2.1.6. Resistencia del cemento.

La resistencia de un mortero o concreto depende de la cohesión de la pasta de cemento, de su adhesión a las partículas de los agregados y en cierto grado, de la resistencia del agregado mismo. (Rivera, G.)

1.3.3. Los agregados o áridos.

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

Son considerados como agregados de las mezclas de mortero o concreto, a todos aquellos materiales que teniendo una resistencia propia suficiente (resistencia de la partícula), no perturbe ni afecten desfavorablemente las propiedades y características de las mezclas y garanticen una adherencia suficiente con la pasta endurecida del cemento Portland.

Los morteros o los concretos hidráulicos están constituidos en un alto porcentaje por agregados (50-80% en volumen), por lo tanto, éstos no son menos importantes que la pasta del cemento endurecida, el agua libre, el aire incorporado, el aire naturalmente atrapado, o los aditivos; por el contrario, gran parte de las características de las mezclas de mortero o de concreto, tanto en estado plástico como en estado endurecido, dependen de las características y propiedades de los agregados, las cuales deben ser estudiadas para obtener morteros o concretos de buena calidad y económicos. (Rivera, G.) (Guzman, 2001).

1.3.3.1. Clasificación de los agregados.

En general los agregados se han clasificado de varias maneras a través del tiempo, pero principalmente desde los puntos de vista de su procedencia, densidad, tamaño, forma y textura.

1.3.3.1.1. Clasificación según su origen

De acuerdo con el origen de los agregados, según su procedencia ya sea de fuentes naturales o a partir de productos industriales, se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.3.3.1.1.1. Agregados naturales.

Son aquellos procedentes de la explotación de fuentes naturales tales como: depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río) o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. (Rivera, G.).

1.3.3.1.1.2. Agregados artificiales.

Por lo general, los agregados artificiales se obtienen a partir de productos y procesos industriales tales como: arcillas expandidas, escorias de alto horno, clinker, limaduras de hierro y otros, comúnmente estos son de mayor o menor densidad que los agregados corrientes. (Rivera, G.).

1.3.3.1.2. Clasificación según su densidad.

Depende de la cantidad de masa por unidad de volumen y del volumen de los poros, ya sean agregados naturales o artificiales. Esta distinción es necesaria porque afecta la densidad del concreto (ligero, normal o pesado) que se desea producir.

1.3.3.1.3. Clasificación según su tamaño.

La forma más generalizada de clasificar los agregados es según su tamaño, el cual varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros de sección; ésta distribución del tamaño de las partículas, es lo que se conoce con el nombre de granulometría. De acuerdo con la clasificación unificada, los suelos se dividen en suelos finos (material de tamaño

inferior a 0,074 mm o 74 μ m-tamiz No. 200) y suelos gruesos (material de tamaño superior o igual a 0,074 mm o 74 μ m-tamiz No. 200); para la elaboración de mezclas de mortero o de concreto se emplean los suelos gruesos y se limita el contenido de suelo fino. La fracción fina de los suelos gruesos, cuyas partículas tienen un tamaño inferior a 4,76 mm (tamiz No. 4) y no menor de 0,074 mm o 74 μ m (tamiz No. 200), es lo que comúnmente se denomina agregado fino; y la fracción gruesa, o sea aquellas partículas que tienen un tamaño superior a 4,76 mm (tamiz No. 4), es lo que normalmente se llama agregado grueso. (Rivera, G.).

1.3.3.2. Propiedades físicas de los agregados.

1.3.3.2.1. Granulometría.

Es la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados; se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra representativa del agregado en fracciones de igual tamaño de partículas; la medida de la cuantía de cada fracción se denomina como granulometría.

El análisis granulométrico consiste en hacer pasar el agregado a través de una serie de tamices que tienen aberturas cuadradas y cuyas características deben de ajustarse a la norma NTC 32. (Rivera, G.)

1.3.3.2.2. Módulo de finura.

El módulo de finura es un factor empírico que permite estimar que tan fino o grueso es un material. (Rivera, G.)

1.3.3.2.3. Tamaño Máximo.

Está definido como la menor abertura del tamiz que permite el paso de la totalidad del agregado. De manera práctica representa el tamaño de la partícula más grande que tiene el material.

1.3.3.2.4. Tamaño Máximo Nominal.

El tamaño nominal máximo de las partículas es el mayor tamaño del tamiz, listado en la norma aplicable, sobre el cual se permite la retención de cualquier material. (RIVERA).

1.3.3.2.5. Densidad.

Las partículas del agregado están conformadas por la masa del agregado, vacíos que se comunican con la superficie llamados poros permeables o saturables y vacíos que no se comunican con la superficie, es decir que quedan en el interior del agregado llamados poros impermeables o no saturables; de acuerdo con lo anterior tenemos tres densidades a saber:

1.3.3.2.5.1. Densidad real.

Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, excluyendo sus poros permeables o saturables y los no saturables o impermeables.

1.3.3.2.5.2. Densidad nominal.

Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, excluyendo únicamente los poros permeables o saturables.

1.3.3.2.5.3. Densidad aparente.

Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, incluyendo tanto poros permeables o saturables como poros impermeables o no saturables (volumen aparente o absoluto). (Rivera, G.)

1.3.3.2.6. Absorción y humedad.

La absorción (porcentaje de agua necesaria para saturar los agregados o el hormigón expresada con respecto a la masa de los materiales secos) y la humedad, deben determinarse de acuerdo con las normas NTC 176, 237 y 1776, de manera que la cantidad de los materiales en la mezcla pueda controlarse y se establezca las masas correctas de cada uno de ellos.

La estructura interna de las partículas de un agregado está conformada por materia sólida y por poros o huecos los cuales pueden contener agua o no. Las condiciones de humedad en que se puede encontrar un agregado serán:

- Seco: Ningún poro con agua.
- Húmedo no saturado: Algunos poros permeables con agua.

- Saturado y superficialmente seco (s.s.s): Todos los poros permeables llenos de agua y el material seco en la superficie.
- Húmedo sobresaturado: Todos los poros permeables contienen agua y además el material tiene agua en la superficie (agua libre). (Rivera, G.)

1.3.3.2.7. Masa unitaria

La masa unitaria de un material es la masa del material necesaria para llenar un recipiente de volumen unitario. En la masa unitaria además del volumen de las partículas del agregado se tiene en cuenta los vacíos que hay entre partículas.

La masa unitaria puede determinarse compactada o suelta; la masa unitaria compactada se emplea en algunos métodos de dosificación de mezclas y la masa unitaria suelta sirve para estimar la cantidad de agregados a comprar si estos se venden por volumen (volumen suelto) como ocurre comúnmente. La masa unitaria se determina de acuerdo con la norma NTC 92 y su valor para agregados normales varía generalmente entre 1,30 y 1,80 kg/dm³ dependiendo del agregado y el grado de compactación. (Rivera, G.)

Para hallar la masa unitaria compactada según la norma citada Se toma una muestra representativa de los agregados, luego se llena 1/3 parte de los recipientes con las muestras de agregados y se aplican 25 golpes con una varilla, posteriormente se llenan las dos partes restantes y se repitió la operación con la varilla, finalmente se enrasa para eliminar excesos y se pesa la muestra y el recipiente y se determina el volumen de este. Para la determinación de la masa unitaria suelta se toma la muestra representativa de los agregados, luego se llena uno de los recipientes hasta el borde y se enrasa con la varilla, se procede a pesar la muestra y el recipiente y se determina el volumen de este.

1.3.3.2.8. Resistencia

La resistencia al desgaste de un agregado se usa con frecuencia como indicador general de la calidad del agregado; esta característica es esencial cuando el agregado se va usar en concreto sujeto a desgaste como en el caso de los pavimentos rígidos. El método de prueba más común es el ensayo en la máquina de “Los Ángeles” (norma NTC 93 y 98); la prueba consiste en colocar una muestra del material con la carga abrasiva dentro de un tambor de acero y poner a girar la máquina (30 a 33 rpm) un cierto número de revoluciones (la carga

abrasiva y el número de revoluciones depende de la granulometría del material); luego se retira el material de la máquina, se lava sobre el tamiz No. 12 (1,68mm), el material retenido se pone a secar hasta masa constante y se halla su masa. Las especificaciones limitan el porcentaje de desgaste a máximo 40%. (Rivera, G.)

1.3.3.2.9. Manejo y almacenamiento de los agregados

Los agregados deben manejarse y almacenarse de manera que sea mínima la segregación (separación del material en fracciones) y se evite la contaminación con sustancias perjudiciales. Los montones de los almacenamientos deben formarse por capas de espesor uniforme y no ser muy altos porque se produce segregación; cuando se deja caer material de bandas transportadoras o cucharones el viento puede llevarse las partículas más finas lo que debe evitarse en lo posible. Cuando el material se almacena en silos estos deberán ser circulares o casi cuadrados, sus fondos deberán tener una inclinación no menor de 50 grados con la horizontal de todos los lados hacia la salida central. Al cargar los silos los materiales deben caer verticalmente sobre la salida, si el material cae sobre los costados formando ángulo puede producirse segregación. Para evitar la segregación y variaciones en la granulometría se deben almacenar por separado los agregados de acuerdo con su tamaño, así, por ejemplo: agregado de tamaño máximo 1 ½" en una parte, agregado de tamaño máximo 1" en otra y la arena en otra; si se tienen diferentes arenas también se deben separar. (Rivera, G.)

1.3.4. Agua de una mezcla

El agua de mezcla cumple dos funciones muy importantes, permitir la hidratación del cemento y hacer la mezcla manejable. De toda el agua que se emplea en la preparación de un mortero o un concreto, parte hidrata el cemento, el resto no presenta ninguna alteración y con el tiempo se evapora; como ocupaba un espacio dentro de la mezcla, al evaporarse deja vacíos los cuales disminuyen la resistencia y la durabilidad del mortero o del hormigón. La cantidad de agua que requiere el cemento para su hidratación se encuentra alrededor del 25% al 30% de la masa del cemento, pero con esta cantidad la mezcla no es manejable, para que la mezcla empiece a dejarse trabajar, se requiere como mínimo una cantidad de agua del orden del 40% de la masa del cemento, por lo tanto, de acuerdo con lo

anterior como una regla práctica, se debe colocar la menor cantidad de agua en la mezcla, pero teniendo en cuenta que el mortero o el hormigón queden trabajables.

Como norma general se considera que el agua es adecuada para producir mortero u hormigón si su composición química indica que es apta para el consumo humano, sin importar si ha tenido un tratamiento preliminar o no; es decir, casi cualquier agua natural que pueda beberse y que no tenga sabor u olor notable sirve para mezclar el mortero o el concreto. Sin embargo, el agua que sirve para preparar estas mezclas, puede no servir para beberla. El agua puede extraerse de fuentes naturales cuando no se tienen redes de acueducto y puede contener elementos orgánicos indeseables o un alto contenido inaceptable de sales inorgánicas. Las aguas superficiales en particular, a menudo contienen materia en suspensión tales como: aceite, arcilla, sedimentos, hojas y otros desechos vegetales; lo cual puede hacerla inadecuada para emplearla sin tratamiento físico preliminar, como filtración o sedimentación para permitir que dicha materia en suspensión se elimine. (Rivera, G.)

1.3.5. El concreto

Es un producto que resulta de la mezcla de un aglomerante (generalmente cemento, arena, grava o piedra machacada y agua) para producir un gel que se deja moldear que al endurecer forma una piedra artificial que adquiere altas resistencia al esfuerzo a la compresión. (Martinez Acevedo, 2015)

El concreto como las piedras naturales ofrece una resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión y muy poco a los de tracción, (por lo general su resistencia a la tracción es de un 10% de la resistencia a la compresión) por lo cual es inadecuado utilizarlo en piezas que va a estar sometidas a tracciones o flexiones. Pero se suple la deficiencia cuando dispone de varillas de acero en las zonas de tracción, teniendo entonces una pieza resistente a la flexión. De manera que el concreto armado es una piedra artificial que puede resistir esfuerzos de compresión, tracción y flexión,

El mortero mezclado con agregado grueso (piedras), da como resultado el concreto u hormigón.

Adicionalmente cuando el concreto se le agregan piedras de gran tamaño cuyo diámetro es del orden de 20 cm o más, se le conoce como concreto de agregado precolado, y más comúnmente en nuestro medio como concreto ciclópeo.

1.3.5.1. Propiedades del concreto

1.3.5.1.1. Manejabilidad del concreto

La manejabilidad es una propiedad del concreto fresco que se refiere a la facilidad con que este puede ser: mezclado, manejado, transportado, colocado, compactado y terminado sin que pierda su homogeneidad (exude o se segregue).

El grado de manejabilidad apropiado para cada estructura, depende del tamaño y forma del elemento que se vaya a construir, de la disposición y tamaño del refuerzo y de los métodos de colocación y compactación. Así, por ejemplo, un elemento delgado o muy reforzado necesita una mezcla más fluida que un elemento masivo o poco reforzado. (Rivera, G.)

1.3.5.1.2. Medición de la manejabilidad del concreto

Un método indirecto para determinar la manejabilidad de una mezcla, consiste en medir su consistencia o fluidez por medio del ensayo de "asentamiento con el cono o slump" (NTC 396). Es una prueba que se usa comúnmente en las construcciones de todo el mundo; la prueba no mide la trabajabilidad del concreto, sino que determina la consistencia o fluidez de la mezcla; es muy útil para detectar variaciones en la uniformidad de una mezcla de proporciones determinadas.

El molde para la prueba de asentamiento con el cono o slump es un tronco de cono de 10 cm de diámetro menor, 20 cm de diámetro mayor y 30 cm de altura; el tronco de cono se humedece y se coloca en una superficie rígida, plana, húmeda y no absorbente, con la abertura más pequeña hacia arriba.

Se debe llenar con hormigón en tres capas de aproximadamente un tercio del volumen del molde cada una, apisonando cada capa 25 veces con una varilla lisa de 16 mm de diámetro, longitud 600 mm y redondeada en la punta; una vez compactada la última capa, la superficie superior se alisa a ras; inmediatamente después, se levanta lentamente el tronco de cono sin producir giro o torsión. Al faltarle apoyo, el concreto se asentará. La

disminución de la altura en la parte superior se llama asentamiento y se mide con una aproximación de 5 mm.

Si en lugar de asentarse uniformemente el cono, como en un revenimiento normal, la mitad del cono se desliza en un plano inclinado, se dice que ha tenido lugar un asentamiento o revenimiento por corte y la prueba deberá repetirse. (Rivera, G.)

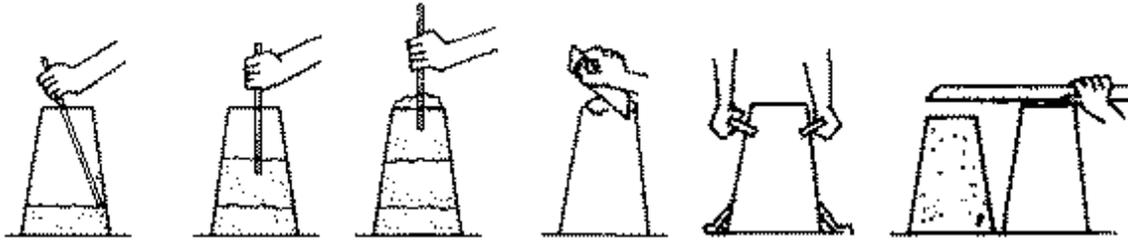


Figura 1. Ensayo de asentamiento

Fuente: ensayeparahormigon.blogspot

1.3.5.1.3. Resistencia a la compresión del concreto

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de concreto reforzado. La forma de expresarla es, en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm² y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (p.s.i.). La equivalencia que hay entre los dos es que 1 p.s.i. es igual a 0.07 kgf/cm². Aunque hoy en día se ha acogido expresarla en Mega-Pascales (MPa), de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades.

La forma de evaluar la resistencia del concreto es mediante pruebas mecánicas que pueden ser destructivas, para lo cual se toman muestras y se hacen especímenes para fallar, o no destructivas, las cuales permiten probar repetidamente la muestra de manera que se pueda estudiar la variación de la resistencia u otras propiedades con el paso del tiempo. Para las primeras, se utilizan tres tipos de muestras: cilindros, cubos y prismas. Para las segundas hay diferentes sistemas, como se verá más adelante. (Guzman, 2001).

El ensayo más universalmente reconocido para ejecutar pruebas de resistencia mecánica a la compresión simple es el ensayo de probetas cilíndricas, las cuales se funden en moldes especiales de acero o hierro fundido que tienen 150 mm de diámetro por 300 mm de altura (relación diámetro: altura 1:2).

Los procedimientos relativos a este ensayo se encuentran especificados en las normas NTC 550 y 673 que hacen referencia a la confección de los cilindros y al ensayo de resistencia a compresión, respectivamente. A continuación, se describen brevemente.

Una vez que la muestra de concreto fresco ha sido correctamente seleccionada de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma NTC 454 (hormigón fresco - toma de muestras), de manera que sea representativa de toda la masa, se procede de la siguiente forma:

Antes de colocar el concreto en el molde, es necesario aceitar el interior del cilindro para evitar que el concreto se adhiera al metal; para hacer esto, es suficiente untar las paredes y el fondo con una brocha impregnada de aceite mineral; la capa de aceite debe ser delgada y en el fondo no debe acumular aceite.

El cilindro se llena en tres capas de igual altura (10 cm) y cada capa se apisona con una varilla lisa de 16mm (5/8") de diámetro, con uno de sus extremos redondeados, la cual se introduce 25 veces por capa en diferentes sitios de la superficie del concreto, teniendo cuidado de que la varilla sólo atraviese la capa que se está compactando, sin pasar a la capa siguiente.

Al final de la compactación se completa el llenado del molde con más mezcla y se alisa la superficie con la ayuda de un palustre o de una regla.

Una vez que se ha llenado cada capa, se dan unos golpes con la varilla o con un martillo de caucho a las paredes de éste, hasta que la superficie del concreto cambie de mate a brillante, con el objeto de eliminar las burbujas de aire que se hayan podido adherir al molde o hayan quedado embebidas en el concreto.

Los cilindros recién confeccionados deben quedar en reposo, en sitio cubierto y protegidos de cualquier golpe o vibración y al día siguiente (20 ± 4 horas después de elaborados) se les quita el molde cuidadosamente.

Inmediatamente después de remover el molde, los cilindros deben ser sometidos a un proceso de curado en tanques de agua con cal, o en cuarto de curado a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, con el fin de evitar la evaporación del agua que contiene el cilindro, por la acción del aire o el sol, y en condiciones estables de temperatura para que el desarrollo de resistencia se lleve a cabo en condiciones constantes a través del tiempo. En estas condiciones, los cilindros deben permanecer hasta el día del ensayo.

La resistencia a la compresión del concreto se mide con una prensa que aplica carga sobre la superficie superior del cilindro (Norma NTC 673). Generalmente esta superficie es áspera y no plana, lo cual puede conducir a concentraciones de esfuerzo que reducen considerablemente la resistencia real del concreto.



Figura 2. Máquina de ensayo a compresión

Fuente: www.civilgeeks.com

1.3.5.1.4. Resistencia a la flexión del concreto

La resistencia a flexión del concreto se determina ensayando vigas de sección cuadrada de 500 mm de longitud por 150 mm de lado, elaboradas y curadas de acuerdo con las normas ASTM C-192 y C-31. Los ensayos de resistencia a flexión se hacen de acuerdo a las normas ASTM C-78 y ASTM C-293; el ensayo descrito en la primera norma consiste en apoyar las vigas a 2.5 cm como mínimo de sus extremos, con una luz de 45 cm y cargarlas en dos puntos situados en los tercios medios de la luz, mientras que en la segunda norma se establece que la carga debe aplicarse en el centro de la viga. El esfuerzo máximo de flexión se denomina módulo de rotura.

Para la norma ASTM C-78 el módulo de rotura se calcula según la siguiente formula cuando la falla ocurre dentro del tercio medio (de la luz libre de la viga)

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

Dónde:

MR= Módulo de rotura del concreto, en kg/cm²

P= Carga máxima aplicada en kg

L= Luz libre entre apoyos en cm

b = Ancho de la viga en cm

d = Altura de la viga en cm

Si la falla ocurre por fuera del tercio medio de la viga, pero no está separada de él por más de una longitud equivalente al 5% de la luz-libre, el módulo de rotura debe ser calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

Donde a= distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara inferior de la viga, en cm.

Si la falla ocurre por fuera del tercio medio de la viga y a una distancia de él mayor del 5% de la luz libre de la viga, el ensayo se debe descartar. El módulo de rotura debe ser calculado con una precisión de 0,35 kgJcm² (5 p.s.i.). Por otra parte, el ensayo descrito por la norma ASTM C-293 consiste en apoyar las vigas de igual forma que en la norma ASTM C-78, pero con aplicación de carga en el centro de la luz. En este caso, el módulo de rotura se calcula según la siguiente expresión:

$$MR = \frac{3PL}{bd^2}$$

Es de anotar que el valor obtenido por medio de estas fórmulas no coincide con la resistencia real a la tracción del concreto, principalmente porque al aplicarla se supone un comportamiento elástico del concreto hasta la falla por tracción, lo cual no es cierto.

A pesar de lo anterior, el módulo de rotura del concreto es una medida útil para el diseño de pavimentos de concreto, puesto que las placas del pavimento trabajan principalmente a flexión; de ahí que, en estos casos, la calidad del concreto se especifique indicando su módulo de rotura. (Guzman, 2001)

Para la norma ASTM C- 293 el módulo de rotura se calcula mediante la siguiente formula:

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2}$$

1.3.5.2. Factores que afectan la resistencia del concreto

1.3.5.2.1. Tipo de agregado

Los concretos que tengan agregados angulosos o rugosos son generalmente más resistentes que otros de igual relación agua / cemento que tengan agregados redondeados o lisos; sin embargo, para igual contenido de cemento, los primeros exigen más agua para no variar la manejabilidad y por lo tanto el efecto en la resistencia no varía apreciablemente. Sin embargo, como es lógico la calidad del agregado afecta el desarrollo de resistencia. (Rivera, G.)

1.3.5.2.2. Tiempo, temperatura y humedad.

Una vez que el agua ha entrado en contacto con el cemento, el concreto empieza a endurecer gradualmente hasta que pasa del estado plástico al rígido, entonces se dice que el concreto ha "fraguado". Una elevación en la temperatura de curado acelera las reacciones químicas de hidratación, incrementando la resistencia temprana del concreto, sin efectos contrarios en la resistencia posterior; sin embargo, una temperatura más alta durante la colocación y el fraguado, aunque incrementa la resistencia a muy temprana edad, puede afectar adversamente la resistencia a partir de aproximadamente los 7 días. Esto es debido, a que una rápida hidratación inicial parece formar productos de una estructura física más pobre, probablemente más porosa. (Rivera, G.)

1.3.5.2.3. Curado del concreto

El curado se define como el proceso de mantener un contenido de humedad satisfactorio y una temperatura favorable en el concreto, durante la hidratación de los materiales cementantes, de manera que se desarrollen en el hormigón las propiedades deseadas.

El curado es una de las operaciones más importantes en las construcciones con hormigón y lamentablemente una de las más descuidadas. Un buen curado aumenta la resistencia y durabilidad y en general todas las propiedades del concreto endurecido. El endurecimiento del concreto se produce por las reacciones químicas que tienen lugar entre el cemento y el agua. Este proceso, llamado hidratación, continúa solamente si no falta agua y si la temperatura es adecuada. Cuando en el concreto recién colocado se pierde mucha agua por

evaporación, la hidratación se interrumpe. Cerca de la temperatura de congelación (0°C) la hidratación prácticamente se detiene. En estas condiciones el concreto deja de ganar resistencia y mejorar otras propiedades convenientes. (Rivera, G.)

1.3.5.2.4. Tipo de cemento

Es lógico pensar que las características del cemento empleado tienen una gran influencia en la resistencia final alcanzada por el concreto, ya que el cemento es un material "activo" en las mezclas.

Se ha demostrado en diversas investigaciones y en la práctica constructiva misma, que existe una estrecha correlación entre la resistencia de un cemento determinado de acuerdo con un proceso normalizado (norma NTC 220) y la resistencia de los concretos preparados con dicho cemento; de ahí que distintas marcas de cemento, aún de un mismo tipo, no deban ser intercambiadas sin un cuidadoso análisis del efecto que dicho cambio pueda tener sobre las propiedades del concreto endurecido.

La resistencia que puede producir un determinado cemento depende fundamentalmente de su composición química; por ejemplo, con un cemento con alto contenido de C₃S se obtendrán buenas resistencias y en un tiempo relativamente corto, acompañadas por un desprendimiento de calor relativamente alto durante el endurecimiento, en tanto que un cemento rico en C₂S producirá altas resistencias pero en un tiempo relativamente largo, con un moderado calor de hidratación, lo cual conlleva a una mejor resistencia a los ataques químicos. (Rivera, G.)

1.3.6. El aluminio

El aluminio es el metal no ferroso de mayor consumo en el mundo, lo que prueba el significado que tiene para la industria moderna. Su uso se debe a sus múltiples características, como son:

- Es el metal más abundante sobre la corteza terrestre; su peso específico es de 2.71 Gramos/cm³, o sea tres veces más liviano que el acero, el cobre o el zinc, y cuatro veces más liviano que el plomo.
- Su alta conductividad eléctrica lo hace rival número uno del cobre, y siendo el aluminio tres veces más liviano, lo hace doblemente más económico.

- No se corroe, es reflectivo y buen conductor térmico; no es magnético, ni tóxico al organismo humano; se puede fundir, inyectar, maquinar, laminar, forjar, extruír y soldar, además de ser 100% reciclable.
- En la actividad edificadora, el aluminio es el metal más usado en formas de perfiles, tanto por su alta resistencia mecánica como por los diferentes acabados que se le pueden dar a sus superficies, tales como anodizado natural y en color. (Construdata)

1.3.6.1.Generalidades técnicas del aluminio

El aluminio es un metal no ferroso, y es el más abundante de los metales, constituye cerca del 8% de la corteza terrestre. Sus propiedades han permitido que sea uno de los metales más utilizados en la actualidad. Es de color blanco y es el más ligero de los metales producidos a gran escala. La alúmina, que es extraída de la bauxita y mezclada con la criolita es la fuente del aluminio. El aluminio puro es demasiado blando, debidamente aleado se obtiene resistencias comparables al acero, por lo cual es útil para toda industria, desde la construcción, decoración, minería, iluminación hasta la industria aeronáutica. El aluminio es el único metal que proporciona dureza con bajo peso, y es sumamente fácil de pulir, tenaz, dúctil, y maleable, posee gran resistencia a la corrosión, decoración, minería, iluminación hasta la industria aeronáutica. El aluminio es el único metal que proporciona dureza con bajo peso, es sumamente fácil de pulir, tenaz, dúctil y maleable, posee una gran resistencia a la corrosión y alta conductividad térmica y eléctrica, teniendo la mejor relación de beneficios-costos que cualquier otro metal común.

1.3.6.2.Propiedades físicas del aluminio

1.3.6.2.1. Color

Es un metal blanco plateado, con una alta reflectividad de la luz y el calor. (Sumitec).

2.3.5.1.1 Densidad

La ligereza de la masa (peso) del aluminio es una de las propiedades más conocidas que este metal posee. Un centímetro cúbico de aluminio puede tener una masa aproximadamente de 2,699 g, comparado con los 7,85 g del acero y 8,46 g del cobre. Su

peso es casi un tercio del acero. Esta ventaja ha permitido el desarrollo de muchas industrias como la aeronáutica y el transporte, además de facilitar la manipulación de los perfiles, reduciendo los costos de transporte y mano de obra. (Sumitec).

1.3.6.2.2. Conductividad

Aparte del cobre, el aluminio es el único metal común que posee una alta conductividad como para ser usado como conductor eléctrico. Su conductividad representa el 63,8% de la del cobre. Sin embargo, con igual masa de base, el aluminio dobla la capacidad conductiva del cobre. Para una misma capacidad de conducción eléctrica, un conductor de aluminio puede tener la mitad de la masa, que la que podría tener la sección transversal de un conductor de cobre. (Sumitec)

1.3.6.2.3. Resistencia a la corrosión

Se debe a la formación espontánea de una película delgada de óxido de aluminio que es insoluble en agua, la cual protege del medio ambiente y la corrosión, tanto en forma de metal puro como cuando forma aleaciones, la cual de las mismas ventajas que el acero inoxidable y lo hace verse muy bien en comparación con el acero. (Sumitec)

1.3.6.2.4. Elasticidad

El módulo de elasticidad del aluminio es más bien bajo y es sensible a los cambios pequeños en la cantidad de impurezas presente. El alargamiento elástico del aluminio y sus aleaciones bajo un esfuerzo dado, es cerca de tres veces más grande que el del acero. Esto es ventajoso en el caso de los miembros estructurales que requieren resistir al impacto. (Sumitec)

1.3.6.3. Propiedades mecánicas del aluminio

1.3.6.3.1. Resistencia a la ruptura

El aluminio puro comercial posee una resistencia a la ruptura sobre los 90 Mega pascales y este valor puede aproximarse al doble cuando es trabajado en frío. Sus propiedades mejoran largamente al someter al aluminio a aleaciones con pequeños porcentajes de otros metales

como el cobre, magnesio, silicio, manganeso o zinc. Algunas de estas aleaciones pueden incrementar su resistencia y dureza mediante tratamiento térmico, especialmente con aleaciones de silicio – magnesio. (Sumitec)

1.3.6.3.2. Resistencia a la tensión

El aluminio posee una resistencia a la tensión de aproximadamente 300 Mpa, en condiciones normales de tratamiento térmico, sobre el 70% de la resistencia que posee el acero. (Sumitec)

1.3.6.3.3. Resistencia a la flexión

La resistencia típica a la flexión de la aleación 6061 T6 es de 270 Mpa, igual que la resistencia del acero. Esta aleación posee una alta resistencia considerando su reducida masa. (Sumitec).

1.3.6.3.4. Módulo de elasticidad

Medida de la rigidez de un material. El módulo de elasticidad se mantiene constantes sobre el rango elástico de un material, actuando del mismo modo para aleaciones de aluminio. En consecuencia, todas las estructuras de aleación de aluminio de la misma dimensión, sufrirán igual flexión sobre una carga, sin embargo, la rigidez y la tensión no serán de igual magnitud. Con un tratamiento térmico o trabajo en frío, se incrementa el límite de resistencia a la tensión de una aleación, más no altera su módulo de elasticidad. (Sumitec).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia del uso de viruta de aluminio como adición en diferentes porcentajes en la matriz de concreto, a través del ensayo de muestras en el laboratorio, con el fin de evaluar si puede ser usado como material alternativo para la construcción.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la viruta de aluminio por medio de ensayos de laboratorio (Granulometría, peso unitario).
- Determinar la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto con adición de viruta de aluminio en diferentes porcentajes de la mezcla, a edades de 7, 14 y 28 días.
- Comparar la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto con adición de virutas de aluminio, versus las mezclas de concreto sin la adición del residuo, a edades de 7, 14 y 28 días.
- Determinar la resistencia a la flexión (a través del módulo de rotura) de las mezclas de concreto con adición de viruta de aluminio, a edades de 7, 14 y 28 días.
- Comparar la resistencia a la flexión (a través del módulo de rotura) de las mezclas de concreto con adición de virutas de aluminio, versus las mezclas de concreto sin la adición del residuo, a edades de 7, 14 y 28 días.
- Determinar el peso específico del concreto fraguado con adición de viruta de aluminio.
- Comparar el peso específico del concreto fraguado con adición de viruta de aluminio, versus las mezclas concreto fraguado sin la adición del residuo.

- Determinar la manejabilidad de mezclas de concreto en estado plástico con adición de viruta de aluminio, a través de la medida del asentamiento (Slump).
- Comparar la manejabilidad de mezclas de concreto en estado plástico con adición de viruta de aluminio, versus las mezclas concreto en estado plástico sin la adición del residuo.
- Determinar la capacidad de absorción del concreto fraguado con adición de viruta de aluminio.
- Comparar la capacidad de absorción del concreto fraguado con adición de viruta de aluminio, versus las mezclas concreto fraguado sin la adición del residuo.

3. ALCANCE

3.1. DELIMITACIÓN ESPACIAL

El campus Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena se encuentra ubicada en la Calle 30, No. 48-152 en la capital del departamento de Bolívar en Colombia. La elaboración, preparación y estudio de las muestras de concreto tanto adicionado como tradicional, se realizó en el Laboratorio de Materiales de dicha institución.



Figura 3. Ubicación de la Universidad de Cartagena, sede Piedra de Bolívar.

Fuente: Google maps.

3.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL

El presente trabajo de investigación se desarrolló durante el segundo periodo académico del año 2017, entre los meses de agosto a octubre.

3.3 DELIMITACIÓN CONCEPTUAL

En el estudio se hizo énfasis en el análisis de las características físicas y mecánicas (resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, manejabilidad, absorción y peso específico) de una mezcla de concreto (simple) tradicional adicionada con diferentes porcentajes de residuos de aluminio en viruta. Para esto se realizaron diferentes ensayos bajo los parámetros de la Norma Técnica Colombiana NTC 673, NTC 3459, NTC 4025, NTC 32, NTC 174, NTC 77 y las normas establecidas por el Instituto Nacional de Vías de Colombia INVIAS: I.N.V. E – 402 -07, I.N.V. E – 410 – 07, I.N.V. E – 214 – 07, I.N.V. E – 217 – 07.

3.4. RESULTADOS ESPERADOS

Luego de realizar mediante ensayos de laboratorio el análisis de las característica físicas y mecánicas de concreto tradicional, adicionado con diferentes cantidades de viruta de aluminio, se espera encontrar mejoras en las propiedades de la mezcla concreto adicionado, y por ende si el residuo de aluminio puede ser utilizado como un material alternativo en la construcción para la fabricación de concreto y los usos del mismo. Lo anterior se logrará a través de la comparación de los datos obtenidos en las muestras adicionadas y muestras de concreto tradicional sin ninguna alteración.

3.5. PRODUCTO FINAL A ENTREGAR

Terminada la investigación se tiene como resultado un análisis de las variaciones en el comportamiento de las propiedades de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, manejabilidad, absorción y peso específico del concreto adicionado con diferentes porcentajes de material reciclado de aluminio en viruta con respecto a las características de un concreto convencional (sin adición de aluminio), y una recomendación acerca de la utilidad que puede tener en campo de la construcción, el material de estudio en este trabajo de investigación a partir de las propiedades resultantes.

3.6. PRODUCTOS COMPLEMENTARIOS

Este trabajo de grado, sirve como base para futuros estudios, que traten la misma línea de investigación, buscando incorporar a manera de adición materiales no convencionales en la matriz del hormigón, utilizando iniciativas y/o metodología similares a las del presente documento, o la utilización del mismo material, estudiando diferentes propiedades del concreto simple o reforzado.

3.7. LIMITACIONES

En esta investigación no se tiene en cuenta la influencia de los residuos de aluminio en viruta sobre las propiedades químicas de la mezcla de concreto, ni las reacciones químicas que puedan presentarse entre el aluminio y el acero de refuerzo, este último dado que las muestras y ensayos se realizaran únicamente con concreto simple.

4. METODOLOGIA

Con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados del presente estudio experimental que se llevó a cabo con datos numéricos para determinar las características de las muestras de concreto adicionado y tradicional, se tuvo la siguiente forma de operación planteada mediante la Figura No. 4.

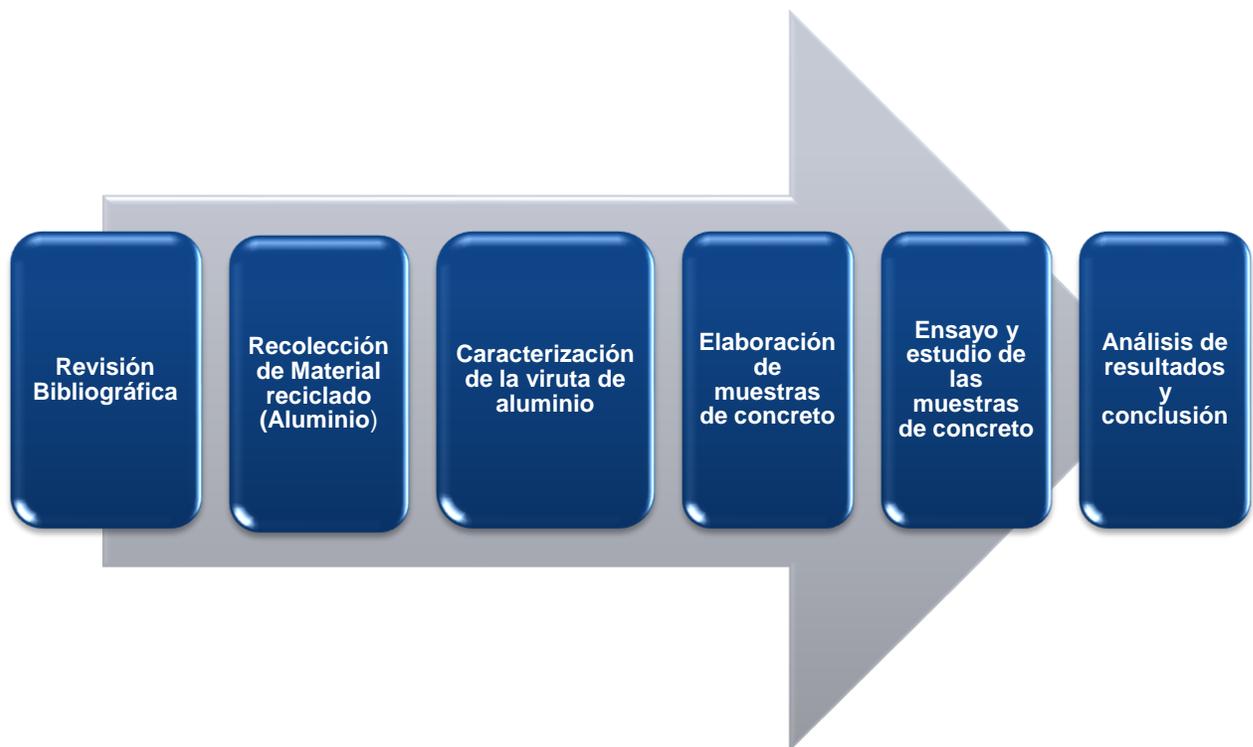


Figura 4. Metodología a seguir para el cumplimiento de los objetivos.

Fuente: Autores

4.1. REVISION BIBLIOGRAFICA

Se utilizó información de referencia extraída de las bases de datos de la Universidad de Cartagena, y trabajos de grado de la misma línea de investigación de varias universidades de Colombia y otros países, para tomar de referencia los métodos utilizados y las características estudiadas en los diferentes documentos dependiendo de los materiales

incorporados en las mezclas de concreto. También se consultaron las normas INV y NTC se consultaron para determinar los procedimientos, ensayos de estudio de las muestras, y parámetros que rigen en Colombia para tener resultados confiables y acertados.

4.2. RECOLECCION DEL MATERIAL RECICLADO

El residuo de aluminio en viruta se recolectó en diferentes empresas de la ciudad de Cartagena, dedicadas a la fabricación de elementos arquitectónicos con perfiles de aluminio, dado que el material de estudio es el resultado del corte de dichos perfiles con cortadoras de disco, valga la redundancia.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA VIRUTA DE ALUMINIO

La caracterización de la viruta de aluminio se llevó a cabo en laboratorios y se estudió una muestra del material como si se tratase de un suelo granular. Se realizó prueba de granulometría para medir los porcentajes de material que pasan por cada tamiz según lo establecido en la norma NTC 77. También se determinó la densidad bulk de material (peso unitario suelto y compactado) en kg/m^3 según lo estipulado en la norma INV E-217-07.

4.4. ELABORACION DE MUESTRAS DE CONCRETO

Obtenido el material reciclado, se elaboraron en laboratorios mezclas de concreto con cemento portland tipo I, arena y triturado calcáreo como agregado grueso, con adiciones del material reciclado de 0%, 5%, 10% y 20% en volumen del total de la mezcla, incorporándolo de forma homogénea al mezclar la parte seca del concreto antes de adicionar el agua.

Con dichas mezclas se fabricaron un total de 36 cilindros de 15 cms de diámetro y 30cms de altura, y 36 muestras primaticas de 50x15x15 cms, para los diferentes ensayos a las diferentes edades del concreto fraguado (3 muestras para cada edad y porcentaje de agregado reciclado), todo lo anterior se realizó dentro del marco y especificaciones de las

normas INVIAS. Cabe resaltar que las mezclas fueron elaboradas de forma manual, utilizando un diseño de mezcla con proporciones volumétricas 1:2:2.

4.5. ENSAYO DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO

Con las muestras cilíndricas fraguadas se realizaron ensayos de compresión para determinar la resistencia del concreto en MPa a edades de 7, 14 y 28 días y diferentes porcentajes de adición de material reciclado (viruta de aluminio), de la misma forma se realizaron los ensayos a flexión con las muestras prismáticas por el método de viga simple cargada en el punto central. Los datos de esfuerzo de obtuvieron a partir de las cargas máximas obtenidas en los ensayos y las dimensiones de las muestras.

Los ensayos de manejabilidad (Slump) se midieron en cms y se realizaron con muestras de concreto en estado plástico anteriormente a la fabricación de las muestras fraguadas y los ensayos de absorción por inmersión y peso específico se realizaron con las muestras de concreto fraguado luego de ejecutarse los ensayos de resistencia mecánica en unidades de porcentaje de absorción y kg/cm^3 respectivamente.

Todos los ensayos se realizaron bajos los términos y especificaciones y procedimientos de las normas INVIAS y NTC.

4.6. ANALISIS DE RESULTADOS

Una vez se obtuvieron todos los resultados de los diferentes ensayos, se procedió a realizar los cálculos y organizar la información obtenida a través de tablas y graficas comparativas para estudiar la variación de las propiedades del concreto con la adición de la viruta de aluminio en diferentes porcentajes tomando como referencia el comportamiento de las muestras de concreto sin adición y se sacaron conclusiones al respecto.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. CARACTERIZACION DE LA VIRUTA DE ALUMINIO

El estudio de las características del material a adicionar, es decir, el residuo de aluminio, en la matriz de concreto fue de vital importancia para la correcta realización de las muestras de ensayo a la hora de la dosificación del mismo, por tal motivo se realizó la medida de la gradación y la determinación del peso unitario como se muestra a continuación.

5.1.1. GRANULOMETRIA

Inicialmente se realizó una limpieza manual extrayendo los cortes más grandes del material reciclado y demás impurezas de tamaño considerable que este presentaba con el fin de dejar el material en las condiciones en las que sería utilizado para la elaboración de las muestras.



Figura 5. Limpieza manual de la viruta de aluminio.

Fuente: Autores.

Para el estudio granulométrico se tomó una muestra de 600 gramos del residuo de aluminio limpio, la cual fue tamizada de forma manual y mecánica (con zarandeadora), con una serie tamices para suelos finos así: No.4, No. 8, no. 16, No. 30, No. 50, No. 100, No. 200, y se obtuvieron los porcentajes que pasan por cada uno como se muestra en la Tabla 1.



Figura 6. Tamizado de la viruta de aluminio.

Fuente: Autores

Tamiz	Masa Retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
No. 4	0,6	0,10	0,10	99,90
No. 8	5,3	0,88	0,98	99,02
No. 16	94	15,67	16,65	83,35
No. 30	245,6	40,93	57,58	42,42
No. 50	195,4	32,57	90,15	9,85
No. 100	46,5	7,75	97,90	2,10
No. 200	9,5	1,58	99,48	0,52
Fondo	2	0,33	99,82	0,18
	598,9			

Tabla 1. Datos de análisis granulométrico para la viruta de aluminio.

Fuente: Autores

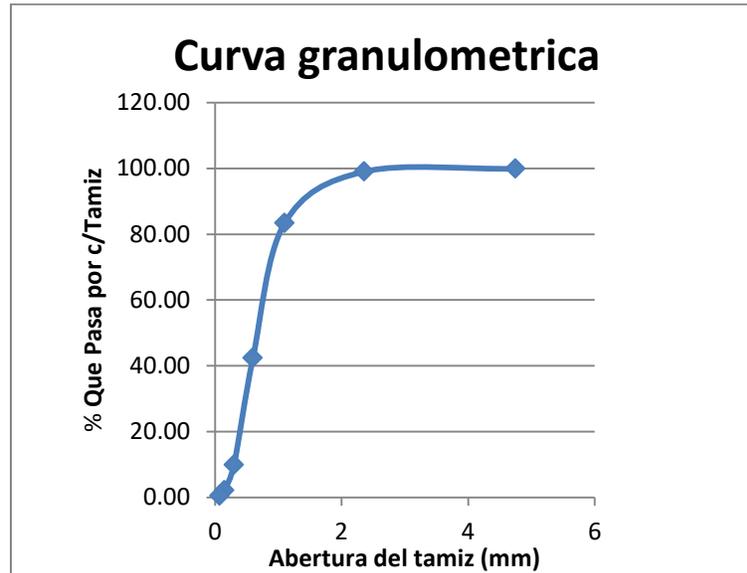


Figura 7. Curva granulométrica de la viruta de aluminio.

Fuente: Autores

5.1.2. PESO UNITARIO (BULK)

Se realizó la medición del peso unitario de la viruta de aluminio según lo estipulado en la norma INV.E 217-07. En primera instancia se calibró el recipiente teniendo en cuenta el peso de la cantidad de agua, y su temperatura, contenida en el mismo para determinar con exactitud su capacidad.

Datos	
Peso balde (kg)	2,546
Peso balde + agua (kg)	5,358
Peso agua (kg)	2,812
Temperatura agua (°C)	26
Densidad agua (kg/m ³)	996,59
Capacidad balde (m ³)	0,003

Tabla 2. Datos de la calibración de la capacidad del balde.

Fuente: Autores

Posteriormente se realizaron cinco ensayos tanto para material suelto como para material compactado continuando con las indicaciones de la norma citada anteriormente para obtener los respectivos pesos unitarios, a través de los pesos promedios calculados, como se muestra a continuación.



Figura 8. Proceso de medición del peso unitario viruta de aluminio en el laboratorio.

Fuente: Autores.

	Muestra	Peso Balde (kg)	Peso Balde+Material (kg)	Peso Material (kg)	Volumen Balde (m ³)	Peso Unitario Material (kg/m ³)
Compactado	1	2,546	3,904	1,358	0,003	452,667
	2		3,878	1,332		444,000
	3		3,906	1,360		453,333
	4		3,912	1,366		455,333
	5		3,908	1,362		454,000
	Promedio		3,902	1,356		451,867

Tabla 3. Calculo del peso unitario compactado de la viruta de aluminio.

Fuente: Autores

	Muestra	Peso Balde (kg)	Peso Balde+Material (kg)	Peso Material (kg)	Volumen Balde (m ³)	Peso Unitario Material (kg/m ³)
Suelto	1	2,546	3,670	1,124	0,003	374,667
	2		3,736	1,190		396,667
	3		3,672	1,126		375,333
	4		3,674	1,128		376,000
	5		3,670	1,124		374,667
	Promedio		3,684	1,138		379,467

Tabla 4. Calculo del peso unitario suelto de la viruta de aluminio.

Fuente: Autores

Finalmente se obtuvieron los siguientes pesos unitarios:

Peso unitario suelto (kg/m³)	379,467
Peso unitario compactado (kg/m³)	451,867

Tabla 5. Peso unitario de la viruta de aluminio.

Fuente: Autores

El peso unitario suelto obtenido (ver *Tabla 5*) es muy bajo en comparación con los agregados normales cuyos valores, según la experiencia, oscilan entre 1300 kg/m³ y 1800 kg/m³ según el grado de compactación (RIVERA), por lo cual se espera que la densidad del concreto fabricado con el material disminuya, una de las características de estudio.

5.2. ENSAYO DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO

5.2.1. PROPIEDADES FISICAS

✓ Manejabilidad

Una vez se realizaron las mezclas de concreto con los diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio de forma manual, y se observó que las mismas se encontraban homogéneas, se procedió a realizar el ensayo del Slump donde se obtuvieron asentamientos como se muestra en la siguiente tabla.

Asentamiento			
% viruta aluminio	cm	Pulgada	Variación
0	7.800	3.071	-
5	6.200	2.441	-21%
10	3.200	1.260	-59%
20	3.000	1.181	-62%

Tabla 6. Medida de asentamiento de mezclas con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio.

Fuente: Autores

Se muestra en la *Tabla 6* como a medida que aumenta el porcentaje de adición de viruta de aluminio disminuye la medida del asentamiento de las mencionadas muestras y por consiguiente su manejabilidad, dado que se obtuvieron mezclas más secas a mayor porcentaje de adición.

✓ Densidad y Absorción

Se tomaron muestras pequeñas de concreto con los diferentes porcentajes de adición (0, 5, 10 y 20 %), obtenidas a partir de los residuos de los ensayos de flexión y se tomaron los datos de peso saturado superficialmente seco, peso en el agua y peso seco de cada una de las muestras en el laboratorio para obtener los datos de densidad y absorción que se muestran a continuación.



Figura 9. Mediciones para determinar la densidad y la absorción.

Fuente: Autores.

% de viruta de aluminio	Absorción
0	9.68%
5	10.08%
10	11.52%
20	14.52%

Tabla 7. Absorción del concreto a diferentes porcentajes de adición de aluminio.

Fuente: Autores

Se observa en la tabla anterior como aumenta la absorción del hormigón a medida que aumenta la cantidad de adición de viruta de aluminio en la mezcla.

% de viruta de aluminio	Densidad Ton/m ³	% Variación
0	1.987	-
5	1.841	-7.32%
10	1.823	-8.23%
20	1.684	-15.23%

Tabla 8. Densidad del concreto a diferentes porcentajes de adición de aluminio.

Fuente: Autores.

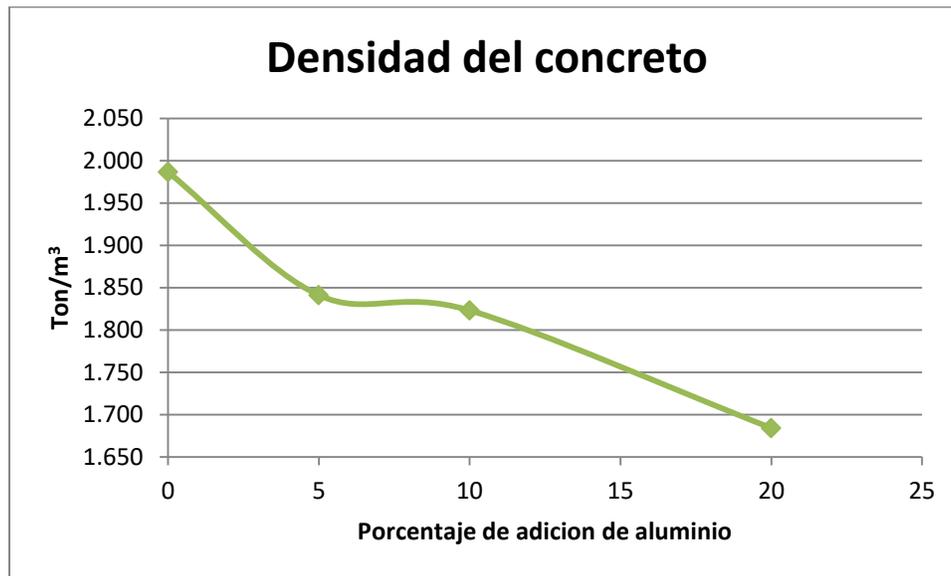


Figura 10. Porcentaje de adición de viruta de aluminio en la mezcla vs densidad del concreto resultante.

Fuente: Autores.

En la *Tabla 8* y en el gráfico decreciente de la *Figura 10*, se observa una disminución del peso por unidad de volumen del concreto, a medida que aumenta el porcentaje de adición de aluminio en la mezcla, lo cual podría resultar beneficioso a la hora de diseñar elementos estructurales con menores cargas muertas, únicamente teniendo en cuenta el estudio individual de esta propiedad.

Las variaciones en cuanto a absorción y densidad, pudieron estar debidas a un probable aumento de la porosidad, provocado por una reacción de liberación de aire y expansión (aumento del volumen), que se observó en las mezclas adicionadas con viruta de aluminio en momentos posteriores a su vaciado en los moldes.



Figura 11. Concreto expandido en estado fraguado y en momentos posteriores al vaciado en estado plástico.

Fuente: Autores.

5.2.2. ENSAYOS MECANICOS

Luego de la fabricación con mezclado manual de las muestras prismáticas y cilíndricas, se realizaron ensayos de flexión y compresión del concreto a edades de 7, 14, y 28 días, dichas muestras fueron curadas hasta el día de los respectivos ensayos, los resultados se resumen y se analizan las variaciones con distintas cantidades de adición de viruta de aluminio a continuación.

✓ Resistencia a la compresión

Carga aplicada a Compresión (KN)			
% de viruta de aluminio	Edad (días)		
	7	14	28
0	135	163.5	216
5	48.3	51.5	60.2
10	39.7	43.5	54.5
20	28.4	31.4	33.5

Tabla 9. Cargas máximas soportadas a la compresión.

Fuente: Autores

% viruta de aluminio	Esfuerzo a la Compresión (psi)			Esfuerzo a la Compresión (MPa)		
	Edad (días)					
	7	14	28	7	14	28
0	1091.346	1321.741	1746.153	7.639	9.252	12.223
5	390.459	416.328	486.659	2.733	2.914	3.407
10	320.936	351.656	440.580	2.247	2.462	3.084
20	229.587	253.839	270.815	1.607	1.777	1.896

Tabla 10. Esfuerzo a la compresión de muestras con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio en MPa y psi.

Fuente: Autores

Variación Porcentual de F'c (MPa)			
% de viruta de aluminio	Edad (días)		
	7	14	28
0	7.639	9.252	12.223
5	-64.22%	-68.50%	-72.13%
10	-70.59%	-73.39%	-74.77%
20	-78.96%	-80.80%	-84.49%

Tabla 11. Variación del esfuerzo a la compresión de muestras con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio.

Fuente: Autores.

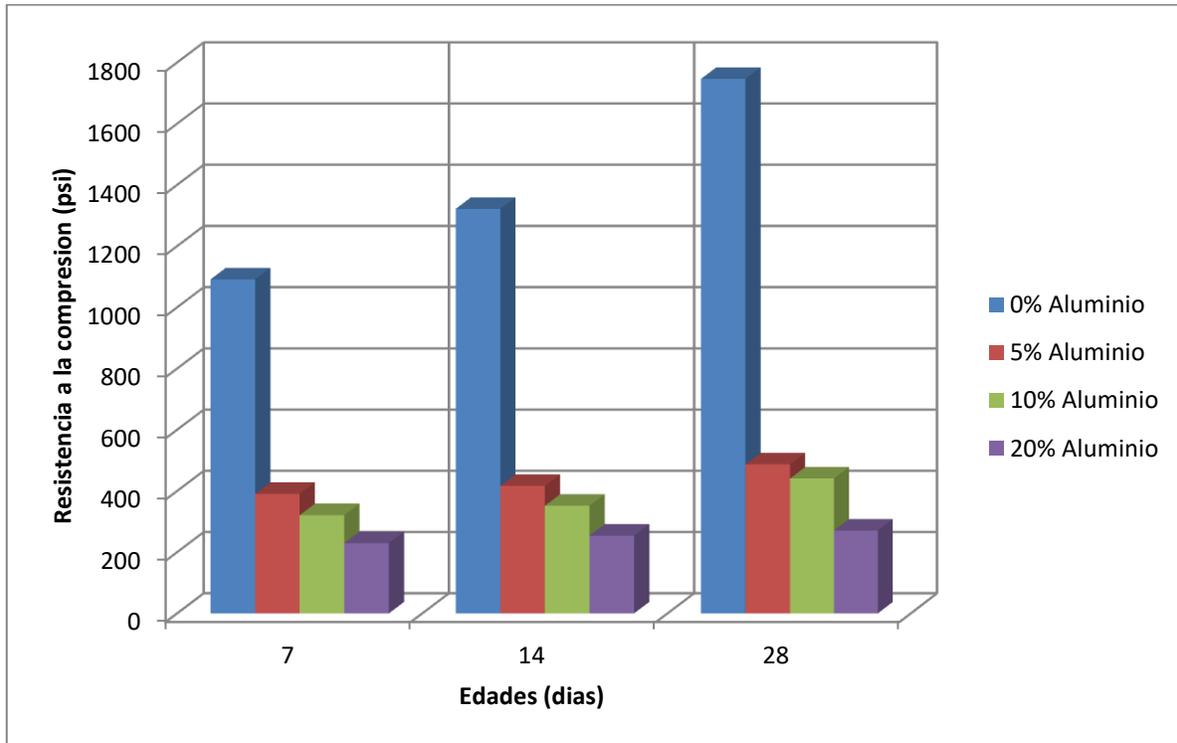


Figura 12. Resistencia a la compresión vs edades del concreto a diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio.

Fuente: Autores.

Como se puede apreciar en la *Tabla 11* y la *Figura 12*, la variación negativa de la resistencia a la compresión del concreto fue considerablemente alta comparada con la muestra sin ningún tipo de adición, manteniendo una relación inversa con respecto a la cantidad de viruta de aluminio adicionada.

✓ Resistencia a la flexión

A continuación se muestran los esfuerzos máximos obtenidos para ensayos a la flexión realizados con cargas aplicadas en el punto medio de la luz de las viguetas.

% de viruta de aluminio	Módulo de rotura (psi)			Módulo de rotura (MPa)		
	Edad (días)					
	7	14	28	7	14	28
0	240.762	444.952	512.000	1.685	3.115	3.584
5	182.857	374.857	478.476	1.280	2.624	3.349
10	167.619	271.238	411.429	1.173	1.899	2.880
20	124.952	192.000	277.333	0.875	1.344	1.941

Tabla 12. Módulo de rotura de muestras de concreto con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio en Mpa.

Fuente: Autores

% de viruta de aluminio	Variación del Módulo de rotura (MPa)		
	Edad (días)		
	7	14	28
0	1.404	3.115	3.584
5	-8.86%	-15.75%	-6.55%
10	-16.46%	-39.04%	-19.64%
20	-37.72%	-56.85%	-45.83%

Tabla 13. Variación del Módulo de rotura de muestras de concreto con diferentes porcentajes de adición de viruta de aluminio.

Fuente: Autores

En cuanto al módulo de rotura o resistencia a la flexión se observó en las muestras, un comportamiento igual al de la resistencia a compresión, mostrando una pérdida de la resistencia, aunque en porcentajes menores, con el aumento del porcentaje de adición del material reciclado, lo anterior con respecto a las muestras patrón (0% de adición), comparación que se realizó de igual forma para todas las características de estudio.

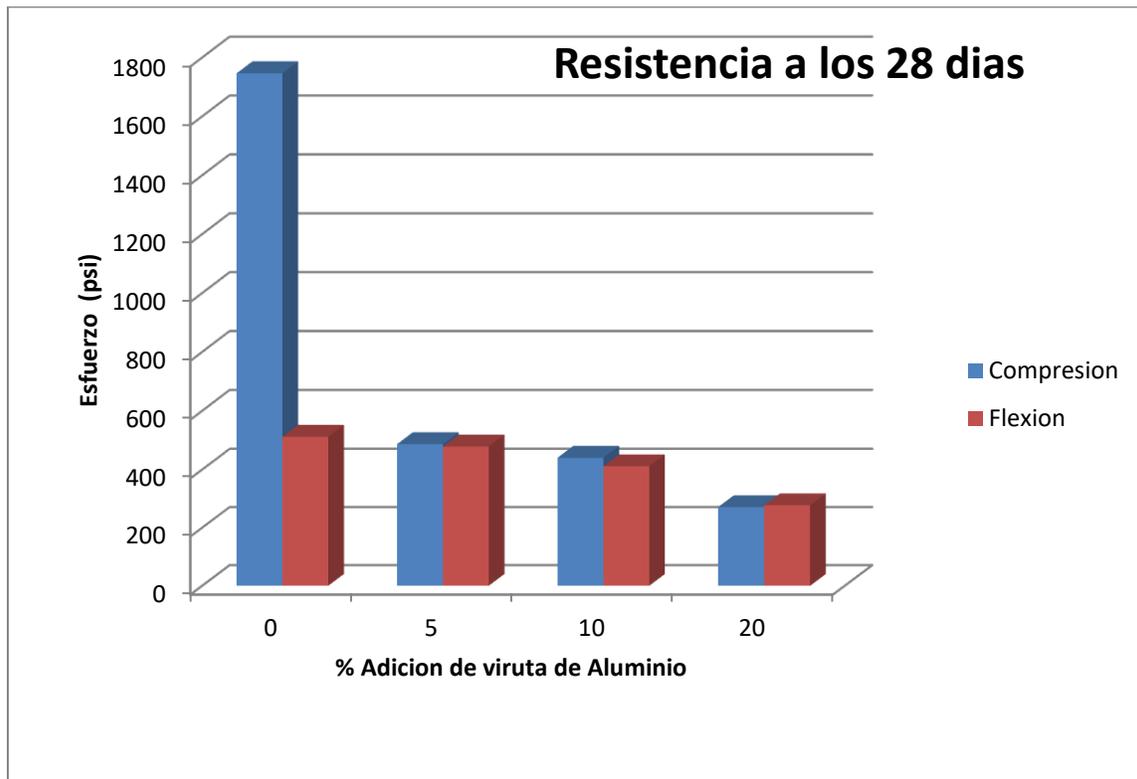


Figura 13. Resistencia a la compresión y flexión a edad de 28 días vs porcentajes de adición de viruta de aluminio.

Fuente: Autores.

Finalmente vemos en la *Figura 13*, como disminuye la resistencia del concreto a los 28 días (resistencia final), tanto a compresión, como a flexión, a medida que aumenta el porcentaje de adición de viruta de aluminio.

6. CONCLUSIONES

Para conocer las propiedades del material a adicionar se realizó la medición de diferentes características, que permitieron encontrar que este presentaba una gradación con tamaño máximo de 4.75 milímetros, además un peso suelto de 379.467 kilogramos/metro cubico y peso compactado de 451.867 kilogramos/metro cubico. Este peso unitario seco es muy bajo en comparación con los agregados normales cuyos valores, según la experiencia, oscilan entre 1300 kg/m³ y 1800 kilogramos/metro cubico según el grado de compactación (Rivera, G.).

En cuanto a propiedades de la mezcla en estado plástico se midió la manejabilidad de la mezcla y se obtuvieron slumps de: 6.2, 3.2 y 3 centímetros para mezclas con porcentajes de adición de aluminio del 5, 10 y 20 % respectivamente lo cual representó disminuciones del 21, 59 y 62 % con respecto a la muestra sin adición, en la que se obtuvo un asentamiento de 7,8 centímetros, lo anterior daba como resultado mezclas más secas y por ende menos manejables a medida que aumentaba la adición del material reciclado y por tanto se considera que disminuye su capacidad de ser colocado y consolidado apropiadamente (Guzman, 2001).

Para los ensayos de densidad se obtuvieron valores de 1.84, 4.82 y 1.68 toneladas/metro cubico para unos porcentajes de adición de aluminio del 5, 10 y 20 % respectivamente lo cual representó disminuciones del 7.32, 8.23 y 15,23 % en ese mismo orden con respecto a la muestra patrón que reflejó una densidad de 1.99 toneladas/metro cubico. De esta manera se muestra una disminución del peso por unidad de volumen del concreto, a medida que aumenta el porcentaje de adición de aluminio en la mezcla, lo que podría resultar beneficioso en el diseño estructural ya que se disminuirían las cargas muertas.

Para los ensayos de absorción se encontró una relación directamente proporcional, es decir un aumento de dicha propiedad con respecto a la cantidad de aluminio adicionada, obteniendo valores de 10.08, 1.52, y 14,52 % para adiciones del 5, 10 y 20% respectivamente, mientras que para la muestra tradicional fue de 9,68%.

Los análisis de resultados de resistencia, tanto para compresión como para flexión, fueron desfavorables comparados con las características de la muestra patrón.

En cuanto a la compresión, donde fueron más desalentadores los resultados, y tomando los datos obtenidos para las muestras con edades de 28 días, los valores de resistencia fueron 486.66, 440.58 y 270.82 libras por pulgada cuadrada para porcentajes de adición de 5, 10 y 20% respectivamente, mientras que para la mezcla sin alterar fue de 1746.53 libras por pulgada cuadrada, lo que representa variaciones de 72.13, 74.77 y 84.49 %.

Por su parte la flexión, teniendo en cuenta la misma edad para los ensayos, se obtuvieron valores de módulo de rotura de 478.48, 411.43 y 277.33 libras por pulgada cuadrada para porcentajes de adición de 5, 10 y 20% respectivamente, y para la mezcla tradicional fue de 512 libras por pulgada cuadrada, lo cual se traduce en variaciones negativas de 6.55, 19.64 y 45.83%, resultados no tan caóticos como los de la resistencia a la compresión pero tampoco aceptables para un material que tiene funciones estructurales como lo es el concreto.

Finalmente en la *Figura 13* de la sección de Resultados y Discusión es totalmente evidente la disminución exagerada que provoco la viruta de aluminio en la propiedad de resistencia a compresión del hormigón, tanto así, que se observa como en las muestras de concreto adicionado parecen igualarse ambas resistencias finales (compresión y flexión), y para el caso específico de 20% de adición, superando la resistencia a la flexión sobre la resistencia a la compresión (a los 28 días); lo cual es preocupante, siendo el concreto simple un material que ofrece una resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión y muy escasa a los de tracción y por tanto es inadecuado para formar piezas que han de resistir tracciones o flexiones (Guzmán, 2001).

Sin embargo la disminución de la resistencia el en concreto es un fenómeno común en estudios de adición y reemplazo de nuevos materiales en la mezcla, como es el caso del uso del cuesco de palma africana, la granalla de silicato de aluminio y el caucho residuo de llantas, los cuales fueron utilizados en trabajos de investigación citados en la sección de Marco de Referencia del presente documento.

Dicho lo anterior, no se considera segura, ni viable la adición de la viruta de aluminio en las mezclas de la piedra artificial, y en ese mismo orden de ideas, la inclusión de este material (a manera de adición) en mezclas de hormigón no es una alternativa útil para la disposición final alternativa de este material desechado.

La variación que se observó entre los resultados obtenidos y los esperados, pudo estar debida a la pérdida de las proporciones entre la cantidad de cemento (característica que afecta directamente la resistencia) y el total de la mezcla, siendo el material de estudio utilizado en forma de adición.

Además la reacción de liberación de aire y expansión inesperada que se produjo en las mezclas adicionadas, con motivos exactos desconocidos (dado que esta investigación se limitó al estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las muestras) que produjo la incorporación de la viruta de aluminio en las mismas (muestras), pudo producir cambios en la matriz que debilitaran su cohesión y la adherencia de todos sus componentes y por tanto disminuyera su resistencia mecánica.

7. RECOMENDACIONES

Se observó que las mezclas con adición de viruta de aluminio eran más secas, se recomienda la utilización de concretos de estudio con menores resistencias de diseño que permitan mayores relaciones agua/cemento y por ende se obtengan mezclas más manejables y homogéneas, esto para efecto de estudios de la misma línea de investigación, teniendo en cuenta que las muestras se realizan de forma manual y si aditivos plastificantes.

Se recomienda realizar un estudio químico de la mezcla (limitación del presente documento), para determinar cuál fue el material que resulto reactivo con la viruta de aluminio, lo anterior permitiría tomar decisiones que lleven a la obtención de resultados satisfactorios.

Para tratar de variar lo resultados y encontrar unos más favorables en caso de no realizarse un estudio químico se recomienda cambiar el tipo de agregado para las mezclas por canto rodado y observar si se produce la misma reacción de liberación de aire. Además se recomienda optar por utilizar la viruta de aluminio a manera de reemplazo del agregado fino, ya que se considera que a manera de adición pudo afectar la resistencia, dado que al agregar el material reciclado sobre las cantidades estándar se está reduciendo la cantidad de cemento por metro cubico de la mezcla.

8. BIBLIOGRAFIA

Anaya, E., & Suarez, O. (2016). *Evaluación de la resistencia a la comprensión para mezclas de concretos de 3000 PSI elaboradas con combinaciones de agua del Rio Magdalena y de agua potable a distintas proporciones* (Tesis de grado). Universidad de Cartagena.

Arleth, T., & Gervis, G. (2016). *Variación en las propiedades físicas y mecánicas de una matriz de concreto al incorporar cuesco de palma africana como agregado* (Tesis de grado). Universidad de Cartagena.

Arriaga, L. (2013). *Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado* (Tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería.

ASOCRETO. (2011). *Durabilidad y patología del concreto*. Bogota: LEGIS.

ASOCRETO. (2011). *Tecnología del concreto*. Bogotá: LEGIS.

Bravo, M., & Brito, J. (2011). *El hormigón fabricado con árido de neumáticos usados: rendimiento relacionado a aumentar la durabilidad* (Tesis de grado). Universidad Técnica de Lisboa.

Frigione, M. (2010). *El reciclado de botellas de PET como agregado fino en el concreto* (Tesis de grado). Universidad de Salento, Italia.

Generalidades del aluminio. Sumitec. Recuperado el 13 de Abril del 2017, de:
<http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/GENERALIDADES%20DEL%20ALUMINIO.pdf>

Gomezjurado, J. (1997). *Tecnología y propiedades*. Bogotá: ASOCRETO.

González, G. (2017). *Concretos Reciclados*. [Concretosreciclados.com.mx](http://www.concretosreciclados.com.mx). Recuperado el 18 de marzo del 2017, a partir de <http://www.concretosreciclados.com.mx/>

Martinez, L., & Marco, H. (2015). *Estudio y caracterización del residuo de la fabricación de tuberías en acero para determinar su uso en la producción de morteros y concretos* (Tesis de grado). Universidad de Cartagena.

Ministerio de comercio, industria y turismo. (2006). *Consumo y Comercio de Chatarra*. República de Colombia.

Nebel, B., & Wright, R. (1999). *Ciencias ambientales, ecología y desarrollo sostenible*. Ciudad de México: Prentice Hall.

Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T., & Bernadin, A. (2010). *El hormigón fabricado con caucho reciclado de neumáticos: Efecto de la activación alcalina y la adición de humo de sílice* (Tesis de grado). Universidad de Santa Catarina.

Pérez, E., & Torado, K. (2009). *Propuesta de concreto modificado traslucido no estructural utilizando vidrio y fibra óptica* (Tesis de grado). Universidad Industrial de Santander.

Quesada, J., & Rosso, D. *Cuadernillo de medio ambiente para comunidades indígenas*. Unicef.org. Recuperado el 18 Marzo del 2017, a partir de:
<https://www.unicef.org/argentina/spanish/manual-medioambiente-def2.pdf>

Quiroga, R. (2007). Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile. Recuperado de: <http://www.cepal.org/deype/publicaciones/xml/4/34394/LCL2771e.pdf>

Ramírez, D., & María, V. (2013). *Evaluación de la resistencia mecánica del concreto modificado con residuo de granalla de silicato de aluminio* (Tesis de grado). Universidad de Cartagena.

Reciclaje de aluminio. Amigos de la Tierra. Recuperado el 16 de Abril del 2017, de: http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/educacio_i_sostenibilitat/educacio_per_a_la_sostenibilitat/suport_educatiu/recursos_educatius/residus/recialu/reciclatge_de_l_alumini.pdf

Rivera, G. (s.f.). *Tecnología del concreto y el mortero concreto*. Universidad del Cauca.

Sánchez, D, (2001), *Tecnología del concreto y del mortero*, Bhandar Editores.

Teo, D. C., Mannan, M. A., & Kurian, V. J. (2006). *Structural Concrete Using Oil Palm Shell (OPS) as Lightweight aggregate*. TUBITAK, 251-257.

Torres, H. (2014). *Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho* (Tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Vanegas, C., & Ucros, R. (2015). *Aprovechamiento de escombros como agregado grueso para la fabricación de adoquines estándar*. (Tesis de grado). Universidad de Cartagena.

ANEXOS

ANEXO A

Diseño de Mezcla de Concreto de 3.000 psi (21 Mpa). Fuente: Barrios M. (Director).

✓ **Parámetros agregado Fino: Arena Media de Rotinet.**

Módulo de Finura de la arena: 2.66
Peso Unitario Suelto: 1,490 g/cm³
Peso específico Aparente: 2.62 g/cm³
Peso específico Bulk: 2.71 g/cm³

✓ **Parámetros agregados Grueso: Triturado calizo de 3/4”.**

Tamaño Máximo: 3/4” → 19.0 mm
Peso Unitario Suelto: 1,500 g/cm³
Peso específico Aparente: 2.60 g/cm³
Peso específico Bulk: 2.66g/cm³

✓ **Parámetros Mezcla:**

Resistencia de Diseño a Compresión $F'_c = 3.000$ Psi
Peso específico cemento Portland Tipo I.: 3,15 kg/cm³
Asentamiento de Diseño: 100 mm = 4” (Consistencia Media)
Relación Agua Cemento: **Títulos C.4.2.1 y C.4.3.1 NSR-2010**
Exposición Moderada: A/C=0.50
Contenido de Aire Naturalmente Atrapado: 2.0%
Cantidad de Agua por m³ de Concreto: 190 Lt/m³.
Tabla 11.7 “**Tecnología del Concreto y del Mortero**”.- Partículas rugosas y angulosas sin aire incluido.

✓ **Cálculos:**

Peso del Cemento = Peso del Agua / 0,50 = 190 / 0,5 = 380 kg. □ 7.6 bolsas
Cantidad de Cemento: 380 kg.
Volumen del Cemento: 380 kg / 3,150 kg/cm³ = 0,120 m³
Volumen de Agua = 0,190 m³
Volumen de la Pasta = 0,31 m³

Entonces se tiene que:
Volumen de Agregados = 0,69 m³

✓ **Combinación de Agregados:**

50% de Agregado Grueso + 50% Agregado Fino

Peso Específico promedio: $0.50 \cdot 2.62 + 0.50 \cdot 2.60 = 2.610 \text{ g / cm}^3 = 2,610 \text{ kg / m}^3$

Peso de Agregados: $0,69 \text{ m}^3 \times 2,610 \text{ kg. / m}^3 = 1800 \text{ kg.}$

Luego se tiene que:

Peso de Arena = $1,800 \text{ kg} * 0.50 = 900 \text{ kg}$

Peso de Triturado = $1,800 \text{ kg} * 0.50 = 900 \text{ kg}$

✓ **Proporciones en Peso: 1 : 2.36: 2.36**

✓ **Proporciones en Volumen:**

Volumen Suelto del Cemento: $380 \text{ kg} / 1,250 \text{ kg/m}^3 = 0.304 \text{ m}^3$

Volumen Suelto de Arena: $900 \text{ kg} / 1,490 \text{ kg/m}^3 = 0.604 \text{ m}^3$

Volumen Suelto de Triturado: $900 \text{ kg} / 1,500 \text{ kg/m}^3 = 0.600 \text{ m}^3$

✓ **Proporciones en Volumen: 1 : 1.99: 1.97**

✓ **Proporciones Aproximadas en Volumen: 1 : 2 : 2**

✓ **Resumen Por m3 de mezcla:**

Cemento: 380 kg (7.3 bolsas)

Arena: 0.604 m³

Triturado: 0.600 m³

Agua: 190 lts

ANEXO B

Mediciones para determinación de características del concreto en el laboratorio.

Fuente: Autores.

%	Peso SSS	Peso en el agua	Peso seco en el aire
0	1807.13	977.7	1647.7
5	1966.5	996.2	1786.4
10	2335	1186.5	2093.8
20	2124.6	1022.9	1855.3

**SSS: Saturado, superficialmente seco.

ANEXO C

Cargas máximas resistidas a flexión en N, para concreto de diferentes edades y diferentes porcentajes de adición. Fuente: Autores.

Carga Viguetas (N)			
% de viruta de aluminio	Edad (días)		
	7	14	28
0	7900	14600	16800
5	6000	12300	15700
10	5500	8900	13500
20	4100	6300	9100

ANEXO D

Imágenes de fabricación de muestras. Fuente: Autores.



ANEXO E

Imágenes de desencofrado de muestras. Fuente: Autores.



ANEXO F

Imágenes de ensayo de muestras a compresión y flexión. Fuente: Autores.

