

**Resistencia a la flexión de una viga de concreto obtenida a partir de incorporación de  
residuos agroindustriales.**

**Dennis Danilo Villamizar Suárez, Lizeth Tatiana Viviescas Silva**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil**

**Director**

**German Hernando Acevedo Calderón**

**Magíster en Ingeniería Estructural**

**Co-Director**

**Andrea Carolina Chaparro Tarazona**

**Magíster en Ingeniería Estructural**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**División de Ingenierías y Arquitectura**

**Facultad de Ingeniería Civil**

**2023**

### **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestro agradecimiento en primer lugar a Dios por permitirnos culminar este proyecto y no desfallecer a pesar de las complicaciones, también a nuestras familias, especialmente a nuestros padres que siempre estuvieron ayudándonos y motivándonos a continuar en cada etapa de nuestra carrera, impulsándonos a terminar este proyecto y lograr nuestra meta. De igual forma, agradecerles por su amor, apoyo incondicional y los esfuerzo que realizaron junto con nosotros a través de los años para obtener nuestro título universitario. Un sincero agradecimiento a todos aquellos docentes que nos brindaron sus enseñanzas a través de estos años e igualmente a la Universidad Santo Tomás por prestar sus instalaciones y equipos para lograr así cada uno de los objetivos planteados en este proyecto. Finalmente, a nuestros amigos y compañeros en esta aventura que hoy culmina, cerramos este capítulo de nuestra historia, pero no sin antes agradecerles por cada hora de estudio, cada trabajo realizado en conjunto y cada una de las vivencias que compartimos.

## Contenido

Introducción .....	18
1. Resistencia a la flexión de una viga de concreto obtenida a partir de incorporación de residuos agroindustriales. ....	20
1.1 Planteamiento del problema.....	20
1.2 Justificación.....	23
1.3 Objetivos .....	26
1.3.1 Objetivo general .....	26
1.3.2 Objetivos específicos.....	26
2. Marco referencial .....	27
2.1 Marco teórico .....	27
2.2 Marco conceptual .....	29
2.2.1 El concreto.....	29
2.2.2 Cemento.....	32
2.2.3 Agregados.....	36
2.2.4 Residuos Agroindustriales.....	38
2.2.5 Economía circular.....	43
2.2.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	48
2.3 Marco legal.....	50
2.3.1 Decreto 586 de 2015.....	50
2.3.2 Norma ISO 14001.....	51
2.3.3 Resolución 472 del 28 de febrero de 2017 .....	51
2.3.4 NSR-10 Título C.....	52

2.3.5 NTC 1377 .....	52
2.3.6 INV E 217.....	52
2.3.7 INV E 222.....	52
2.3.8 INV E 223.....	53
2.3.9 NTC 173 .....	53
2.3.10 NTC 2871 .....	53
2.3.11 Plan Nacional de Desarrollo 2018-2020.....	53
3. Método .....	54
3.1 Tipo y Diseño de Investigación.....	54
3.2 Población y muestra .....	55
3.3 Lugar .....	56
4. Desarrollo y Resultados .....	57
4.1 Densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de agregados finos .....	57
4.2 Densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de agregados gruesos.....	63
4.3 Densidad Bulk y porcentaje de vacíos de los agregados.....	68
4.3.1 Densidad bulk y porcentaje de vacíos para agregado fino. ....	72
4.3.2 Densidad bulk y porcentaje de vacíos para agregado grueso .....	75
4.4 Elaboración de dosificaciones para las vigas con reemplazo parcial de residuos agroindustriales .....	77
4.5 Elaboración y curado de mezclas de concreto con reemplazos parciales de tamo de arroz y cáscara de huevo.....	78
4.6 Realización de Ensayos a Flexión.....	83
5. Discusión.....	86

6. Conclusiones .....	92
Referencias.....	95
Apéndices.....	104

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Clasificación según su tamaño</i> .....	34
<b>Tabla 2.</b> <i>Clasificación según su tamaño</i> .....	38
<b>Tabla 3.</b> <i>Contenido de mineral y materia orgánica de la cáscara de huevo</i> .....	42
<b>Tabla 4.</b> <i>Datos obtenidos de la muestra de agregados finos.</i> .....	62
<b>Tabla 5.</b> <i>Ecuaciones INV-222 para agregados finos</i> .....	63
<b>Tabla 6.</b> <i>Densidades obtenidas para el agregado fino.</i> .....	63
<b>Tabla 7.</b> <i>Porcentaje de absorción del agregado fino.</i> .....	63
<b>Tabla 8.</b> <i>Cantidades mínimas para ensayo.</i> .....	64
<b>Tabla 9.</b> <i>Datos obtenidos de la muestra de agregados gruesos.</i> .....	68
<b>Tabla 10.</b> <i>Ecuaciones INV-223 para agregados gruesos.</i> .....	68
<b>Tabla 11.</b> <i>Densidades obtenidas para el agregado grueso.</i> .....	68
<b>Tabla 12.</b> <i>Porcentaje de absorción del agregado grueso.</i> .....	68
<b>Tabla 13.</b> <i>Densidad del agua.</i> .....	72
<b>Tabla 14.</b> <i>Variables Densidad Bulk y % de vacíos para agregados finos.</i> .....	75
<b>Tabla 15.</b> <i>Ecuaciones INV-217 para agregados.</i> .....	75
<b>Tabla 16.</b> <i>Densidad Bulk y % de vacíos para agregados finos.</i> .....	75
<b>Tabla 17.</b> <i>Variables Densidad Bulk y % de vacíos para agregado grueso.</i> .....	77
<b>Tabla 18.</b> <i>Densidad Bulk y % de vacíos agregado grueso.</i> .....	77
<b>Tabla 19.</b> <i>Relación A/C de vigas con adición de Tamo de Arroz</i> .....	80
<b>Tabla 20.</b> <i>Relación A/C de vigas con adición de Cáscara de Huevo</i> .....	80
<b>Tabla 21.</b> <i>Número de capas requeridas para las muestras.</i> .....	81

<b>Tabla 22.</b> <i>Diámetro de varilla y número de golpes para utilizar en el modelo de muestras de ensayo.</i> .....	82
<b>Tabla 23.</b> <i>Módulo de rotura de vigas con reemplazo parcial de arena por tamo de arroz.....</i>	85
<b>Tabla 24.</b> <i>Módulo de rotura de vigas con reemplazo parcial de arena por tamo de arroz.....</i>	85
<b>Tabla 25.</b> <i>Rangos de porcentaje de humedad.</i> .....	86
<b>Tabla 26.</b> <i>Resumen caracterización agregado fino.</i> .....	87
<b>Tabla 27.</b> <i>Resumen caracterización agregado grueso.....</i>	87
<b>Tabla 28.</b> <i>Comparación módulos de rotura.</i> .....	89

**Lista de figuras**

<b>Figura 1.</b> <i>Cascarilla de arroz</i> .....	40
<b>Figura 2.</b> <i>Tipologías de iniciativas innovadoras de la economía circular</i> .....	46
<b>Figura 3.</b> <i>Beneficios de la Economía Circular</i> .....	47
<b>Figura 4.</b> <i>Estimación del metabolismo de la economía circular</i> .....	47
<b>Figura 5.</b> <i>Potencial de aprovechamiento materiales utilizados en la economía colombiana</i> .....	48
<b>Figura 6.</b> <i>Prueba del cono</i> .....	58
<b>Figura 7.</b> <i>Pesaje arena 1Kg</i> .....	58
<b>Figura 8.</b> <i>Corte a 45°</i> .....	59
<b>Figura 9.</b> <i>Secado manual de la muestra</i> .....	59
<b>Figura 10.</b> <i>Muestra de 500g</i> .....	60
<b>Figura 11.</b> <i>Picnómetro al 90% de su capacidad</i> .....	60
<b>Figura 12.</b> <i>Eliminación de espacios con movimientos rotatorios</i> .....	61
<b>Figura 13.</b> <i>Pesaje de picnómetro a su máxima capacidad</i> .....	61
<b>Figura 14.</b> <i>Muestra puesta a secar en horno</i> .....	61
<b>Figura 15.</b> <i>Muestra seca al horno</i> .....	62
<b>Figura 16.</b> <i>Cuarteo muestra grava</i> .....	64
<b>Figura 17.</b> <i>Muestra saturada</i> .....	65
<b>Figura 18.</b> <i>Secado de las rocas</i> .....	65
<b>Figura 19.</b> <i>Masa muestra superficialmente seca</i> .....	66
<b>Figura 20.</b> <i>Muestra ingresada para secado al horno</i> .....	66
<b>Figura 21.</b> <i>Muestra siendo sumergida</i> .....	67
<b>Figura 22.</b> <i>Agregado grueso seco al horno</i> .....	67

<b>Figura 23.</b> <i>Masa equipos agregado grueso.</i> .....	69
<b>Figura 24.</b> <i>Masa equipos agregado fino.</i> .....	69
<b>Figura 25.</b> <i>Llenado del recipiente para finos.</i> .....	70
<b>Figura 26.</b> <i>Llenado del recipiente para gruesos</i> .....	70
<b>Figura 27.</b> <i>Peso recipiente de agregados finos</i> .....	71
<b>Figura 28.</b> <i>Peso recipiente de agregados gruesos</i> .....	71
<b>Figura 29.</b> <i>Temperatura del agua</i> .....	72
<b>Figura 30.</b> <i>Llenado de 1/3 del recipiente</i> .....	73
<b>Figura 31.</b> <i>Apisonamiento del agregado fino.</i> .....	73
<b>Figura 32.</b> <i>Enrase de la superficie del material.</i> .....	74
<b>Figura 33.</b> <i>Masa del recipiente con el agregado fino</i> .....	74
<b>Figura 34.</b> <i>Apisonamiento del agregado grueso</i> .....	76
<b>Figura 35.</b> <i>Masa del agregado grueso con el recipiente</i> .....	76
<b>Figura 36.</b> <i>Mezcla antes de agregar agua</i> .....	79
<b>Figura 37.</b> <i>Adición de agua a la mezcla.</i> .....	79
<b>Figura 38.</b> <i>Mezcla con la consistencia deseada.</i> .....	81
<b>Figura 40.</b> <i>Enrasado de vigas</i> .....	83
<b>Figura 39.</b> <i>Vigas sumergidas en agua para curado.</i> .....	83
<b>Figura 41.</b> <i>Ensayo NTC 2871.</i> .....	85
<b>Figura 42.</b> <i>Agua añadida vs porcentaje de reemplazo</i> .....	88
<b>Figura 43.</b> <i>Comparación módulos de rotura</i> .....	89
<b>Figura 44.</b> <i>Aproximación al módulo de rotura objetivo.</i> .....	90
<b>Figura 45.</b> <i>Probeta después de ensayo NTC 2871.</i> .....	91

**Figura 46.** *Hormiguero provocado por materia orgánica*..... 91

**Lista de apéndices**

<b>Apéndice A.</b> <i>Cuadro metodológico de objetivos y actividades</i> .....	104
<b>Apéndice B.</b> <i>Herramienta de recolección de datos: Ensayos de agregado finos – INV 222 ....</i>	105
<b>Apéndice C.</b> <i>Herramienta de recolección de datos: Ensayos de agregados gruesos - INV 223</i>	106
<b>Apéndice D.</b> <i>Herramienta de recolección de datos: Ensayos de agregados – INV 217 .....</i>	107
<b>Apéndice E.</b> <i>Herramienta de recolección de datos: Dosificación de vigas con reemplazo parcial de Tamo de Arroz por Arena .....</i>	108
<b>Apéndice F.</b> <i>Herramienta de recolección de datos: Dosificación de vigas con reemplazo parcial de Cáscara de Huevo por Cemento .....</i>	109
<b>Apéndice G.</b> <i>Herramienta de recolección de datos: Ensayos a flexión para especímenes con adición de Tamo de arroz NTC - 2871 .....</i>	110
<b>Apéndice H.</b> <i>Herramienta de recolección de datos: Ensayos a flexión para especímenes con adición de Cáscara de huevo NTC - 2871 .....</i>	111

### Resumen

Esta investigación tiene como objetivo evaluar una alternativa para reducir el impacto ambiental que ocasionan la industria de la construcción, con la producción de cemento y extracción de arena; así mismo la alta generación de residuos producidos en la agroindustria por el tamo de arroz y la cáscara de huevo. Lo anterior, realizando reemplazos parciales de cemento y arena por cáscara de huevo y cascarilla de arroz carbonizada, respectivamente. Para ello se siguieron las normas técnicas colombianas vigentes en el proceso de caracterización de los agregados finos y gruesos, así como para la elaboración de probetas, las cuales fueron ensayadas bajo la norma NTC-2871, adaptación colombiana de la norma americana ASTM C78 la cual, dicta los lineamientos para obtener la resistencia a la flexión de una viga de hormigón por el método de tercios medios. Los resultados obtenidos con los especímenes con reemplazos parciales de tamo de arroz carbonizada por arena arrojaron una disminución en sus resistencias en comparación con el hormigón sin alteraciones; sin embargo, los especímenes con reemplazos parciales de cáscara de huevo por cemento arrojaron un aumento en sus resistencias en comparación con el hormigón simple. Se puede decir, que el principal motivo de estos resultados se debe a la cantidad de materia orgánica que contienen los materiales de reemplazo, siendo considerablemente mayor en el tamo de arroz carbonizado. Por otra parte, la obtención de resultados satisfactorios en los especímenes con reemplazo de cáscara de huevo brinda una alternativa para la mitigación del impacto ambiental ocasionado por la producción de cemento, además del aprovechamiento de un residuo de la agroindustria que, se produce en masa.

*Palabras clave:* cemento, residuos agroindustriales, agregados, resistencia a flexión, impacto ambiental, construcción.

### **Abstract**

This research aims to evaluate an alternative to reduce the environmental impact caused by the construction industry, specifically the production of cement and sand extraction, as well as the high generation of waste from the agro-industry, such as rice husks and eggshells. This is achieved by partially replacing cement and sand with crushed eggshells and carbonized rice husk ash, respectively. The process followed the current Colombian technical standards for characterizing fine and coarse aggregates, as well as for making test specimens, which were tested according to NTC-2871, the Colombian adaptation of the American standard ASTM C78, which provides guidelines for obtaining flexural strength of a concrete beam using the third-point loading method. The results obtained from the specimens with partial replacement of carbonized rice husk ash for sand showed a decrease in their strengths compared to regular concrete. However, the specimens with partial replacement of eggshells for cement showed an increase in their strengths compared to plain concrete. It can be said that the main reason for these results is the amount of organic matter contained in the replacement materials, which is considerably higher in the carbonized rice husk ash. On the other hand, obtaining satisfactory results in the specimens with eggshell replacement provides an alternative for mitigating the environmental impact caused by cement production, as well as utilizing a mass-produced waste from the agro-industry.

*Keywords:* cement, agroindustrial waste, aggregate, flexural strength, environmental impact, construction.

### Glosario

*Absorción:* en un agregado se define como absorción al aumento de la masa de este, producido por la presencia de agua en los poros de sus partículas durante un período específico, es así como, la absorción se representa como un porcentaje de la masa seca del agregado [1].

*Agregados:* es llamado agregado o también árido, a todo material inerte que posee una forma granular que, además se forma de manera natural y artificial, y mezclados con cemento en presencia de agua forman un material compactado que se conoce como mortero o concreto el cual se usa en la industria de la construcción [2].

*Agregado fino:* es aquel material que pasa a través del tamiz No. 4 pero que queda retenido en el tamiz No. 200 y que posee tamaños nominales entre los 4.76 mm y las 74 Micras [2].

*Agroindustria:* aquella actividad en donde se lleva cabo la elaboración de materia prima agrícola, pecuaria o forestal, así como su proceso de transformación y comercialización de los diferentes productos. Es así que se define como una actividad económica que nace de la mezcla entre la producción agrícola y la industria para la generación de alimentos y materias primas con el fin de ser distribuidas en el mercado [3].

*Avicultura:* la avicultura o sector avícola es una terminología que se basa en el cuidado y manejo de especies avícolas, tales como pollos, gallinas, faisanes, codornices y patos, además es aquel enfocado en la crianza de aves con el objetivo comercial de vender huevos y venta de carne [4].

*Cal:* se define como CAL a aquel polvo blanco que está compuesto principalmente de óxidos de calcio producto de la calcinación de la piedra caliza que, al mezclarse con el agua fragua como el cemento [5].

*Cantera:* son lugares en donde se llevan a cabo explotaciones mineras a cielo abierto y son generalmente de un tamaño pequeño, además, aquellos materiales extraídos son utilizados en el área de la construcción, dichos materiales son conocidos como los agregados y los pétreos [6].

*Compostaje:* es una técnica que se utiliza para que se creen condiciones necesarias de los residuos orgánicos de tal manera que los organismos encargados de descomponerlos fabriquen abonos con elevada calidad [7].

*Curado:* es el proceso que consiste en evitar que se evapore el agua del concreto sin endurecerse, por lo cual, durante esta etapa de curado, la cual tiene una duración de 24h, se deben cubrir los especímenes de manera inmediata luego del acabado por medio de una lámina no absorbente o impermeable con el fin de evitar que el agua cause expansión de los moldes y pueda dañar los especímenes [8].

*Desencofrado:* es la acción mediante la cual son retirados los moldes que dan forma a una estructura de hormigón, dichos moldes pueden ser permanentes o temporales. Por lo tanto, los encofrados son estructuras que se encargan de que el hormigón mantenga su forma durante la etapa de fraguado [9].

*Esfuerzo:* son las fuerzas que realizan los elementos de las estructuras para evitar la deformación ocasionada por las cargas que deben soportar las estructuras, estos esfuerzos pueden ser por compresión, tracción, flexión, torsión y cortante [10].

*Especímenes:* son aquellas muestras tomadas del concreto o mortero en estado fresco que son usados generalmente para comprobar la resistencia del material, además, es común que se elaboren dos o tres muestras por edad de un solo tipo de mezcla para observar la variación de la resistencia [10].

*Escombreras:* son lugares o sitios de disposición en donde son depositados los desechos provenientes de industrias mineras, manufactureras, de la construcción u otras actividades [11]. Además, una escombrera también se define como el depósito de material estéril que proviene de la demolición de una construcción la cual puede ser a cielo abierto o subterránea [12].

*GEI:* Son los Gases de Efecto Invernadero que se definen como el componente gaseoso de la atmósfera que pueden ser naturales o el resultado de actividades humanas, los cuales absorben y emiten radiación por medio de longitudes de onda provenientes de la radiación infrarroja de la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes, lo cual ocasiona el Efecto Invernadero [13].

*Material Cementante:* Es aquel que es capaz de formar productos de hidratación como lo son los “hidratos de silicato de calcio (C-S-H), hidratos de aluminosilicatos (A-S-H) o también hidratos de aluminosilicatos de calcio (C-A-S-H)” [14] de manera individual o en acción con otros materiales.

*Mitigar:* Es una acción que tiene como propósito reducir la vulnerabilidad, es decir el daño potencial sobre la vida y los bienes a causa de algún evento [12].

*Peso Unitario:* Es definido como la relación entre el peso de una muestra que está compuesta por varias partículas y el volumen que ocupan dichas partículas agrupadas dentro de un recipiente con volumen conocido [2].

*PIB:* el Producto Interno Bruto es el valor de mercado de todos los bienes y servicios finales que son producidos en un país utilizando las herramientas de producción propias en un período determinado [15].

*Porosidad:* se asocia con la capacidad que tiene un agregado para absorber agua u otro líquido lo cual se encuentra relacionado con el tamaño y la cantidad de los poros así como la continuidad de estos [2].

*Puzolánico:* es un tipo de aditivo que puede usarse como reemplazo de una fracción del cemento dentro de una mezcla de hormigón. Está compuesto por puzolana la cual es un material silíceo que por sí solo no posee ninguna propiedad cementante, sin embargo, al ser molido finamente y en presencia de agua, reacciona con el hidróxido de calcio que se encuentra en el cemento y desarrolla propiedades cementantes.

*Resistencia a flexión:* se define como la capacidad que tiene un material u objeto de soportar las fuerzas aplicadas de manera perpendicular a su eje longitudinal [16].

## Introducción

La industria de la construcción en Colombia es uno de los sectores que ha contribuido de manera significativa el PIB con hasta un 5.2% en el año 2021 [17] por lo cual, la construcción en Colombia ha ido experimentando un crecimiento constante en los últimos años. Ligado a esto, se encuentra el aumento de la demanda de vivienda la cual ha sido impulsada por el crecimiento demográfico y la urbanización, causando un aumento significativo en la producción de materiales de construcción entre los cuales se encuentra el hormigón y por lo tanto todos aquellos materiales vinculados a su cadena de producción.

La producción de cemento y la extracción de agregados como la grava y la arena son actividades clave en la industria de la construcción y como se indicó anteriormente, su producción ha ido en aumento; es así, que el cemento es uno de los materiales mayormente fabricados llegando a una cifra de 1.140,8 miles de toneladas en febrero de 2023 en Colombia [18], y de 4.6 millones de toneladas en el mundo para el año 2016 [19].

Sin embargo, el proceso de producción del cemento es uno de los procedimientos industriales que más emisiones de dióxido de carbono genera, lo cual contribuye de manera significativa al cambio climático. Así mismo, la extracción de materiales como la grava y arena que sirven como agregados en la elaboración del hormigón, conlleva a impactos negativos alterando la estabilidad de los suelos, aumentando la posibilidad de inundaciones y agotando los recursos de agua.

Por lo anterior, a través de los años se han desarrollado diferentes alternativas que implican el reemplazo parcial de materiales que se encuentran involucrados en la cadena de producción del hormigón por medio de la utilización de materiales reciclados y en otros casos residuos agroindustriales. Estos últimos son residuos provenientes de la agroindustria la cual representa una

de las industrias más importantes en el mundo y que, por lo tanto, es la causante de una gran cantidad de residuos que a menudo son desechados en vertederos o incinerados ocasionando impactos negativos en el medio ambiente como es el caso de la cascarilla de arroz y las cáscaras de huevo, los cuales son producidos en grandes cantidades y desechados en igual medida.

No obstante, a pesar de que dichos residuos son considerados como desechos se han explorado diferentes oportunidades para aprovecharlos y darles una utilidad, un ejemplo de esto es la producción de fertilizantes y creación de materiales de construcción sostenibles.

Debido a lo anterior, en este proyecto se explorará el potencial de dos residuos agroindustriales los cuales son cascarilla de arroz y cáscara de huevo para ser utilizados como reemplazo parcial de la arena y el cemento en el hormigón. Estos dos materiales poseen características químicas que pueden lograr el reemplazo en el hormigón y mejorar su resistencia mecánica. Es por esto, que se llevará a cabo la determinación de la resistencia a flexión de una viga con inclusión de residuos agroindustriales comparándola con las vigas convencionales, revisando la viabilidad de esta alternativa con el fin de contribuir al desarrollo de materiales de construcción más sostenibles y que puedan promover a la economía circular de Colombia y el mundo.

Este proyecto consta de tres sesiones, la primera corresponde a un planteamiento del problema y justificación que abarcan los motivos que conllevan a la propuesta de investigación que fue base para este proyecto; la segunda sesión consta de una revisión teórica de antecedentes de investigación y marco teórico que sirvieron como fundamento para la tercera sesión; esta última involucra el desarrollo metodológico, los resultados, discusión y finalmente conclusiones de la investigación.

## **1. Resistencia a la flexión de una viga de concreto obtenida a partir de incorporación de residuos agroindustriales.**

### **1.1 Planteamiento del problema**

La industria de la construcción es un sector que ayuda al crecimiento de la economía colombiana, obteniendo un porcentaje de participación del 4.9% dentro del Producto Interno Bruto (PIB) en el año 2017, una cifra que representa un gran aumento desde el 2001, en donde dicho porcentaje fue del 1.8% del PIB [20] Según lo anterior, la demanda por edificaciones ha ido en aumento con el pasar de los años y se tiene como pronóstico que 18 millones de habitantes vivirán en Colombia en los próximos 35 años [20].

Debido a lo anterior, el crecimiento acelerado en la población urbana y la alta demanda de edificaciones en las últimas décadas ha generado presión sobre zonas de alto riesgo ambiental, aumentando el impacto ambiental que genera la construcción, ya que, aunque su impacto es positivo en la economía, las actividades traen consigo implicaciones ambientales con una generación del 10.5% del total de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el país [20].

De igual manera, según el Ministerio de Ambiente la industria de la construcción consume el 60% de los materiales extraídos de la tierra, genera el 40% del total de los residuos generados en Colombia, alrededor del 20% de todos los materiales empleados que se usan en una obra son desechados, el consumo energético es del 40% y la emisión de CO<sub>2</sub> es de 30% [21].

Materiales como los férreos, el vidrio, los ladrillos, la cal y el cemento son responsables de la producción anual del 20% de las emisiones de dioxinas y furanos a la atmósfera [20], sin embargo, el material más representativo en la industria de la Construcción corresponde al cemento, que de acuerdo con The European Cement Association, representa el mayor costo de transporte e

intensidad energética dentro de la elaboración del concreto. Según estudios realizados por The European Cement Association (CEMBUREU) para el año 2016 se produjeron 4.6 mil millones de toneladas de cemento en el mundo [19] siendo Colombia el quinto país, después de Brasil y Chile en mayor producción de cemento en Latino América y el Caribe, según datos del FICEM (Federación Interamericana del Cemento) [22].

Así como el cemento es uno de los materiales más producidos en el mundo, también es uno de los materiales de construcción que más impacto ambiental genera, ya que, debido a la composición del cemento tradicional (compuesto principalmente por óxidos de calcio, silicio, aluminio, hierro y magnesio), este se convierte en un material altamente contaminante, llegando a producir emisiones de CO<sub>2</sub> tan elevadas que en algunos casos superan la tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento producido [23]. La producción de cemento se obtiene de la molienda de piedra caliza natural con arcilla, los cuales son recursos no renovables. Por lo anterior, las canteras son explotadas en gran medida y no exclusivamente para la extracción y producción de cemento, ya que, para elaborar concreto, además del cemento es necesaria la adición de agua y agregados (arena y grava), siendo estos últimos extraídos directamente de ríos y formaciones rocosas, las cuales no serán regeneradas.

De esta manera, los agregados como arena y grava, necesarios para la elaboración del concreto tradicional, son extraídos mayormente de ríos y canteras, consiguiendo una extracción diaria de 18 kilos de dichos materiales por cada habitante del planeta, los cuales son usados para la fabricación de concreto, asfalto y vidrio [24]. Es así como el aumento de la población, el incremento de la urbanización, y por ende la construcción, ha incrementado la demanda de estos materiales, la cual asciende a unos cincuenta mil millones de toneladas por año, registrando en la

actualidad mayor cantidad de material extraído que la producción natural de estos, afectando de manera negativa el ambiente [24].

Dentro de los efectos desfavorables que conlleva la extracción de agregados de manera descontrolada, se relaciona el aumento de la probabilidad de inundaciones, el agotamiento de los acuíferos y el empeoramiento de las temporadas de sequía en las zonas de extracción [24].

Sin embargo, la problemática ambiental expuesta no solo se presenta en la industria de la construcción, también se puede escalar a otros campos como la agroindustria, en donde se requiere materias primas para la elaboración de diferentes productos para el consumo humano, que a su vez irá en aumento con el crecimiento poblacional. El impacto de los residuos provenientes de esta industria en el medio ambiente ha generado conciencia en la búsqueda de mitigar en mayor medida la problemática expuesta. No obstante, los residuos agroindustriales cuentan con un alto potencial para ser aprovechados ya sea en la elaboración de nuevos productos, agregación de valor a productos originales y recuperación de condiciones ambientales alteradas [25].

Debido a lo anterior, y con el fin de proponer estrategias de aprovechamiento que involucren el agro y la industria de la construcción, se ha propuesto este trabajo, en el que se pretende dar valor a los residuos agroindustriales al reincorporarlos en las mezclas de concreto, como reemplazo de los agregados y del material cementante.

Es así como se ha propuesto el aprovechamiento del tamo de arroz y la cáscara de huevo, con los que se pretende realizar un reemplazo parcial del material cementante y la arena respectivamente, de una mezcla de concreto con el fin de evaluar la incidencia de dicha adición en la resistencia a flexión, comparada con la resistencia que tiene una mezcla de concreto en condiciones normales.

Finalmente, la resistencia a flexión será determinada a partir de ensayos de laboratorio por medio de especímenes en forma de vigas como se especifica en la NTC - 2871; la información obtenida permitirá plantear la viabilidad de una posible reutilización de estos residuos agroindustriales en mezclas de concreto, con el fin de contribuir al enfoque de sostenibilidad que plantea la Universidad Santo Tomás, y enmarcados dentro de los objetivos de desarrollo sostenible.

## **1.2 Justificación**

En Colombia y el mundo, el auge de la construcción en la última década ha representado un hito para la industria, lo anterior implica que los materiales empleados en este sector tengan una alta demanda. En el caso del cemento, uno de los componentes principales del concreto (este a su vez representa uno de los materiales más usados en el sector de la construcción) requiere una producción que para el año 2018 se estimó alrededor de 3.99 mil millones de toneladas en el mundo según The European Cement Association.

El cemento es un material que requiere de mucha energía para producirse, puesto que, en su proceso de extracción, molienda, calcinación de la piedra caliza y transporte para su disposición, por tonelada producida se requiere de 60 a 130 kilogramos de gasolina o su equivalente, dependiendo del tipo de cemento, además se necesitan unos 110KWh de electricidad [19].

Por otra parte, el sector de la agroindustria que genera el 6.2% del PIB en Colombia, al igual que el sector de la construcción, es una generadora de residuos que en su mayoría no son tratados de la manera correcta, generando alteraciones a los medios abióticos, bióticos y socioeconómicos. En la industria arrocera, dentro del proceso de producción de arroz, se generan cantidades considerables de un residuo conocido como cascarilla de arroz, los cuales son

desechados sin tener algún control o medida. Ligado a esto, se encuentra la contaminación del suelo y que, por su alto contenido de sílice contamina corrientes de aguas cercanas, afectando la vida acuática; de igual manera, en ocasiones se procede a la quema de estos residuos, lo cual genera la liberación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el cuál es el principal GEI [26].

Asimismo, vinculada a la agroindustria se encuentra el sector avícola, en el cual la producción mundial de huevos ha aumentado, alcanzado una cifra de 68 millones de toneladas anuales y esta producción, al igual que la arrocería, produce una gran generación de residuos de cáscara de huevo, los cuales incuban insectos y bacterias que pueden originar enfermedades. De igual forma, la mala disposición de dichos residuos produce la liberación de Gases de Efecto Invernadero a la atmósfera, contaminación de suelos y aguas [27]

Por consiguiente, la dinámica identificada de consumo de recursos en la industria de la construcción y la generación de residuos en la agroindustria y su responsabilidad con el cuidado del medio ambiente se convierte en una estrategia importante de identificación de posibles procesos de reutilización y reincorporación de los desechos a la cadena de valor.

Lo anterior, hace parte de los esfuerzos sobre los lineamientos ambientales en los que ha trabajado Colombia y el mundo entero, donde se fomenta la construcción sostenible y el cuidado de los recursos por medio de diferentes mecanismos como lo son los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) los cuales rigen a nivel mundial y el Plan Nacional de Desarrollo (PND) en el caso de Colombia, este último vincula todos los ODS y plantea pactos con el fin de cumplir con los objetivos planteados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

La construcción y la agroindustria tienen la capacidad de fomentar el desarrollo económico, social y ambiental, siempre y cuando se mantenga el equilibrio entre la actividad que se

desarrolla y la protección del medio ambiente en todos los procesos, desde su producción hasta su disposición final [25].

Es así como este proyecto de investigación en el que se pretende reincorporar residuos de la agroindustria en la generación de nuevos materiales para el sector de la construcción se encuentra relacionado con algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): el objetivo 9 de industria, innovación e infraestructura, el objetivo 11 sobre ciudades y comunidades sostenibles, y el objetivo 12 con producción y consumo responsable. Los anteriores objetivos son los que mayor relación tienen con la temática de reutilización, construcción, consumo responsable y hasta podría hablarse del objetivo 13 acciones por el clima, vinculado a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como lo es el CO<sub>2</sub>.

Por tanto, el presente proyecto propone una alternativa que emplee los residuos agroindustriales como la cáscara de huevo y la cascarilla de arroz como sustituto parcial de materias primas empleadas en la producción de concreto. Además, estudios han demostrado que las cáscaras de huevo están compuestas por completo de carbonato de calcio, que forma el principal compuesto de cemento (óxido de calcio) cuando se oxida el carbonato de calcio [28]. Por tanto, se incrementa la posibilidad de sustitución parcial del cemento dentro de la mezcla de concreto.

De igual forma, en la composición de la cáscara de arroz, hay una gran proporción de silicio y la arena utilizada en la producción de hormigón es principalmente sílice, dando lugar a intercambiarse parcialmente por residuos de cascarilla de arroz. A pesar de que ya existen estudios sobre el reemplazo de cascarilla de arroz por arena en la producción de cemento, no existen estudios sobre realizar ambos reemplazos propuestos en una misma mezcla de concreto.

Finalmente, este proyecto pretende brindar un aporte que permita cumplir las metas nacionales e internacionales sobre sostenibilidad por medio de la reutilización de residuos (con

relación al PND y el cumplimiento de los ODS), el consumo responsable de materias primas y llegado al caso de que el material obtenido sea viable, apoyar la construcción sostenible, la cual es una de las mayores metas planteadas para la industria de la construcción en la última década.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Evaluar la resistencia a flexión de una viga de concreto simple con inclusión de residuos agroindustriales: cáscara de huevo y cascarilla de arroz, como reemplazo del material cementante y del agregado fino.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Determinar la densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de los agregados gruesos y finos empleados en la realización de la mezcla, con el fin de realizar un correcto diseño de muestra.

Estimar la resistencia a flexión de una mezcla de concreto alterada con inclusión de residuos agroindustriales.

Comparar la resistencia a la flexión de una mezcla de concreto alterada con inclusión de residuos agroindustriales con una mezcla de concreto en condiciones normales.

## 2. Marco referencial

### 2.1 Marco teórico

Moreno, y otros, en su artículo *“Tobacco waste ash: a promising supplementary cementitious material”*, analizaron el reemplazo parcial de cenizas de tabaco como material cementante suplementario en una mezcla de concreto, de igual manera, este artículo concluye con la idea de que utilizar tabaco como material cementante suplementario mejoraron la resistencia a la compresión con un reemplazo máximo del 10%, lo cual sirve de base para conocer hasta qué punto sería bueno realizar reemplazos en el concreto [23].

Meek, Elchalakani, Beckett y Dong, en su investigación titulada *“Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: A study of mechanical properties, flexure and bond strength”*, ampliaron la comprensión de los materiales adicionados a través de pruebas de flexión y expulsión de muestras reforzadas con acero y barras de polímero reforzadas con fibra de vidrio. Así mismo, determinaron las propiedades mecánicas de los materiales de tierra apisonada estabilizados alternativamente y estudiaron el comportamiento compuesto de los materiales reforzados [29].

Chen, Wang y Jhou, en su estudio *“Investigating the properties of lightweight concrete containing high contents of recycled green building materials”*, el cemento y el agregado utilizados en el concreto con agregado liviano fueron reemplazados con materiales de construcción ecológicos reciclados. Se investigó la influencia de la cantidad máxima de reemplazo en la mezcla fresca, endurecida y durabilidad para determinar la influencia de alto contenido de agregados reciclados y aditivos puzolánicos reciclados sobre las propiedades del hormigón. Es importante

por las resistencias que abarca, además por el estudio de la influencia de la cantidad máxima de reemplazo [30].

Dachowski y Kostrzewa, en su artículo “*The Use of Waste Materials in the Construction Industry*” presentan una revisión crítica de la literatura sobre los cambios en la composición de los materiales de construcción tradicionales en el ejemplo del hormigón celular, el cemento y los productos silicocalcáreos. El objetivo del estudio fue determinar el impacto de los aditivos en los parámetros de las propiedades físicas y mecánicas y la microestructura de los materiales recién creados en comparación con sus contrapartes tradicionales. Abarca el impacto de aditivos, por esto podría ser útil por el análisis que hacen de la microestructura del concreto [31].

Chore y Jhoshi, en su artículo “Strength characterization of concrete using industrial waste as cement” presentan las investigaciones experimentales para evaluar las propiedades de resistencia del hormigón elaborado con materiales de desecho puzolánicos, es decir, materiales cementantes suplementarios como materiales de sustitución del cemento. Un posible uso de los concretos con reemplazo de residuos como cementante puede ser como pavimento rígido, en este documento se abarcan esos requerimientos, los cuales pueden ser útiles para la mezcla que se plantea realizar [32].

Vargas y Pérez, en su artículo de revisión titulado “Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente” realizaron una revisión bibliográfica en la que recopilaron información de las diferentes alternativas para el aprovechamiento de residuos agroindustriales con la finalidad de mejorar la calidad del ambiente. En su artículo se incluyen publicaciones que dan base para el uso de residuos y así poder prevenir impactos negativos, entre sus resultados encontramos la identificación de las diferentes alternativas de aprovechamiento de los residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad

del ambiente. La búsqueda incluyó publicaciones acerca del uso de residuos de origen agroindustrial en la prevención e intervención de posibles impactos negativos. Como resultado de la revisión se identificaron cinco categorías en las que se pueden emplear dichos residuos, entre el cuál se encuentra uno de interés principal llamado “de empleo de los residuos agroindustriales: 1. Obtención de bioenergéticos (bioetanol, biodiésel, biogás, biomasa energética). 2. Proceso de compostaje. 3. Aprovechamiento en la producción de alimentos para animales. 4. Elaboración de otros productos de interés (ladrillos, composites, estibas, entre otros)” entre los cuales se encuentran materiales de construcción [25].

## **2.2 Marco conceptual**

### ***2.2.1 El concreto***

El concreto es una roca creada, diseñada y fabricada por el hombre de acuerdo con unas normas establecidas para cada aplicación que requiere determinado proyecto, con características de economía, tiempo de fraguado, apariencia y facilidad de colocación. Es actualmente el material más usado en la industria debido a su duración, impermeabilidad, economía, resistencia y facilidad de producción, ya que, es una mezcla homogénea de cemento, arena, agua, grava y aditivos en algunos de los casos.

El concreto, al igual que las rocas naturales, presenta alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tensión, debido a esto es reforzado con varillas de acero que resisten tales esfuerzos a tensión.

**2.2.1.1 Propiedades Físico-mecánicas.** Las propiedades físico-mecánicas del concreto se miden mediante ensayos de laboratorio, dichos ensayos determinan la calidad del concreto de acuerdo con la respectiva comparación con la norma NTC 121. Entre las propiedades se destacan:

**2.2.1.1 Propiedades Físico-mecánicas.** Las propiedades físico-mecánicas del concreto se miden mediante ensayos de laboratorio, dichos ensayos determinan la calidad del concreto de acuerdo con la respectiva comparación con la norma NTC 121. Entre las propiedades se destacan:

**2.2.1.1.1 *Peso específico.*** El peso específico o densidad, es la relación del peso con el volumen, varía entre 3.08 a 3.20, pero el cemento que tiene adiciones tiende a tener un peso específico menor porque el contenido del clinker es menor. El peso específico no define la calidad de un cemento, sin embargo, se usa para el diseño de este.

**2.2.1.1.2 *Superficie específica (finura).*** La finura es una de las propiedades más importantes, ya que, está directamente relacionada con la hidratación del cemento.

La hidratación de los granos de cemento ocurre del exterior hacia el interior; luego el área superficial de la partícula de cemento constituye el material de hidratación, y el tamaño de los granos (su finura) tiene gran influencia en la velocidad de hidratación, en el desarrollo de calor, en la retracción y en el aumento de resistencia con la edad [33].

A medida que el cemento es más fino, su endurecimiento es más acelerado y desarrolla alta resistencia en un tiempo más corto, sin embargo, esto lo hace más propenso a fisuraciones y susceptible a hidratación ambiental, esto generando que su vida útil sea más corta.

**2.2.1.1.3 Retracción y fisuras.** El concreto en estado de pasta tiende a contraerse durante el endurecimiento y los primeros dos meses de hidratación. En los concretos normales, esta retracción es del orden de 0,015%. Estas fisuras se presentan cuando los esfuerzos son mayores a la resistencia de la propia masa.

Las retracciones pueden ser debidas a condiciones hidráulicas o a condiciones térmicas. Las de orden hidráulico son motivadas por la composición mineralógica del cemento, como:

- Alto contenido de silicato tricálcico.
- Alto contenido de aluminato tricálcico.
- Alto contenido de álcalis.
- Fraguado y endurecimientos rápidos.
- Bajo contenido de yeso.

Las de orden térmico se deben a:

- Finura del cemento.
- Bajo poder de retención de agua por parte del cemento.
- Alta dosificación del cemento.
- Alto calor de hidratación del cemento.

Cuando las retracciones son grandes pueden producir fisuras; sin embargo, existen causas ajenas al cemento que producen fisuración, como:

- Asentamiento o desplazamiento de la propia estructura.
- Deformaciones que experimenta el terreno de cimentación, por sobrecarga.
- O debidas el medio ambiente, como son: baja humedad relativa, altas temperaturas o vientos fuertes que producen desecación rápida del concreto fresco.

**2.2.1.2 Residuos adicionados al concreto.** Teniendo en cuenta que el concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción, en varios países se ha tomado como alternativa reutilizar residuos y adicionarlos en el concreto para la creación de nuevas obras debido a la preocupación por el medio ambiente y la economía.

Teniendo esto en cuenta, el uso de agregados reciclados (RA) como reemplazo de agregados naturales (NA) en la producción de concreto se considera como uno de los métodos más beneficiosos para un reciclaje efectivo de materiales y por lo tanto aumenta la sostenibilidad en la industria de la construcción [34].

Algunos estudios realizados, muestran que las propiedades de durabilidad y resistencia del concreto disminuyen cuando se reemplaza el agregado natural por Agregado de Residuos (RA).

Por otra parte, estudios más avanzados han revelado que hay tres tipos principales de RA: hormigón triturado, construcción de mampostería o escombros mixtos. Generalmente, se considera un 90% de agregado de concreto triturado como RA para agregar a la mezcla de concreto, y, en igual proporción se considera la mampostería de arcilla, sin embargo, los escombros mixtos (mampostería de arcilla y concreto triturado) varían de acuerdo con las especificaciones existentes.

### **2.2.2 Cemento**

El cemento es el material más empleado en la construcción, ya que, puede aportar gran durabilidad, características estéticas y una excelente resistencia a la compresión. “El cemento es un polvo fino que se obtiene de la calcinación a 1,450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El producto del proceso de calcinación es el clínker —principal ingrediente del

cemento—, que se muele finamente con yeso y otros aditivos químicos para producir cemento” [35].

**2.2.2.1 Composición del cemento.** Los principales elementos que componen el cemento portland son:

Cal (CA O), sílice (Si O<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>) y óxido de hierro (Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub>). Como pocas veces se encuentran en la naturaleza juntos y en las proporciones requeridas, para la fabricación del cemento generalmente se hace necesario mezclar sustancias minerales que los contienen, como calizas por el aporte de cal y las arcillas por el aporte de alúmina y óxido de hierro; en algunas ocasiones es necesario agregar directamente óxido de hierro o arenas silíceas, para ajustar las proporciones de cada compuesto con el fin de obtener reacciones químicas equilibradas. Una tercera sustancia necesaria en la fabricación del cemento es el yeso hidratado que se adiciona al clinker durante la molienda con el fin de retardar el tiempo de fraguado de la pasta de cemento [33].

También, en el cemento se hacen presentes los siguientes compuestos complementarios, que son añadidos para el buen comportamiento del material:

- Óxido magnésico.
- Alcalis.
- Azufre.
- Cloruros.
- Fósforo.

**2.2.2.2 Composición química del cemento.** El cemento no es un compuesto puro, por lo tanto, no se le puede asignar una fórmula química específica. Sin embargo, está compuesto por una cantidad determinada de elementos conocidos, que al ser combinados pueden tener un comportamiento deducible, manipulable y controlable gracias a las leyes de la química pura, por medio de relaciones estequiométricas [33]. “Químicamente se define el cemento portland como una mezcla de composición heterogénea y finamente pulverizada” [33], cuya composición es:

**Tabla 1.** *Clasificación según su tamaño*

<b>Nombre del compuesto</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Abreviatura</b>
A) Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	$C_3S$
B) Silicato Dicálcico	$2CaO.SiO_2$	$C_2S$
C) Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	$C_3A$
D) Ferroaluminato tetracálcico	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	$C_4AF$
E) Yeso natural	$CaSO_4.2H_2O$	
F) Óxidos menores de Ca, Mg, Na, K, Mn, Tl, P, Fe		

Adaptado de El concreto y otros materiales para la construcción [33].

**2.2.2.3 Propiedades físicas y mecánicas del cemento.** Estas propiedades deben ser medidas mediante ensayos, cuyos resultados deben ser comparados con las especificaciones de la norma NTC 121.

**2.2.2.3.1 Peso específico.** “La densidad o peso específico se define como la relación de peso a volumen; su valor varía entre 3,08 a 3,20 g/cm<sup>3</sup> para el cemento portland tipo I, pero el

cemento que tiene adiciones tiene un peso específico menor porque el contenido de clinker es menor” [33].

Esta propiedad no indica la verdadera calidad del cemento, pero puede ser empleada para realizar diseños de mezcla, ya que, indican si un concreto tiene adiciones. Los ensayos para determinar esta propiedad están especificados en la norma NTC 221.

**2.2.2.3.2 Superficie específica.** Es una de las propiedades más importantes del cemento, ya que, está relacionada de manera directa con la hidratación de este, dicha hidratación ocurre desde el exterior hacia al interior y el tamaño de grano (finura) tiene una influencia considerable en la velocidad que se estima para que se hidrate de forma óptima.

Cuando el cemento es muy fino, endurece más rápidamente y por lo tanto desarrolla alta resistencia en menor tiempo; sin embargo, libera mayor cantidad de calor y por ende aumenta la retracción y la susceptibilidad a la fisuración, además una molienda fina aumenta los costos de producción y hace que el cemento sea más susceptible a hidratarse con la humedad ambiental, por lo que su vida útil es más corta [33].

La finura debe medirse en laboratorio, y dicho ensayo está especificado en la norma NTC 33, la cual estima la finura del cemento por medio del aparato de permeabilidad al aire de Blaine.

**2.2.2.3.3 Resistencia mecánica.** La resistencia mecánica es la propiedad más influyente para los fines estructurales en los cuales se emplea el cemento.

Para medir la resistencia mecánica del cemento, se fabrican probetas de mortero, empleando arena normalizada de Ottawa con una gradación abierta, compuesta por tres tamaños y con una proporción determinada de 2,75 partes de esta arena por una parte de

cemento, utilizando la cantidad de agua necesaria para que el mortero tenga una fluidez entre 110 y 115 [33].

La norma que rige los ensayos para determinar la resistencia mecánica del cemento en probetas de mortero es la NTC 220.

**2.2.2.4 Clasificación del cemento.** La clasificación para Colombia según la NTC 30 es:

- Cemento Portland tipo 1. Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
- Cemento Portland tipo 1M. Alcanza resistencias superiores a las del tipo 1.
- Cemento Portland tipo 2. Es resistente a la acción moderada de sulfatos y el desprendimiento de calor es menor que en los cementos normales.
- Cemento Portland tipo 3. Alcanza alta resistencia inicial.
- Cemento Portland tipo 4. El desprendimiento de calor es bajo.
- Cemento Portland tipo 5. Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
- Cemento Portland Blanco. Se elabora con materias primas seleccionadas que no contienen óxido de hierro, por eso la coloración. Se usa para decoración [33].

### **2.2.3 Agregados**

Los agregados son “un conjunto de materiales de composición mineral, naturales o artificiales, generalmente inertes” [2] que hacen parte de la mezcla de concreto e implican un factor importante en la economía, durabilidad y estabilidad de las obras civiles ya que ocupan un volumen considerable dentro de la mezcla; por ejemplo, el volumen de los agregados dentro del concreto hidráulico cubre de un 65% a 85% del volumen total, en el concreto asfáltico ocupan del 92% al

96% y en los pavimentos, ocupan un volumen del 75% al 90% [2]. Debido a lo anterior se hace necesario conocer y estudiar las propiedades de los agregados, de igual manera, es necesario conocer que un agregado fino es un material que pasa por el tamiz No. 4 pero es retenido en el tamiz No. 200 (tamaños entre 4.76mm y 74 $\mu$ m) y, un agregado grueso o grava es aquel que es retenido en el tamiz No. 4 (tamaños entre 7.6cm y 4.76mm) [2]. También, es necesario saber que los Finos son aquellas partículas que pasan a través del tamiz No. 200 con tamaños entre 0.074mm y 0.002mm.

**2.2.3.1 Clasificación de los Agregados.** Los agregados pueden ser clasificados según su procedencia, según su tamaño y según su densidad.

**2.2.3.1.1 Clasificación según su procedencia.** La clasificación de los agregados según su procedencia se realiza teniendo en cuenta si son naturales o artificiales. Los primeros son aquellos que provienen de la explotación de canteras o que son producto del arrastre de los ríos; los materiales que son extraídos de río tienden a tener una forma redonda y una superficie lisa, pero los materiales extraídos de cantera, por el método de extracción presentan una superficie rugosa y una forma angulosa [2].

En cuanto a los agregados artificiales, son aquellos que se obtiene a partir de productos y procesos industriales como por ejemplo la limadura de hierro, arcillas expandidas, escorias de altos hornos, etc. Sin embargo, para la fabricación de concreto de baja resistencia se usa cascarilla de arroz, de palma, café, etc., los cuales son mezclados con los agregados naturales con el fin de disminuir costos [2].

**2.2.3.1.2 Clasificación según su tamaño.** A continuación, se muestra una tabla en donde se muestra la clasificación de los agregados teniendo en cuenta los tamaños de sus partículas.

**Tabla 2.** *Clasificación según su tamaño*

Tamaño de la partícula en mm	Denominación corriente	Clasificación
Pasante del Tamiz N°200 inferior a 0.002 mm Entre 0.002 - 0.074 mm	Arcilla Limo	Fracción fina o finos
Pasante del Tamiz N°4 retenido en el Tamiz N°200. Es decir, entre 4.76 mm y 0.074 mm	Arena	Agregado fino
Retenido en el tamiz N°4 Entre 4.76 mm y 19.1 mm (N°4 y 3/4") Entre 19.1 y 50.8 mm (3/4" y 2") Entre 50.8 mm y 152.4 mm (2" y 6") Superiores a 152.4 mm (6")	Gravilla Grava Piedra Rajón, Piedra bola	Agregado grueso

Adaptado de El concreto y otros materiales para la construcción [2].

**2.2.3.1.3 Clasificación según su densidad.** Otra manera de clasificar los agregados es teniendo en cuenta la masa por unidad de volumen, es decir la densidad, lo cual incluye los vacíos lo cual es importante para el peso del producto final. Teniendo en cuenta lo anterior se tiene que, los agregados pueden ser clasificados como ligeros (densidad entre 480 – 1040Kg/m<sup>3</sup>) o como normal (densidad entre 1300 y 1600 Kg/m<sup>3</sup>).

## 2.2.4 Residuos Agroindustriales

Según Saval, se conocen como residuos agroindustriales a aquellos materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su

industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social [36].

Cada sector agroindustrial genera sus residuos específicos, y así mismo, diferentes sectores cuentan con estrategias específicas para el tratamiento y aprovechamiento de dichos residuos. También, estos residuos han sido contemplados en recientes investigaciones, entre los cuales se encuentran los residuos de caña de azúcar, la cascarilla de arroz, desechos cítricos, la cáscara del plátano, entre otros [25].

**2.2.4.1 Impactos en el ambiente.** La contaminación es el cambio físico, químico, radiológico o biológico de un recurso (aire, tierra o agua) causado por el hombre o debido a actividades humanas y que es perjudicial para la existencia, fin o uso potencial del recurso [37]. Los residuos agroindustriales representan un gran foco de contaminación debido a la cantidad de producción, ya que, pueden afectar la salud y los ecosistemas si su disposición o manejo no es el adecuado [38].

Varios de estos residuos son incinerados o depositados en rellenos sanitarios, generando una liberación elevada de dióxido de carbono, contaminación de recursos hídricos, molestias por aromas fétidos, proliferación de animales e insectos, entre otros efectos negativos [39]. La agroindustria alimentaria es, entre otras, de las que más impacto genera en el ambiente, debido a la generación de diversos residuos sólidos, líquidos o gases en las diferentes etapas de su procesamiento [25]. Los residuos agroindustriales se componen generalmente por materia sólida y orgánica que registra una velocidad de degradación muy baja, y al no ser aprovechados suelen

ser depositados en lotes sin tener control alguno, esto aumentando los procesos erosivos y llegando a contaminar fuentes hídricas [40].

**2.2.4.2 Cascarilla o tamo de arroz.** La cascarilla de arroz es un residuo generado por la agroindustria, es un subproducto del proceso de la molienda del arroz proveniente de los campos de cultivo; esta se encuentra en la parte exterior del grano maduro, por ende, debe ser removida para la comercialización de este [41].

La consistencia de la cascarilla de arroz es abrasiva y quebradiza, varía su color entre el pardo rojizo y el púrpura oscuro; es de baja densidad, por esto ocupa grandes volúmenes al ser acaparado, posee un peso específico aproximado de 125 kg/m<sup>3</sup>, esto indica que una tonelada de cascarilla ocupa un aproximado de 8m<sup>3</sup>. También, posee un poder calórico de 3.281,6 Kcal/kg, y su estructura alta en sílice (20%) hace que su biodegradabilidad sea muy baja [42].

**Figura 1.** *Cascarilla de arroz.*



Adaptado de Banco de imágenes de Google

La cascarilla de arroz tiene varias aplicaciones incluyendo:

- Conversión de la biomasa: se obtienen azúcares que pueden ser convertidos a otros químicos orgánicos, como por ejemplo etanol y furfural.
- En la elaboración de abonos y material para el cultivo de hongos Obtención de papel y de pulpa.

- En materiales de construcción.
- Como combustible.
- Obtención de productos de silicio, a partir de la cascarilla o de sus cenizas

[43]

**2.2.4.2.1 Cascarilla de arroz en materiales de construcción.** La cascarilla de arroz posee ciertas características que lo hacen empleable en ciertos campos ingenieriles, posee una dureza elevada debido a la cantidad de sílice que contiene [44], así mismo su capacidad a soportar altas temperaturas, haciendo que no se queme fácilmente y pueda ser empleado en la elaboración de elementos de concreto [42]. En estudios realizados se han registrado datos de adición de hasta el 20% de cascarilla de arroz, usada como agregado fino en la elaboración de bloques de concreto no estructural

**2.2.4.3 Cascarilla de huevo.** La cáscara del huevo consta de una capa de piel porosa, una capa de calcita o carbonato de calcio y dos membranas de cáscara de huevo [45] De igual manera, se dice que la cáscara de huevo está compuesta por membranas de revestimiento, zona mamilar, reserva de calcio empalizadas y una cutícula en donde hay alrededor de 7.000 a 17.000 poros distribuidos de manera desigual en la superficie del cuerpo de la cáscara para el intercambio de agua y gas [45].

**2.2.4.3.1 Cutícula de la cáscara de huevo y su composición.** La cutícula es la capa más externa del huevo, su grosor es de unos 10-30 $\mu$ m y cubre los canales de los poros, por lo que se puede considerar que esta estructura puede proteger al huevo de la humedad y los

microorganismos [45]. De igual manera, la cutícula posee una gran parte de pigmentos (protoporfirina, biliverdina y su quelato de cinc) que dan el color a los huevos [45].

**2.2.4.3.2 Composición química de la capa de calcita.** La cáscara de huevo pesa alrededor del 10% del total de la masa total del huevo de gallina, además, dentro de su composición se establece un 94% de carbonato de calcio, 1% de carbonato de magnesio, 1% fosfato de calcio y 4% de materia orgánica, lo cual depende del tipo de huevo y el tipo de especie [45].

De igual manera, también se indica que la cáscara de huevo “contiene aproximadamente 39% de Ca elemental y su biodisponibilidad del calcio de la cáscara de huevo es tan alta como la de CaCO<sub>3</sub>” [45].

**Tabla 3.** *Contenido de mineral y materia orgánica de la cáscara de huevo*

	Promedio	Desviación estándar
M. Orgánica	16.1	4.6
M. Inorgánica	83.9	5.0
Calcio	38.2	3.5
Carbonato	44.3	3.2
Sodio	0.51	0.09
Fosfato	0.44	0.06
Sulfato	0.32	0.07
Potasio	0.14	0.15
Estroncio	0.14	0.02
Flour	1.8x10 <sup>-6</sup>	1.1x10 <sup>-6</sup>

Adaptado de Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cáscara de huevo como insumo para la elaboración de pintura látex de color [45].

**2.2.4.3.3 Generación de residuos de cáscara de huevo a nivel mundial.** Debido a que la cáscara representa el 10% del peso total del huevo, por lo cual, los residuos generados podrían estar alrededor de 6.2 – 6.82 millones de toneladas por año a nivel mundial, de igual manera, se espera que la producción mundial de huevo pase de 64.2 millones de toneladas que hubo en el 2010 a 86.8 millones de toneladas para el año 2030 [45].

Por otra parte, solo en la Unión Europea la cantidad de cáscara de huevos desechadas fueron de 999.000 toneladas en 2015, en Egipto fueron alrededor de 310.000 toneladas anuales de cáscara de huevo producidas en el período de 2001 al 2005 [45]. De igual forma, anualmente en Estados Unidos se generan cerca de 150.000 toneladas de desechos de cáscara de huevo donde el 26.3% de dichos residuos son dispuestos en botaderos municipales [45].

Por lo anterior, la cáscara de huevo es un residuo de la industria de los ovoproductos que comúnmente es dispuesto en rellenos sanitarios sin ser tratados antes lo que genera la aparición de malos olores, control de plagas y un crecimiento microbiano a medida que la cáscara de huevo realiza su biodegradación [45].

### **2.2.5 Economía circular**

La economía circular es creada debido a la alta demanda de materias primas y recursos naturales que son necesarias para el sustento de la población mundial que cada día va en aumento, al igual que la dependencia entre países para abastecerse, la relación de eficiencia en el uso de los recursos y el cambio climático en cuanto a la gran producción de desechos y la contaminación que estos producen a los ecosistemas [46].

En Colombia, la primera vez que se implementó de la economía circular fue con el CONPES 3874 lo cual es la Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos.

En esta estrategia se reconocen estas iniciativas, se construye sobre ellas y las potencializa al integrar una agenda de trabajo entre los Ministerios de Comercio, Industria y Turismo, de Ambiente y Desarrollo Sostenible, de Vivienda, Ciudad y Territorio, de Agricultura y Desarrollo Rural, de Transporte, de Educación y de Minas y Energía, el DNP y el DANE, así como entre varios programas y acuerdos sectoriales [46].

Por otra parte, para Ellen MacArthur Foundation la economía circular son los sistemas de producción y consumo que promueven la eficiencia en el uso de materiales, materias primas como el agua y la energía, basados en la capacidad que tienen los ecosistemas para recuperarse, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil de estos a través de la implementación de tecnologías innovadoras, alianzas y colaboración conjuntas de tal manera que se impulsen los modelos de negocio que responden al desarrollo sostenible [47].

**2.2.5.1 Tipologías de innovación.** Todo el tema de la economía circular requiere unos ajustes de innovación y también unos incrementos en los niveles de transformación, desde la valoración de los residuos, el cierre de ciclo de los materiales y la extensión de la vida útil de los productos. Cada una de las tipologías de economía circular se adhieren a un modelo de negocios con cadenas de valor diferentes [46].

**2.2.5.1.1 Primera tipología.** Esta tipología introduce un modelo de aprovechamiento de residuos, el cual dice que “El material que es desechado por un usuario es utilizado como materia prima por otro” [48].

Esta tipología de iniciativas incluye tecnología para el reciclaje, aprovechamiento y tratamiento de recursos, que involucra sistemas de recolección y separación en la fuente,

limpieza y procesamiento de materiales reciclados y su comercialización hacia nuevas aplicaciones, así como el aprovechamiento energético de residuos [46].

**2.2.5.1.2 Segunda tipología.** Esta tipología introduce un modelo circular que procura reutilizar la mayor cantidad de productos posibles durante su ciclo de vida, “El material es reutilizado en su misma aplicación o en un nuevo uso” [48]. Iniciativas del modelo circular extienden la vida útil de productos y materiales y evitan la disposición final como residuos [46].

**2.2.5.1.3 Tercera tipología.** Esta tipología propone diseños ecológicos a productos de uso común, tales como botellas, empaques y productos que usualmente son de un solo uso, esto para “reducir su uso e incorporar materiales recuperados en nuevos productos” [48].

Además del diseño de productos, esta tipología incluye también el diseño de sistemas de transporte y recolección de basuras y otra infraestructura, como parte de los modelos de ciudades sostenibles [46].

**2.2.5.1.4 Cuarta tipología.** Esta tipología contempla la transformación de sistemas de productos a servicios; esta tipología maneja una visión de consumo y producción diferente a la común, ya que, propone “el reemplazo de productos individuales por sistemas colectivos de suscripción” [48], como es evidenciable en los medios de transporte público (patinetas eléctricas, bicicletas, etc.) en ciudades capitales del mundo.

**2.2.5.1.5 Quinta tipología.** Esta tipología maneja la tecnología como una herramienta de optimización para procesos que usualmente pueden ser engorrosos, tales como la cuantificación

de materiales, agua, energía y residuos generados; también, emplea las herramientas tecnológicas para medir los procesos según su importancia y su aporte a las cadenas de valor [48].

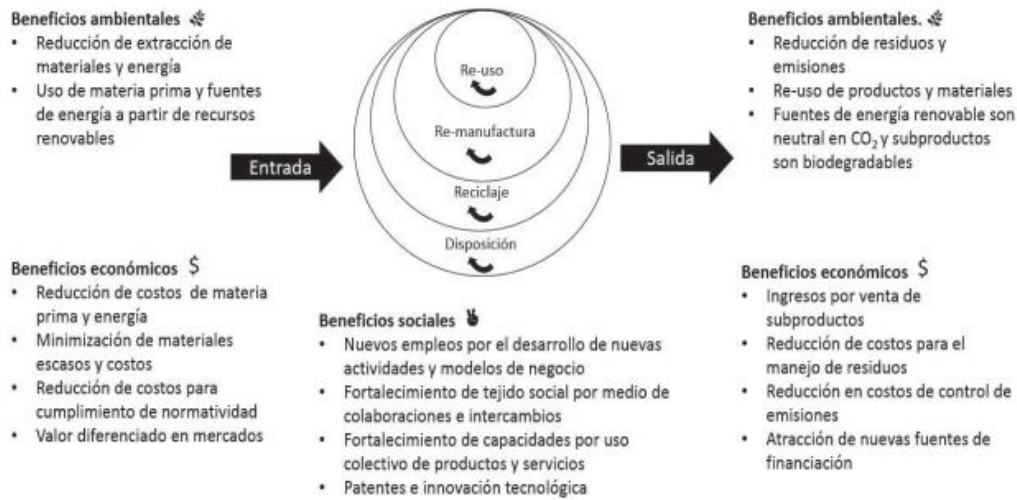
**Figura 2.** *Tipologías de iniciativas innovadoras de la economía circular*



Adaptado de Estrategia Nacional de Economía Circular [46].

**2.2.5.2 Beneficios de la Economía Circular.** En diversos países alrededor del mundo incluyendo Colombia, se ha impulsado el uso de la economía circular debido a los beneficios a nivel social, económico y ambiental, ya que según la fundación Ellen MacArthur (2013) se estima que la adopción del modelo de economía circular en sectores de mercancías de alta rotación (alimentos en empaques desechables, elementos de cuidado personal, entre otros), podría tener un ahorro en el rendimiento de costos de materiales entre 595 y 705 miles de millones de dólares por año a nivel global, de igual manera este modelo podría impulsar el ahorro de materiales almacenados hasta en un 40% y de generar empleo entre 0,5% - 5% del total [49]. ). A continuación, se muestra un esquema en donde se evidencian los beneficios que acarrea la economía circular en cada uno de los ámbitos.

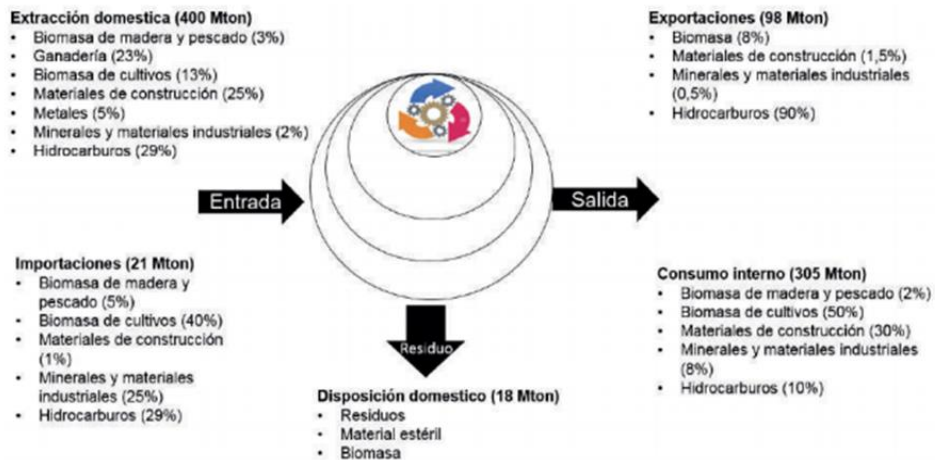
**Figura 3.** Beneficios de la Economía Circular



Adaptado de Estrategia Nacional de Economía Circular [50].

**2.2.5.3 Diagnóstico del metabolismo de la economía colombiana.** La necesidad de avanzar hacia una economía se basa en la conservación de los recursos que están disponibles en el país y de la oportunidad de aprovecharlos por medio de varios ciclos productivos que le den un mayor valor agregado mejorando así la productividad y creando nuevos mercados de exportación con productos diferentes [46]. Por lo anterior, a continuación, se muestra un esquema en el que se muestra el estado actual de la economía colombiana.

**Figura 4.** Estimación del metabolismo de la economía circular

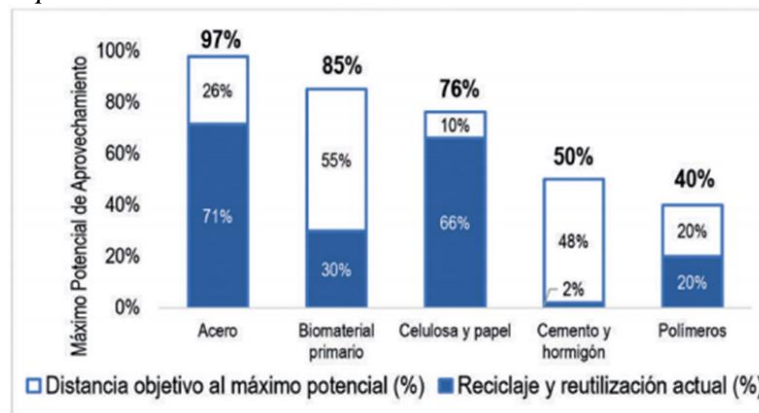


Adaptado de Estrategia Nacional de Economía Circular [51].

El balance físico entre las entradas y salidas de la economía colombiana se cierra con la estimación de los materiales que no representan valor dentro la economía, como lo son los residuos, los materiales estériles provenientes de la minería y la biomasa no aprovechada. En cuanto a los residuos domésticos, se estima que son desechados cerca de 18 millones de toneladas, que representa un 4.5% de la extracción doméstica. La disposición doméstica de residuos está compuesta por residuos orgánicos (59%), otros (16%), plásticos (13%), papel y cartón (9%), vidrios (2%) y metales (1%) [46].

Por otra parte, en el siguiente gráfico se muestra la comparación entre el material disponible y el material aprovechado en los sectores teniendo en cuenta específicamente las tasas de aprovechamiento de biomasa, cemento, concreto y polímeros los cuales presentan oportunidades para aumentar su tasa de aprovechamiento.

**Figura 5.** *Potencial de aprovechamiento materiales utilizados en la economía colombiana*



Adaptado de Estrategia Nacional de Economía Circular [52]

### 2.2.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible

Todos los Estados miembros de las Naciones Unidas adoptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible en 2015, también conocidos como Objetivos Mundiales, como un llamado general para

la erradicación de la pobreza, la protección del planeta y la garantía de la paz y la prosperidad para todos los habitantes [53].

**2.2.6.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible afines con esta investigación.** De los 17 Objetivos de desarrollo sostenible, se encuentran cuatro que están directamente relacionados con la construcción y con la finalidad del proyecto en desarrollo. Estos, tienen en cuenta la industria, las ciudades sostenibles, acciones por el clima y producción y consumo responsable de recursos.

**2.2.6.1.1 ODS 9. Industria, innovación e infraestructura.** El progreso tecnológico es fundamental para encontrar soluciones permanentes a los retos económicos y medioambientales, como lo es la creación de nuevos puestos de trabajo y la mejora de la eficiencia energética. Otras formas importantes de promover el desarrollo sostenible son impulsar el desarrollo industrial sostenible e invertir en investigación e innovación científicas [53].

**2.2.5.1.2 ODS 11. Ciudades y Comunidades Sostenibles.** Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, más de la mitad de la población mundial vive hoy en zonas urbanas. Se estima que para el 2050, esa cifra habrá aumentado a 6.500 millones de personas, dos tercios de la humanidad, y no será posible lograr un desarrollo sostenible sin transformar radicalmente la forma en que se construye [53].

**2.2.5.1.3 ODS 12. Producción y Consumo responsables.** El desarrollo sostenible se logrará si se reduce la huella ecológica mediante la producción y consumo eficiente de recursos,

por ello, deben ser modificados los métodos tradicionales con la finalidad de reducir al máximo el impacto que estos generan.

La gestión eficiente de los recursos naturales compartidos y la forma en que se eliminan los desechos tóxicos y los contaminantes son vitales para lograr este objetivo. También es importante instar a las industrias, los negocios y los consumidores a reciclar y reducir los desechos, como asimismo apoyar a los países en desarrollo a avanzar hacia patrones sostenibles de consumo para 2030 [53].

**2.2.5.1.4 ODS 13.** Acción por el clima. Las emisiones de los gases de efecto invernadero continúan en aumento, estos gases tienen efectos directos en el cambio climático, efectos permanentes y que podrían traer consigo consecuencias irreversibles.

El objetivo busca movilizar US\$ 100.000 millones anualmente hasta 2020, con el fin de abordar las necesidades de los países en desarrollo en cuanto a adaptación al cambio climático e inversión en el desarrollo bajo en carbono [53].

## **2.3 Marco legal**

### **2.3.1 Decreto 586 de 2015**

En este decreto se reúnen algunos artículos de la constitución política de Colombia, ya que esta contempla normas relacionadas con la protección del medio ambiente, como las siguientes:

**2.3.1.1 Art. 79.** Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del

estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines [54].

**2.3.1.2 Art. 80.** El estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en zonas fronterizas [55].

### ***2.3.2 Norma ISO 14001***

Busca conseguir un equilibrio entre el medio ambiente, la sociedad y la economía, obteniendo así un desarrollo sostenible. Esta norma proporciona a empresas u organización opciones que contribuyen a un buen sistema de Gestión Ambiental.

### ***2.3.3 Resolución 472 del 28 de febrero de 2017***

Según el ministro de ambiente Luis Alberto Murillo, esta norma brinda lineamientos para el aprovechamiento y disposición final de los RCD, mediante la implementación de instrumentos y reglas para las instalaciones de gestión, como los puntos limpios y plantas de aprovechamiento, en donde se llevarán a cabo la separación y el almacenamiento temporal con las condiciones mínimas de operación.

Para la realización y análisis de los especímenes de prueba se tienen en cuenta ciertas normas nacionales (colombianas), las cuales son descritas a continuación:

### **2.3.4 NSR-10 Título C**

En este apartado de la Norma Sismorresistente se proporcionan los requisitos mínimos para el diseño y la construcción de elementos de concreto estructural, además, incluye las especificaciones de los materiales utilizados en las mezclas [56].

### **2.3.5 NTC 1377**

Esta norma es la adaptación idéntica de la norma americana ASTM C19290. Por otra parte, en esta norma se habla de cómo se deben elaborar y curar los especímenes para realizar el ensayo de resistencia a la flexión para especímenes en forma de vigas de concreto por medio de la aplicación de momentos [57].

### **2.3.6 INVE 217**

“Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad bulk de un agregado fino y de un agregado grueso (incluyendo sus vacíos)” [58]. Esto de gran importancia para realizar una dosificación con las densidades secas de los agregados.

### **2.3.7 INVE 222**

“Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino” [1]. Lo anterior es de gran importancia ya que las propiedades del agregado fino pueden afectar la mezcla del concreto.

### **2.3.8 INVE 223**

“Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino” [59]. Lo anterior es de gran importancia ya que las propiedades del agregado grueso pueden afectar la mezcla del concreto.

### **2.3.9 NTC 173**

Esta norma establece todos los requisitos para realizar una gradación de calidad a los agregados finos y gruesos que serán usados en una mezcla de concreto. En esta se observan las características de cada tipo de agregado, las sustancias dañinas que puede llegar a tener y también su sanidad, esto brindando la información suficiente para determinar si un agregado fino o grueso es utilizable o no [60].

### **2.3.10 NTC 2871**

Esta norma indica el método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios) [61].

### **2.3.11 Plan Nacional de Desarrollo 2018-2020**

Este plan establece los objetivos a alcanzar y sus respectivas estrategias, tanto para el aprovechamiento de residuos como para la optimización en el consumo de recursos naturales.

### 3. Método

#### 3.1 Tipo y Diseño de Investigación

Este trabajo de investigación titulado “Resistencia a la flexión de una viga de concreto obtenido a partir de incorporación de residuos agroindustriales”, tiene como fin evaluar la incidencia que tiene una mezcla de concreto con adición de residuos agroindustriales como lo son la cáscara de huevo y el tamo de arroz como reemplazo parcial del cemento y arena respectivamente, en la resistencia a la flexión de esta, contribuyendo de esta manera a la disminución del impacto ambiental causado por la utilización del cemento, explotación de recursos naturales y la alta generación de residuos agroindustriales.

Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación es de carácter analítico, ya que tiene como propósito determinar una de las características de la mezcla, la cual es la resistencia a la flexión y por medio de ella evaluar la incidencia que se tiene al realizar el reemplazo del material cementante y el agregado fino por residuos agroindustriales.

La investigación o método analítico de investigación busca las causas y/o consecuencias de los hechos. Es apropiado para datos que son cuantitativos en su naturaleza y que necesitan asistencia estadística para extraer su significado. Este tipo de investigación va dirigida a la búsqueda de asociaciones y relaciones directas entre variables, utilizando diseños de observaciones y no de manipulación. Se refiere a aquellos problemas de investigación donde el trabajo se centra en determinar el porqué de un fenómeno, es decir, explicar por qué suceden ciertos hechos, poniendo en evidencia la relación causa-efecto existentes [62].

De igual forma, teniendo en cuenta los objetivos expuestos, esta investigación tiene un diseño de carácter experimental con un escenario de laboratorio. Lo anterior se debe a que es posible manipular las variables que se desean medir (diseño experimental) teniendo en cuenta el efecto que tiene la variable dependiente (Resistencia a la Flexión) sobre la variable independiente (residuos agroindustriales) a medida que se varían las proporciones de cemento y arena en la mezcla. Basado en esto, el escenario en el que se desarrollará el experimento es el de un laboratorio, ya que el efecto de la variable independiente será monitoreado desde un lugar cerrado, evitando cualquier afectación que el medio pueda tener sobre la mezcla.

### **3.2 Población y muestra**

Según Sampieri, “una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especulaciones” [63], lo cual implica que la muestra a escoger debe pertenecer a un mismo conjunto y poseer características comunes, dando así origen a las variables o datos comunes. La población de esta investigación debe cumplir con alguna de la siguiente característica:

Deberán ser residuos de cascarilla de huevo y tamo de arroz que no hayan estado en contacto con otro tipo de residuo sólido, ya que esto podría afectar sus características químicas y por ende afectar la mezcla.

Debido a que el diseño del proyecto es experimental, la muestra es no probabilística. Por lo tanto, las muestras se eligen en función de las características de la investigación, no de la probabilidad. Así pues, el tamaño es a criterio del investigador, ya que, según Sampieri, “la validez de la investigación se consolida con la repetición” [63].

De igual manera, según la NTC – 550 los especímenes de vigas deben cumplir con las siguientes especificaciones:

La longitud debe ser por lo menos de 50mm, mayor que tres veces la profundidad. La relación de ancho a profundidad, de los especímenes moldeados, no debe exceder 1,5. La viga patrón debe medir 150mm por 150mm de sección transversal, y se debe usar para concreto con agregado grueso de un tamaño máximo nominal hasta de 50mm [64].

Por consiguiente, se decidió tomar como muestra la cantidad de dos vigas para cada variación de cemento y arena reemplazado por residuos de tamo de arroz y cascarilla de huevo. Dichas vigas serán falladas en pruebas de laboratorio y los resultados serán diligenciados en el instrumento de recolección de datos (Ver Apéndice G y Apéndice H).

### **3.3 Lugar**

Esta investigación será realizada en el municipio de Floridablanca más exactamente la Universidad Santo Tomás de Aquino, teniendo en cuenta que es el lugar en donde habitan los investigadores y en donde se encuentran la maquinaria y equipos necesarios para realizar los ensayos de laboratorio.

Debido a lo anterior, la Universidad Santo Tomás es el lugar en donde se realizará la recolección de datos y, por lo tanto, en donde se llevará a cabo la realización de las pruebas de flexión las cuales serán realizadas en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad.

Teniendo en cuenta que en esta investigación se ven involucradas diferentes variables como la resistencia a la flexión (Resultado del comportamiento conjunto de diferentes variables), las proporciones de cemento y agregado fino reemplazadas y la relación agua/cemento, se establece que la técnica de análisis de datos que será utilizada será el Análisis multivariante

(matricial) y sistemático, la cual consiste en relacionar todas las variables aleatorias de tal manera que el efecto que se produzca no pueda ser interpretado de manera individual [65].

En el Apéndice A se puede apreciar el cuadro del desarrollo metodológico teniendo en cuenta los objetivos específicos y las actividades vinculadas a ellos.

#### **4. Desarrollo y Resultados**

En este capítulo se encuentra todo el procedimiento realizado durante los respectivos ensayos de laboratorio los cuales se encuentran apoyados por algunas imágenes, asimismo, se pueden encontrar los resultados obtenidos al finalizar los procedimientos, apoyados por tablas y los cuales también podrán verse con mayor orden en las herramientas de recolección de datos que se encontrarán en los respectivos apéndices.

##### **4.1 Densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de agregados finos**

Siguiendo la normativa INV – 222 establecida por el Instituto Técnico de Vías (INVIAS), se tomó 1kg de arena (Ver Figura 6) como muestra para la realización del primer ensayo con el fin de obtener una muestra superficialmente seca, para esto, es necesario humedecer o secar la muestra de acuerdo con la consistencia deseada, lo cual se corrobora por medio de la prueba del cono (Ver Figura 7).

**Figura 6.** *Prueba del cono***Figura 7.** *Pesaje arena 1Kg*

Teniendo en cuenta lo anterior, la prueba del cono se realizó en repetidas ocasiones, ya que su humedad era elevada, lo cual se puede decir porque al dar un leve golpe en la superficie no se formaba un ángulo de  $45^\circ$  (Ver Figura 8) ocasionado por la compactación de la muestra, por lo cual fue necesario secar la muestra manualmente con la utilización de espátulas (Ver Figura 9).

**Figura 8.** *Corte a 45°***Figura 9.** *Secado manual de la muestra*

Una vez se obtuvo la muestra con las características correctas, se tomaron 500g (Ver Figura 10) para realizar el procedimiento gravimétrico de agregado fino que se estipula en la norma, por lo cual fue necesario utilizar un picnómetro con capacidad de 1000ml. A continuación, se llenó parcialmente el picnómetro con la muestra de 500g de agregado fino y se añadió agua hasta un 90% de la capacidad del picnómetro (Ver Figura 11).

**Figura 10.** *Muestra de 500g***Figura 11.** *Picnómetro al 90% de su capacidad*

Luego, se eliminaron manualmente las burbujas que había dentro del recipiente, lo cual indica los vacíos existentes entre las partículas; lo anterior se logró gracias a movimientos rotatorios realizados durante 30 a 40 minutos (Ver Figura 12). Continuando con el procedimiento, se llenó el recipiente con agua hasta su máxima capacidad y se tomó el peso (Ver Figura 13), para luego remover el material en una tara y secarlo a temperatura constante ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ) por 24 horas con ayuda de un horno (Ver Figura 14).

**Figura 12.** *Eliminación de espacios con movimientos rotatorios*



**Figura 13.** *Pesaje de picnómetro a su máxima capacidad*



**Figura 14.** *Muestra puesta a secar en horno*



Finalmente, luego de 24 horas secándose y 1 hora y media más sometida a temperatura ambiente, la mezcla fue pesada nuevamente cuando ya se encontraba completamente seca (Ver Figura 15). Todo el procedimiento realizado anteriormente, fue necesario para caracterizar la muestra en sus diferentes estados (Ver Tabla 4).

**Figura 15.** Muestra seca al horno.



**Tabla 4.** Datos obtenidos de la muestra de agregados finos.

Variable	Descripción	Peso (g)
A'	Masa seca al horno sin corregir (SH')	665
A	Masa seca al horno (SH)	474
B	Picnómetro con agua	1336
C	Picnómetro con agua y muestra	1633
S	Arena Superficialmente Seca (SSS)	500
	Picnómetro	316
	Muestra (Previa al cono)	1000
	Corrección medición, masa seca al horno, ya que se consideró la masa del recipiente	191

Estos datos fueron utilizados para calcular la densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de los agregados finos los cuales fueron determinados utilizando las ecuaciones

suministradas por la normativa INV-222 las cuales pueden ser apreciadas en la Tabla 5. De igual forma, los resultados obtenidos se pueden observar en las Tablas 6 y 7 así como en el Apéndice B.

**Tabla 5.** Ecuaciones INV-222 para agregados finos

Estado	Ecuación	Unidad	Variable
$\rho$ SH	$\frac{997,5A}{(B + S - C)}$	kg/m <sup>3</sup>	Densidad seca al horno
$\rho$ SSS	$\frac{997,5S}{(B + S - C)}$	kg/m <sup>3</sup>	Densidad superficialmente seca
$\rho$ Aparente	$\frac{997,5A}{(B + A - C)}$	kg/m <sup>3</sup>	Densidad aparente
% Absorción	$\frac{B - A}{A} \times 100$	%	Porcentaje de absorción

**Tabla 6.** Densidades obtenidas para el agregado fino.

Estado	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho$ SH	2329,14
$\rho$ SSS	2456,90
$\rho$ Aparente	2671,27

**Tabla 7.** Porcentaje de absorción del agregado fino.

Absorción (%)	5,49%
---------------	-------

#### 4.2 Densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de agregados gruesos

En el caso de los agregados gruesos, se tuvo en cuenta la norma INVIAS INV – 223, la cual indica que la muestra que se utiliza es aquella que queda retenida en el tamiz No. 4 (7,75mm), para cumplir con esto, se tomó una muestra significativa del material y se cuarteó (Ver Figura 16) para luego realizar una pequeña tamizada y obtener así el material deseado, el cual, según la

normativa debía ser de 3kg (Ver Tabla 8) teniendo en cuenta el tamaño máximo nominal de la roca más grande, lo cual, no superó los 19mm.

**Figura 16.** *Cuarteo muestra grava*



**Tabla 8.** *Cantidades mínimas para ensayo.*

Tamaño máximo nominal		Masa mínima de la muestra de ensayo	
mm	pg.	kg	lb
12,5	1/2	2	4,4
19	3/4	3	6,6
25	1	4	8,8
37,5	1 1/2	5	11
50	2	8	18
63	2 1/2	12	26
75	3	18	40
90	3 1/2	25	55
100	4	40	88
125	5	75	165

Adaptado de Densidad, densidad relativa y absorción del agregado grueso [59].

Por otra parte, la muestra tomada fue sumergida completamente en agua durante 24 horas para saturarla (Ver Figura 17), con la finalidad de secar la superficie de cada una de las rocas que

componen la muestra (Ver Figura 18) y de esta forma obtener el peso del material superficialmente seco (Ver Figura 19).

**Figura 17.** *Muestra saturada*



**Figura 18.** *Secado de las rocas*



**Figura 19.** *Masa muestra superficialmente seca.*



Luego de obtener la masa de la muestra superficialmente seca, se procedió a sumergir el agregado grueso por medio de una balanza de inmersión para obtener la masa de la muestra en estado saturado (Ver Figura 20); para seguidamente llevar el agregado al horno por 24 horas (Ver Figura 21) y obtener la masa del agregado grueso completamente seco al horno (Ver Figura 22).

**Figura 20.** *Muestra ingresada para secado al horno*



**Figura 21.** *Muestra siendo sumergida***Figura 22.** *Agregado grueso seco al horno*

El procedimiento anterior fue necesario para obtener la caracterización del agregado grueso en sus diferentes estados (Ver Tabla 9) y de esta forma las diferentes variables requeridas para calcular la densidad, gravedad específica y absorción de la muestra de agregado grueso seleccionada, por medio de las ecuaciones suministradas por la normativa INV-223 del INVIAS (Ver Tabla 10), sin embargo los resultados pueden ser observados con mayor claridad en la Herramienta de Recolección de Datos que se encuentra en el Apéndice C.

**Tabla 9.** Datos obtenidos de la muestra de agregados gruesos.

Variable	Descripción	Peso (g)
A	Masa al aire de la muestra seca al horno	3291
B	Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca	3317
C	Masa aparente de la muestra saturada en agua	1838
	Tara metálica	285

**Tabla 10.** Ecuaciones INV-223 para agregados gruesos.

Estado	Ecuación	Unidad	Variable
$\rho$ SH	$\frac{997,5A}{(B - C)}$	kg/m <sup>3</sup>	Densidad seca al horno
$\rho$ SSS	$\frac{997,5B}{(B - C)}$	kg/m <sup>3</sup>	Densidad superficialmente seca
$\rho$ Aparente	$\frac{997,5A}{(A - C)}$	kg/m <sup>3</sup>	Densidad aparente
% Absorción	$\frac{B - A}{A} \times 100$	%	Porcentaje de absorción

Los resultados obtenidos del cálculo de la densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de los agregados gruesos se encuentran en las tablas 11 y 12 dispuestas a continuación.

**Tabla 11.** Densidades obtenidas para el agregado grueso.

Estado	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
SH	2219,59
SSS	2237,12
Aparente	2259,31

**Tabla 12.** Porcentaje de absorción del agregado grueso.

Absorción (%)	0,79%
---------------	-------

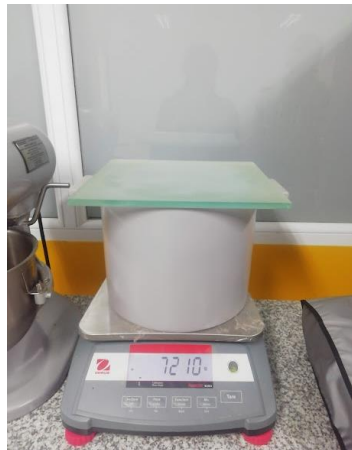
#### 4.3 Densidad Bulk y porcentaje de vacíos de los agregados

Fue necesario calcular la densidad bulk de los agregados para realizar una correcta dosificación de las diferentes mezclas ya que, de esta manera se tienen en cuenta los vacíos que

existen en el material. Por lo anterior, se llevó a cabo el procedimiento estipulado por la norma INVIAS INV – 217 el cual se explicará con mayor detalle a continuación.

En primer lugar, es necesario tener en cuenta que para estos procedimientos se utilizaron materiales y equipos especiales, los cuales fueron un recipiente grande para el agregado grueso, un recipiente pequeño para el agregado fino y finalmente, una lámina de vidrio; por todo lo anterior, se tomó el peso de dichos equipos con el fin de obtener su masa antes de realizar el debido procedimiento (Ver Figuras 23 y 24).

**Figura 23.** *Masa equipos agregado grueso.*



**Figura 24.** *Masa equipos agregado fino.*



Una vez se obtuvo la masa de los equipos, se procedió a aplicar una capa de grasa en los bordes del recipiente, lo cual evitó que el agua se desbordara, seguido a esto, cada uno de los recipientes fue llenado completamente de agua a temperatura ambiente (Ver Figuras 25 y 26), para luego tapar cada recipiente con la lámina de vidrio y así poder eliminar las burbujas y el exceso de agua.

**Figura 25.** *Llenado del recipiente para finos*



**Figura 26.** *Llenado del recipiente para gruesos*



Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a pesar cada uno de los recipientes que contenían el agua (Ver Figuras 27 y 28) y se mide la temperatura del agua (Ver Figura 29) con la finalidad de determinar su densidad, para ello se tuvo en cuenta el contenido de la Tabla 13.

**Figura 27.** *Peso recipiente de agregados finos*



**Figura 28.** *Peso recipiente de agregados gruesos*



**Figura 29.** *Temperatura del agua***Tabla 13.** *Densidad del agua.*

Temperatura		Densidad	
°C	°F	kg/m <sup>3</sup>	lb/pie <sup>3</sup>
15,6	60	999,01	62,366
18,3	65	998,54	62,336
21,1	70	997,97	62,301
23	73,4	997,54	62,274
23,9	75	997,32	62,261
26,7	80	996,59	62,216
29,4	85	995,83	62,166

Adaptado de densidad bulk (Peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto [58].

#### **4.3.1 Densidad bulk y porcentaje de vacíos para agregado fino.**

En primer lugar, es necesario especificar que el método utilizado para obtener la densidad bulk de los agregados fue el de apisonamiento o varillado. Teniendo en cuenta lo anterior, el desarrollo del ensayo de laboratorio se inició vertiendo en el recipiente anteriormente pesado y calibrado, la cantidad de material necesaria para alcanzar un tercio de la capacidad del recipiente (Ver Figura 30), seguido a esto se procedió a apisonar la capa con 25 golpes de varilla de manera

uniforme sobre toda la superficie (Ver Figura 31), de igual manera, se repite el procedimiento con las siguientes dos capas hasta llenar la capacidad total del recipiente, para finalmente enrasar la superficie del agregado de tal manera que no se presenten depresiones o irregularidades en la superficie (Ver Figura 32).

**Figura 30.** *Llenado de 1/3 del recipiente*



**Figura 31.** *Apisonamiento del agregado fino*



**Figura 32.** *Enrase de la superficie del material*

Una vez finalizado el procedimiento anterior, se pesó en la balanza el recipiente con el material (Ver Figura 33) obteniendo una masa de 5866g.

**Figura 33.** *Masa del recipiente con el agregado fino*

Los datos obtenidos anteriormente fueron consignados en la Tabla 14, en donde se indica a qué corresponde cada valor hallado. De igual forma, dichos valores fueron los utilizados para calcular la densidad bulk y el porcentaje de vacíos teniendo en cuenta las ecuaciones suministradas por la norma INV-217 las cuales pueden ser observadas en la Tabla 15.

**Tabla 14.** Variables Densidad Bulk y % de vacíos para agregados finos.

Variable	Descripción	Valor
G	Masa del agregado más el recipiente de medida (kg)	5,866
T	Masa del recipiente de medida (kg)	1,666
V	Volumen del recipiente de medida (m3)	0,00278
S	Gravedad Específica SSS INV - 222 (kg/m3)	2456,89
A	Porcentaje de absorción INV - 222	5,49%

**Tabla 15.** Ecuaciones INV-217 para agregados.

Símbolo	Ecuación	Unidad	Variable
M (D. Bulk)	$\frac{G - T}{V}$	kg/m3	Densidad Bulk
Msss (Bulk en SSS)	$M * (1 + \frac{A}{100})$	kg/m3	Densidad Bulk superficialmente seca
% Vacíos	$\frac{(S * \rho_w) - M}{S * \rho_w} * 100$	%	Porcentaje de vacíos

Así mismo, en la Tabla 16 se plasman los resultados obtenidos de Densidad Bulk o peso unitario y el porcentaje de vacíos para los agregados finos, de igual manera, todos los datos recolectados pueden ser vistos en el Apéndice D.

**Tabla 16.** Densidad Bulk y % de vacíos para agregados finos

Estado	Densidad Relativa (kg/m3)
M	1513,21
Msss	1514,04
<b>%vacíos</b>	<b>99,938%</b>

#### 4.3.2 Densidad bulk y porcentaje de vacíos para agregado grueso

El procedimiento que se llevó a cabo para determinar la densidad bulk y el porcentaje de vacíos del agregado grueso fue igual al realizado para los agregados finos. Por lo anterior, el

llenado del recipiente se realizó de manera parcial (3 capas), ya que en cada una de ellas se realizó el apisonamiento hasta llenar el recipiente (Ver Figura 34), en donde se procedió a enrasar para evitar la mayor cantidad de irregularidades. Finalmente, se obtuvo la masa del material junto con el recipiente, arrojando un valor de 20400g (Ver Figura 35).

**Figura 34.** *Apisonamiento del agregado grueso*



**Figura 35.** *Masa del agregado grueso con el recipiente*



Al igual que en los agregados finos, los datos obtenidos fueron consignados en tablas, en este caso se pueden observar en la Tabla 17, en donde se indica a qué corresponde cada valor hallado. De igual forma, las ecuaciones utilizadas para determinar la densidad bulk y el porcentaje de vacíos fueron las mismas utilizadas para el agregado fino (Ver Tabla 15), por lo tanto, los resultados se encuentran en la Tabla 18 y también podrán ser encontrados en la herramienta de recolección de datos del Apéndice D.

**Tabla 17.** *Variables Densidad Bulk y % de vacíos para agregado grueso.*

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
G	Masa del agregado más el recipiente de medida (kg)	20,4
T	Masa del recipiente de medida (kg)	4,997
V	Volumen del recipiente de medida (m3)	0,00974
S	Gravedad Específica SSS INV - 223 (kg/m3)	2237,12
A	Porcentaje de absorción INV - 223	0,79%

**Tabla 18.** *Densidad Bulk y % de vacíos agregado grueso.*

<b>Estado</b>	<b>Densidad (Kg/m3)</b>
M	1581,83
Msss	1581,95
<b>% vacíos</b>	<b>99,929%</b>

#### **4.4 Elaboración de dosificaciones para las vigas con reemplazo parcial de residuos agroindustriales**

Basados en el diseño metodológico que se puede observar en el Apéndice A, el siguiente paso fue realizar el diseño de las cantidades de material necesario para las vigas con reemplazo parcial de cáscara de huevo por cemento y tamo de arroz por arena, dichas cantidades pueden ser observadas en los Apéndices F y G respectivamente. Además, las cantidades de material necesarias para cada tipo de mezcla se determinaron teniendo en cuenta una dosificación 1:2:3 para una

resistencia de concreto de 3000 psi o 21 MPa en cuanto a la resistencia a compresión y una relación agua/cemento de 0,6.

Es necesario tener en cuenta que, con el fin de evitar la excesiva realización de especímenes de vigas con diferentes reemplazos, se estableció que dichos reemplazos se realizarían aumentando parcialmente un 3% más en cada dosificación hasta conseguir un total de reemplazo de 15% para cada tipo. Por lo anterior, se obtuvo un total de once mezclas diferentes contando la dosificación que no posee ningún reemplazo (Blanco), según la cual se realizará la respectiva comparación de resistencia.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se obtuvieron mezclas con un porcentaje de reemplazo de 0%, 3%, 6%, 9%, 12% y 15% para las vigas con reemplazo de arena y para las vigas con reemplazo de cemento. Además, basados en lo expuesto en el numeral 3.2 Población y muestra, se realizaron dos especímenes por cada tipo de mezcla, por lo tanto, se obtuvieron un total de 22 vigas a las cuales se les realizó el ensayo de resistencia a flexión.

#### **4.5 Elaboración y curado de mezclas de concreto con reemplazos parciales de tamo de arroz y cáscara de huevo**

Una vez obtenidas las cantidades de material necesarias para llevar a cabo las diferentes mezclas, se procedió a realizar los especímenes con base en la norma NTC-1377 para cada tipo de mezcla; dichos especímenes eran prismáticos en forma de viga ya que así lo especifica la norma para realizar el ensayo a flexión. Es necesario tener en cuenta que todas las mezclas fueron realizadas de forma manual, es decir sin el uso de una mezcladora, por lo anterior, en un primer lugar fueron mezclados el agregado fino junto con el cemento y en el caso de que hubiera reemplazos, fueron añadidos en ese mismo momento; luego se añadió el agregado grueso y se

mezcló manualmente hasta tener una distribución uniforme de todos los materiales (Ver Figura 36). Finalmente, se agregó el agua de tal manera que se lograra la consistencia y homogeneidad deseada (Ver Figura 37), en algunos casos, debido a que la mezcla aún se percibía seca, fue necesario agregar una mayor cantidad de agua, modificando así la relación agua cemento.

**Figura 36.** *Mezcla antes de agregar agua*



**Figura 37.** *Adición de agua a la mezcla*



Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, a continuación, se muestran unas tablas que reflejan la variación de la relación agua cemento que tuvieron las mezclas con adición de tamo de arroz y con adición de cáscara de huevo.

**Tabla 19.** *Relación A/C de vigas con adición de Tamo de Arroz*

<b>Tipo</b>	<b>Cemento [Kg]</b>	<b>Reemplazo CA [Kg]</b>	<b>Agua inicial [Kg]</b>	<b>Agua añadida [Kg]</b>	<b>A/C</b>
3%	8,664	0,44	5,2	1,314	0,75
6%	8,664	1,322	5,2	1,62	0,79
9%	8,664	1,984	5,2	2,925	0,94
12%	8,664	2,646	5,2	4,512	1,12
15%	8,664	3,306	5,2	5,702	1,26

**Tabla 20.** *Relación A/C de vigas con adición de Cáscara de Huevo*

<b>Tipo</b>	<b>Cemento [Kg]</b>	<b>Reemplazo CH [Kg]</b>	<b>Agua inicial [Kg]</b>	<b>Agua añadida [Kg]</b>	<b>A/C</b>
3%	8,404	0,26	5,2	0,188	0,64
6%	8,144	0,52	5,2	0,19	0,66
9%	7,884	0,78	5,2	0,23	0,69
12%	7,624	1,04	5,2	0,25	0,71
15%	7,364	1,3	5,2	0,284	0,74

Una vez se obtuvo las mezclas con la consistencia deseada (Ver figura 38) se procedió a colocarla en los recipientes, para ello, fue necesario engrasar muy bien los moldes, de tal manera que el material no se adhiriera a las paredes. Continuando con el procedimiento, con ayuda de los palustres se agregó parte de la mezcla en el molde distribuyéndola por toda la superficie y, de acuerdo con la normativa anteriormente nombrada la mezcla debía ser colocada o fundida por capas, las cuales son establecidas por la Tabla 21.

**Figura 38.** *Mezcla con la consistencia deseada***Tabla 21.** *Número de capas requeridas para las muestras*

Tipo y tamaño de la muestra. Altura (mm)	Método de compactación	Número de capas	Altura aproximada de la capa (mm)
<b>Cilindros</b>			
Hasta 300	Apisonado	3 iguales	100
Mayor que 300	Apisonado	Las requeridas	
Hasta 460	Vibración	2 iguales	200
Mayor que 460	Vibración	3 o más	
<b>PRISMAS Y CILINDROS HORIZONTALES PARA FLUENCIA</b>			
Hasta 200	Apisonado	2 iguales	
Mayor que 200	Apisonado	3 o más	100
Hasta 200	Vibración	1	
Mayor que 200	Vibración	2 o más	

Adaptado de Norma Técnica Colombiana 1377 [57].

De acuerdo con la Tabla 19 y teniendo en cuenta que los recipientes poseen una altura de 150mm se realizó una compactación por medio del método de apisonamiento en dos capas iguales las cuales fue necesario apisonar; para ello la norma específica un tipo de varilla y una cantidad de golpes que deben ser dados por cada capa lo cual se encuentra especificado en la Tabla 22.

**Tabla 22.** *Diámetro de varilla y número de golpes para utilizar en el modelo de muestras de ensayo.*

<b>Cilindros</b>		
<b>Diámetro del cilindro (mm)</b>	<b>Diámetro de la varilla (mm)</b>	<b>Número de golpes por capa</b>
50 a 150	10	25
150	16	25
200	16	50
250	16	75
<b>Vigas y prismas</b>		
<b>Área de la superficie superior de la muestra (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Diámetro de varilla (mm)</b>	<b>Número de golpes por capa</b>
160 ó menores	10	25
165 a 310	10	1 por cada 7 cm <sup>2</sup> de área
320 ó más	16	1 por cada 14 cm <sup>2</sup> de área
<b>Cilindros horizontales para fluencia</b>		
<b>Diámetro del cilindro (mm)</b>	<b>Diámetro de la varilla (mm)</b>	<b>Número de golpes por capa</b>
150	16	50 total. 25 a lo largo de los lados del eje

Una vez realizado el apisonamiento de la capa, se procedió a golpear ligeramente diez o quince veces los laterales del recipiente con un mazo de goma con la finalidad de cerrar los huecos dejados por el apisonado. El procedimiento descrito anteriormente, fue realizado para ambas capas de la mezcla. Luego, se realizó el acabado de las vigas enrasando con ayuda del palustre con el fin de obtener una superficie lisa y sin depresiones (Ver Figura 39).

Posteriormente, se inició la fase de curado la cual consiste en evitar que, durante las 24 horas posteriores a la realización de los especímenes las mezclas pierdan agua hasta el momento de desencofrado y curado final. Finalmente, luego de 24 horas de realizadas, se desencofran los especímenes o se retiran de los moldes para ser sumergidos en agua (Ver Figura 40) y mantener la

humedad hasta el día en que se realicen los ensayos a flexión, lo cual sería 28 días después según lo dictaminado por la norma.

**Figura 39.** *Enrasado de vigas*



**Figura 40.** *Vigas sumergidas en agua para curado*



#### **4.6 Realización de Ensayos a Flexión**

Después de 28 días en proceso de curado, se realizaron los ensayos a flexión de cada espécimen donde dicho procedimiento se encuentra descrito por la norma NTC 2871, en esta se indica que se deben ensayar las vigas una vez retiradas del ambiente húmedo y seguidamente se coloca cada uno de los especímenes en la máquina de ensayo de manera lateral a la dirección en

que fue fundida la viga (en este caso sobre la longitud más larga) y de manera centrada sobre los soportes. Cabe resaltar que el método de ensayo que se realizó fue el de aplicación de carga en los tercios medios del elemento (Ver Figura 41), por lo tanto, se calculó la tasa de carga del ensayo haciendo uso de la ecuación  $r = Sbd^2/L$  [61] dada por la norma.

Teniendo en cuenta que la tasa de incremento en el esfuerzo extremo de la fibra “S” en todos los casos fue de 1.21 MPa/min y que las dimensiones promedio de todas las vigas en cuanto ancho y alto eran de 150mm, se obtuvo que la tasa de aplicación de carga “r” fue de 9075 N/mm.

Por otra parte, para el cálculo del módulo de rotura a flexión de los especímenes, se hizo uso de la ecuación  $R = PL/bd^2$  [61] donde:

R = módulo de rotura, MPa (psi).

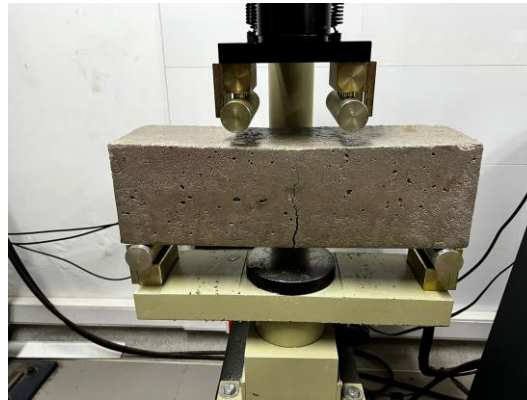
P = carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, N, (lbf).

L = distancia entre apoyos, mm, (pulgadas)

b = ancho promedio de la probeta en la fractura, mm (pulgadas).

d = altura promedio del espécimen en el lugar de la fractura, mm (pulgadas).

Teniendo en cuenta la ecuación anterior, en la Tabla 23 se puede observar a modo resumen los resultados obtenidos para las vigas con adición de Tamo de Arroz, sin embargo, en el Apéndice G se puede observar con mayor detalle las diferentes variables de la ecuación y los resultados obtenidos.

**Figura 41.** *Ensayo NTC 2871.***Tabla 23.** *Módulo de rotura de vigas con reemplazo parcial de arena por tamo de arroz.*

<b>Reemplazo parcial de arena por tamo de arroz</b>	
<b>% de Reemplazo</b>	<b>R prom (Mpa)</b>
0%	1,81
3%	1,68
6%	1,73
9%	1,14
12%	0,5
15%	0,7

De igual manera, fue calculado el módulo de rotura de las vigas con reemplazo parcial de cemento por cáscara de huevo y los resultados se pueden observar en la Tabla 24 al igual que en la herramienta de recolección de datos que se encuentra en el Apéndice H.

**Tabla 24.** *Módulo de rotura de vigas con reemplazo parcial de arena por tamo de arroz.*

<b>Reemplazo parcial de cemento por cáscara de huevo</b>	
<b>% de Reemplazo</b>	<b>R prom (Mpa)</b>
0%	1,81
3%	2,16
6%	1,94
9%	2,21
12%	1,96
15%	1,84

## 5. Discusión

Los ensayos para determinar las propiedades de los agregados, fino y grueso se realizaron de manera rigurosa, sabiendo que una buena caracterización de los agregados aporta veracidad a los ensayos posteriormente realizados con el hormigón. Las densidades aparentes de los agregados deben estar en el rango entre 2300 kg/m<sup>3</sup> y 2800 kg/m<sup>3</sup> para considerar sus propiedades como óptimas y apropiadas para la elaboración de hormigón [33].

Así mismo, los porcentajes de absorción de los agregados son de suma importancia para la correcta realización del hormigón, ya que, puede afectar su comportamiento y sus propiedades. La durabilidad, la resistencia y la trabajabilidad son propiedades que pueden verse beneficiadas y/o afectadas según los porcentajes de humedad del agregado fino y del agregado grueso empleado en la elaboración de mezclas. Para la clasificación de los porcentajes de humedad se tomó como referencia los valores dados por el ingeniero Gerardo A. Rivera en su libro “Concreto Simple” [66], los cuales se muestran en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Rangos de porcentaje de humedad.

Porcentajes de humedad	
Tipo	Rango
Humedad baja	<4%
Humedad intermedia	4%-8%
Humedad alta	>15%

Adaptado de Gerardo A. Rivera [66].

Las propiedades de los agregados finos se resumieron y dispusieron en la Tabla 26 y en la Tabla 27; en las cuales se puede observar que la densidad aparente del agregado fino está en el rango dado como óptimo, y su humedad está clasificada como humedad intermedia. Por otra parte,

se puede observar que la densidad aparente del agregado grueso tiene una desviación de 1,8% del rango óptimo y su porcentaje de humedad lo clasifica como un agregado de humedad baja.

**Tabla 26.** *Resumen caracterización agregado fino.*

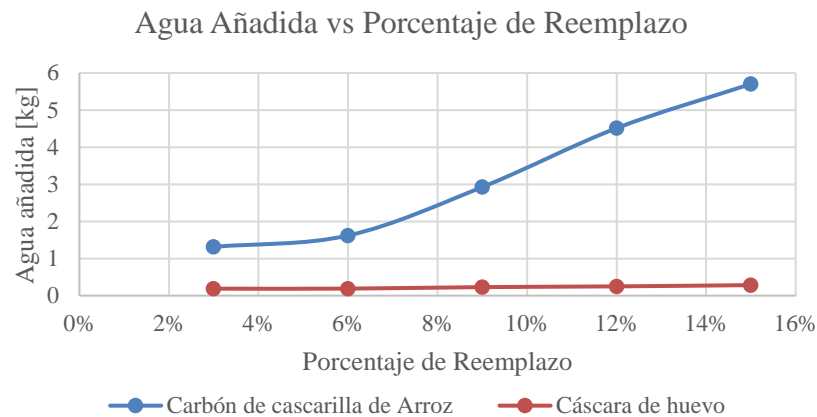
<b>Agregado Fino</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Observación</b>
Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	2671,27	En el rango óptimo
Densidad Bulk [kg/m <sup>3</sup> ]	1513,21	
% Absorción [%]	5,49	Absorción Intermedia

**Tabla 27.** *Resumen caracterización agregado grueso.*

<b>Agregado Grueso</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Observación</b>
Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	2259,31	Desviación de 1,8% del rango óptimo
Densidad Bulk [kg/m <sup>3</sup> ]	1587,95	
% Absorción [%]	0,79	Absorción baja

Con lo anterior, es importante afirmar que los agregados están en los rangos aceptables y no implican una alteración considerable a la mezcla ideal, principalmente por sus porcentajes de humedad y sus densidades aparentes.

Sin embargo, al momento de la realización de las probetas se notó una demanda de agua creciente a medida que los residuos agroindustriales se añadieron a las mezclas en sus diferentes porcentajes de reemplazo. Con los resultados mostrados en la Tabla 19 y en la Tabla 20, se realizó la comparación de la cantidad de agua exigida por cada reemplazo, mostrada en la Figura 42.

**Figura 42.** Agua añadida vs porcentaje de reemplazo

En la gráfica anterior se evidencia el aumento significativo en la cantidad de agua que requirió el carbón de cascarilla de arroz a medida que su porcentaje de reemplazó aumentó; el cuál es considerable para la correcta realización de la mezcla. Este aumento en la demanda de agua para el correcto mezclado se debe a la cantidad de materia orgánica que contiene la cascarilla de arroz, que aún carbonizada absorbe agua hasta el punto de elevar la relación agua/cemento hasta 1,26 como se puede observar en la Tabla 19.

Otro factor influyente en este aumento de agua es que, el carbón de cascarilla de arroz fue reemplazo del agregado fino, por lo cual, se requirió gran cantidad de material (volumétricamente hablando) para suplir la masa de arena a reemplazar.

Por otra parte, las probetas cuyo reemplazo se hizo por cáscara de huevo demandaron una menor cantidad de agua adicional a la calculada en el diseño de mezcla, elevando la relación agua/cemento a 0,74 como se muestra en la Tabla 20; esto debido al previo secado del residuo y al mínimo porcentaje de materia orgánica presente en su estructura [45].

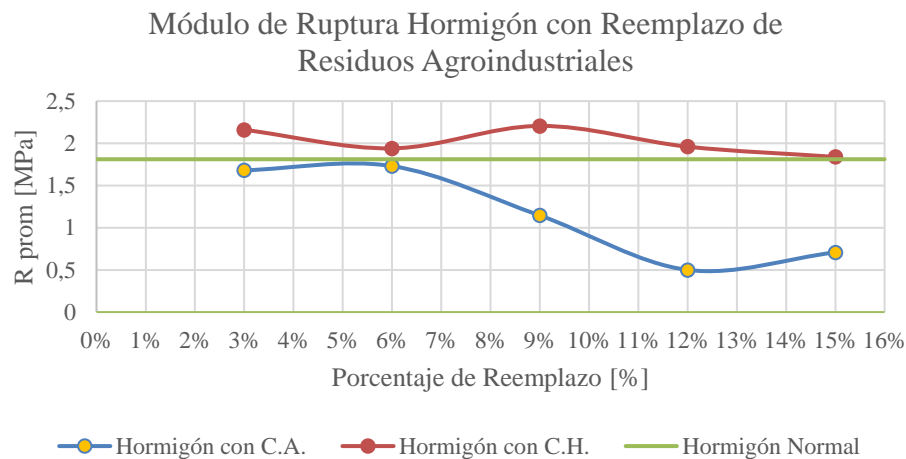
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y dispuestos en la Tabla 23 y en la Tabla 24, se realizó la comparación de los módulos de rotura de las probetas con diferentes porcentajes de

residuo de cascarilla de arroz y de cáscara de huevo; esto mostrado en la Tabla 28 y en la Figura 43.

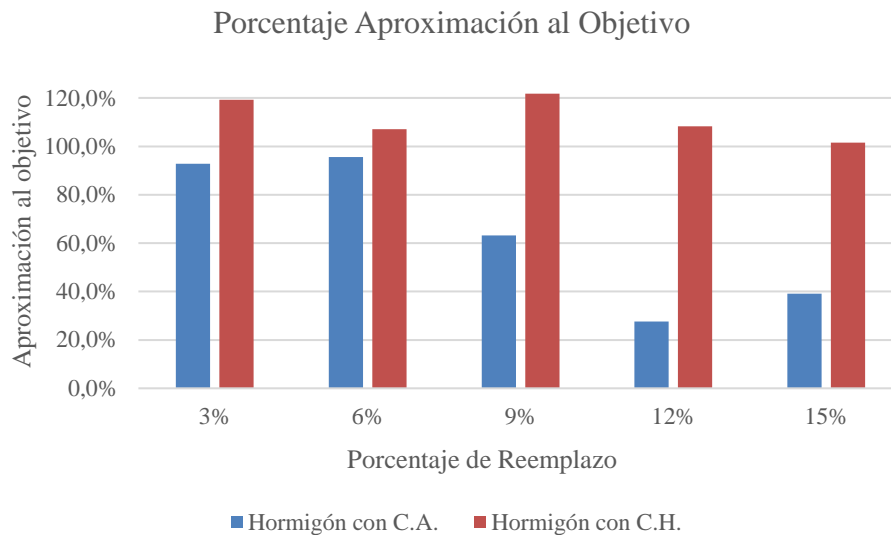
**Tabla 28.** Comparación módulos de rotura.

% Reemplazo	Módulo de Rotura	
	H. Cáscarilla Arroz [Mpa]	H. Cáscara de Huevo [Mpa]
3%	1,68	2,16
6%	1,73	1,94
9%	1,144879	2,206
12%	0,5	1,96
15%	0,707333	1,839

**Figura 43.** Comparación módulos de rotura



Así mismo, se obtuvo el porcentaje de aproximación de cada porcentaje de reemplazo al módulo de rotura objetivo (Ver Figura 43), dado por las probetas realizadas con hormigón sin alteraciones. Si bien, se puede aproximar el módulo de rotura del hormigón como el 10% de su resistencia a la compresión, las probetas realizadas con hormigón sin alteraciones, arrojaron como resultado promedio un módulo de rotura de 1,81 Mpa como lo muestran la Tabla 23 y la Tabla 24.

**Figura 44.** Aproximación al módulo de rotura objetivo.

Los resultados mostrados evidencian un incremento en los módulos de rotura obtenidos en las probetas realizadas con hormigón cuyo cemento fue reemplazado parcialmente por cáscara de huevo, teniendo en cuenta los antecedentes consultados se puede decir que estos resultados se deben a la similitud en composición química de ambos elementos ya que, la cáscara de huevo en aproximadamente un 95% está compuesta por calcio el cual también es uno de los principales componentes del cemento; esto sumado a la buena dosificación realizada, evidenciada en el estado de las vigas al momento del ensayo (Ver Figura 45).

La disminución en el módulo de rotura de las probetas cuyo agregado fino fue reemplazado por carbón de cascarilla de arroz se debe al reemplazo en masa realizado; teniendo en cuenta que las cantidades de masa de arena a reemplazar fueron considerables y la demanda de agua que requiere este agregado para obtener una mezcla manejable afectaron directamente el fraguado de las probetas. Lo anterior, evidenciado en “*hormigueros*” producidos por los restos de materia orgánica que no se eliminaron, aún con el proceso de carbonización de la cascarilla del arroz (Ver Figura 46)

**Figura 45.** *Probeta después de ensayo NTC 2871.*



**Figura 46.** *Hormiguero provocado por materia orgánica.*



## **6. Conclusiones**

Las normativas técnicas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) permitieron la caracterización de los agregados finos y gruesos, siendo esto de suma importancia para un correcto diseño y elaboración de las mezclas realizadas; las propiedades obtenidas de los agregados se ubican en los rangos aceptables y permisibles para su uso en la elaboración de hormigón. Los porcentajes de humedad y densidades aparentes de los agregados contribuyeron a que la resistencia y el fraguado del hormigón no se vieran afectados, principalmente en las probetas cuyos porcentajes de reemplazo fueron inferiores.

Para la elaboración de los especímenes se siguió rigurosamente la normativa técnica colombiana NTC-550, la cual indica los pasos necesarios para realizar debidamente las mezclas y, por lo tanto, obtener resultados confiables y verídicos. En este proceso se observó que en la realización de las probetas de hormigón sin alterar no se requirió agua adicional para su mezclado, confirmando la importancia de la correcta caracterización de los agregados. Los ensayos de flexión en los especímenes realizados con hormigón simple arrojaron un módulo de ruptura de 1.81Mpa.

También, en la realización de los especímenes cuyo agregado fino fue reemplazado de manera parcial por carbón de cascarilla de arroz, las mezclas requirieron grandes cantidades de agua adicional para alcanzar la fluidez adecuada, debido a la gran cantidad de materia orgánica presente en el material de reemplazo, aún después de pasar por un proceso de secado y carbonización. Debido a lo anterior, los módulos de ruptura se vieron afectados a medida que el porcentaje de reemplazo aumentó, teniendo su resistencia máxima en las probetas con reemplazo parcial del 6%, alcanzando 1.73Mpa como módulo de ruptura.

Los especímenes cuyo cemento fue reemplazado de manera parcial por cáscara de huevo, si bien requirieron agua adicional para alcanzar la fluidez adecuada, no fue en cantidades elevadas; esto debido a la poca cantidad de materia orgánica presente en la cáscara del huevo. El módulo de ruptura de dichos especímenes mostró mejoras en comparación a los especímenes con reemplazos parciales de carbón de cascarilla de arroz, ya que, la mayor resistencia registrada fue en las probetas con reemplazo parcial del 9%, alcanzando un módulo de ruptura de 2.21Mpa.

La comparación de los resultados obtenidos de las probetas realizadas con hormigón simple y las probetas realizadas con reemplazos parciales (Ver Figura 44), mostraron que las resistencias correspondientes a los especímenes con reemplazo parcial de arena por carbón de cascarilla de arroz están por debajo de la resistencia a la flexión del hormigón simple. Por lo tanto, no es recomendable realizar reemplazos parciales de agregado fino por carbón de cascarilla de arroz, teniendo en cuenta que la densidad de dicho residuo es muy baja y los reemplazos por masa (método recomendado) implican añadir un volumen elevado de cascarilla y, por ende, añadir agua en cantidades elevadas.

Sin embargo, las resistencias obtenidas con los especímenes con reemplazo parcial de cemento por cáscara de huevo están por encima de los resultados obtenidos con el hormigón sin

alterar. Estos resultados satisfactorios con la inclusión de la cáscara de huevo conllevan a que su consideración como parte del reemplazo cementante sea positiva en la búsqueda de la mitigación del impacto ambiental desde el sector de la construcción. Se recomienda que en trabajos futuros se realicen pruebas frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, torsión), para completar la caracterización del material y confirmar sus aplicaciones constructivas.

### Referencias

- [1] INVIAS, «INVE - 222,» Instituto Nacional de Vías, Bogotá, 2013.
- [2] L. Gutiérrez, El concreto y otros materiales para la construcción. Edición 2, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [3] K. Cury, Y. Aguas , A. Martínez , R. Olivero y L. Chams, «Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento,» *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, p. 1, 2017.
- [4] Universidad de los Andes, «Agronegocios e Industria de Alimentos,» Facultad de Administración, 18 Febrero 2016. [En línea]. Available: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2016/02/la-avicultura-en-colombia-parte-1/>. [Último acceso: 3 Abril 2023].
- [5] Real Academia Española (RAE), «DLE,» Asociación de academias de la lengua española, Octubre 2014. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/mezclar>. [Último acceso: 3 abril 2023].
- [6] Construpal Ingeniería, «Materiales de Cantera: ¿Qué son los agregados y los pétreos?,» Construpal Ingeniería, 25 julio 2020. [En línea]. Available: <https://construvaling.com/materiales-de-cantera-que-son-los-agregados-y-los-petres/>. [Último acceso: 3 abril 2023].
- [7] Ministerio de Medio Ambiente rural y marino, «Manual de Compostaje,» Paseo de la Infanta Isabel, I, Madrid, 2009.

- [8] Norma Técnica Colombiana, «Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio,» ICONTEC, Bogotá, 1994.
- [9] Leroy Merlin, «Leroy Merlin,» Leroy Merlin, 27 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://www.leroymerlin.es/ideas-y-consejos/bricopedia/encofrar-desencofrar.html#:~:text=Es%20la%20acci%C3%B3n%20mediante%20la,estos%20%C3%BAltimos%20los%20m%C3%A1s%20comunes..> [Último acceso: 10 abril 2023].
- [10] Concrelab: Medición Confiable, «Concrelab: Medición Confiable,» Concrelab: Medición Confiable, 22 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.concrelab.com/compresion-cilindros/#:~:text=Esp%C3%A9cimen%3A,hasta%20su%20edad%20de%20cumplimiento..> [Último acceso: 10 abril 2023].
- [11] R. A. Actis, «SegemAR,» 2009. [En línea]. Available: [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/2980/Escombreras\\_Raúl\\_Alberto\\_Actis.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/2980/Escombreras_Raúl_Alberto_Actis.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 10 abril 2023].
- [12] D. Idarraga Izasa, «Viabilidad técnica y financiera de la escombrera Guadalcanal del municipio de Pereira,» Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2014.
- [13] H. O. Benavides Ballesteros y G. E. León Aristizabal, «Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático,» IDEAM, 2007.

- [14] J. D. Moreno, «360 en concreto,» ARGOS, [En línea]. Available: [https://360enconcreto.com/blog/detalle/efectos-de-cementantes-suplementarios/#:~:text=En%20general%2C%20se%20denomina%20material,al uminosilicatos%20de%20calcio%20\(C%2DA%2DS%2DH\)..](https://360enconcreto.com/blog/detalle/efectos-de-cementantes-suplementarios/#:~:text=En%20general%2C%20se%20denomina%20material,al%20uminosilicatos%20de%20calcio%20(C%2DA%2DS%2DH)..) [Último acceso: 10 abril 2023].
- [15] Banco de la República de Colombia, «Banco de la República de Colombia,» Banco de la República de Colombia, [En línea]. Available: <https://www.banrep.gov.co/es/glosario/producto-interno-bruto-pib>. [Último acceso: 10 abril 2023].
- [16] S. Neus, «AIMPLAS,» Instituto Tecnológico del Plástico, [En línea]. Available: <https://www.aimplas.es/tipos-ensayos/propiedades-mecanicas-de-los-materiales-plasticos/ensayo-de-flexion/#:~:text=La%20resistencia%20a%20flexi%C3%B3n%20es,perpendicularmente%20a%20su%20eje%20longitudinal..> [Último acceso: 10 abril 2023].
- [17] Invest in Colombia, «Colombia CO,» Ministerior de comercio, industria y turismo, 2021. [En línea]. Available: <https://investincolombia.com.co/es/sectores/manufacturas/materiales-de-construccion>. [Último acceso: 18 Abril 2023].
- [18] DANE, «Estadísticas de Cemento Gris (ECG),» 31 Marzo 2023. [En línea]. Available: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento\\_gris/Bol\\_ECG\\_feb23.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/Bol_ECG_feb23.pdf). [Último acceso: 17 Abril 2023].

- [19] The European Cement Association, «CEMBUREAU,» 2017. [En línea]. Available: <https://cembureau.eu/about-our-industry/key-facts-figures/>.
- [20] CONPES, Consejo Nacional de Política Económica y Social, «Política Nacional de Edificaciones Sostenibles,» Bogotá, 2018.
- [21] Minambiente, «Minambiente.gov.co,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2681-minambiente-reglamenta-manejo-y-disposicion-de-residuos-de-construccion-y-escombros>.
- [22] FICEM, «FICEM,» 2022. [En línea]. Available: <https://ficem.org/revista-edicion-2022/>. [Último acceso: 17 Abril 2023].
- [23] P. Moreno , R. Fragozo, S. Vesga , M. González , L. Hernández , I. Gamboa y J. Delgado , «Tobacco waste ash: a promising supplementary cementitious material,» *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, pp. 499 - 504, 2018.
- [24] ONU, Organización de las Naciones Unidas, «Noticias ONU,» 7 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://news.un.org/es/story/2019/05/1455611>.
- [25] Y. Vargas y L. Pérez, «Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente,» *Facultad de Ciencias Básicas*, pp. 59 - 72, 2018.
- [26] A. Prada y C. Cortés, «La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: Una alternativa de aprovechamiento integral,» *Revista Orinoquia*, pp. 155-170, 2010.

- [27] J. Monteiro, «Manual de gerenciamento integrado de,» IBAM, Rio de Janeiro, 2001.
- [28] P. Pliya y D. Cree, «Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar,» *Construction and Building Materials*, pp. 1-9, 2015.
- [29] A. Meek, M. Elchalakani, C. Beckett y M. Dong, «Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: A study of mechanical properties, flexure and bond strength.,» *Construction and building materials*, 2021.
- [30] S. Chen, H. Wang y J. Zhou, «Investigating the properties of lightweight concrete containing high,» *Elsevier*, 2013.
- [31] R. Dachowski y P. Kostrzewa, «The Use of Waste Materials in the Construction Industry,» *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 754-758, 2016.
- [32] H. Chore y M. Joshi, «Strength characterization of concrete using industrial waste as cement,» *Nature Switzerland AG*, 2020.
- [33] Gutiérrez de López, El concreto y otros materiales para la construcción, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [34] J. Aguilar, A. Gamoos y R. Fanguero, Materials and residues, sustainable construction materials, Ginebra: Trans Tech Publishers, 2014.
- [35] CEMEX, «CEMEX,» CEMEX, [En línea]. Available: <https://www.cemex.com/es/productos-servicios/productos/cemento>. [Último acceso: 27 Abril 2021].

- [36] S. Saval, «Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro,» *Bioteología*, 2012.
- [37] R. Rodríguez, «Aportaciones al conocimiento del estado medioambiental de microsistemas de interés internacional situado en Castilla - La Mancha,» Universidad de Castilla, Castilla, 1999.
- [38] R. Guerrero y L. Valenzuela , «Agroindustria y medio ambiente,» *Ciencia, tecnología y sociedad*, vol. III, pp. 63 - 83, 2011.
- [39] B. Barragán, Y. Téllez y A. Laguna, «Utilización de residuos agroindustriales,» *Sistemas Ambientales*, pp. 44 - 50, 2008.
- [40] A. M. Sánchez , «Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos,» *Umbaga*, 2010.
- [41] E. Vargas, «El Valor Nutritivo de los subproductos en Costa Rica. Composición química, disponibilidad y uso.,» *Nutrición Animal Tropical*, 1995.
- [42] J. Vergara , «Estudio comparativo del rendimiento de furfural a partir de diferentes residuos agrícolas (Cascarilla de arroz, bagazo de caña, zuro de maíz),» Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [43] J. Vargas, P. Alvarado, J. Vega-Baudrit y M. Porras, «Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos,» *Revista Científica Facultad de Ciencias Químicas*, pp. 87-102, 2013.
- [44] A. Angladette, *El arroz*, Barcelona, España: Editorial Blume, 1969.

- [45] P. N. R. Burga Jacobi, «Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cáscara de huevo como insumo para la elaboración de pintura látex de color,» Universidad Nacional Mayor de San Marcos , Lima, 2018.
- [46] Gobierno Nacional de Colombia, «Estrategia Nacional de Economía Circular,» Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, 2019.
- [47] Ellen McArthur Foundation, «Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated Transition,» *Journal of Industrial Ecology*, 2014.
- [48] J. Park, N. Díaz Posada y S. Mejía Dugand, «Challenges in implementing the extended producer responsibility in an emerging economy: The end-of-life tire management in Colombia,» *Cleaner production*, pp. 754-762, 2018.
- [49] M. Burger, S. Stavropoulos, S. Ramkumar, J. Dufourmont y F. Van Oort, «The heterogeneous skill-base of circular economy employment,» *Research Policy*, vol. 48, n° 1, pp. 248-261, 2019.
- [50] J. Korhonen, A. Honkasalo y J. Seppala, «Estrategia Nacional de Economía Circular,» 2018.
- [51] M. C. Vallejo, M. Pérez Rincón y J. Martínez-Alier, «Metabolic Profile of the Colombian Economy from 1970 to 2007,» *Journal of industrial ecology*, vol. 15, n° 2, pp. 245-267, 2011.
- [52] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Estrategia Nacional de Economía Circular,» ANDI, Bogotá, 2017.

- [53] UNDP, «Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo,» Organización de las Naciones Unidas, 2016. [En línea]. Available: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>. [Último acceso: 15 Abril 2021].
- [54] Gobierno Nacional de Colombia, «Artículo 79,» de *Constitución Política de Colombia*, Bogotá, Gobierno Nacional de Colombia, 1998.
- [55] Gobierno Nacional de Colombia, «Artículo 80,» de *Constitución Política de Colombia*, Bogotá, Gobierno Nacional de Colombia, 1998.
- [56] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, «Título C,» de *NSR - 10*, Bogotá, ICONTEC, 2010.
- [57] ICONTEC, «NTC. 1377,» ICONTEC, Bogotá, 1994.
- [58] INVIAS, «INV E - 217,» Instituto Nacional de Vías, Bogotá, 2013.
- [59] INVIAS, «INVE - 223,» Instituto Nacional de Vías, Bogotá, 2013.
- [60] ICONTEC, «NTC 173,» ICONTEC, Bogotá, 2000.
- [61] ICONTEC, «NTC 2871,» ICONTEC, Bogotá, 2004.
- [62] S. M. Durán, «Metodología de la Investigación,» Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Bucaramanga, 2020.
- [63] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, «Población,» de *Metodología de la Investigación*, Iztapalapa, Mc Graw Hill, 2006, pp. 174 - 175.
- [64] ICONTEC, «NTC 550,» ICONTEC, Bogotá, 2000.
- [65] J. Sancho, «Análisis Multivariante,» Societat Catalana de Cirugia.

- [66] G. A. Rivera L, *Concreto Simple*, Popayán: Universidad del Cauca, 2000.
- [67] L. L. a. H. Miao, «A specification based approach to testing polymorphic attributes,» de *Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004*, Seattle, WA, USA., November 8-12.
- [68] R. Pillai, R. Gettu y M. Santhanam, «Uso de materiales cementicios suplementarios (SCM) en sistemas de concreto armado - - Beneficios y limitaciones,» *ALCONPAT*, pp. 147 - 164, 2020.
- [69] ICONTEC, «NTC. 673,» ICONTEC, Bogotá, 2010.
- [70] P. Mattey, R. Robayo , J. Díaz, S. Delvasto y J. Monzó, «Influencia del mezclado en dos etapas en la fabricación de ladrillos de mampostería con ceniza de cascarilla de arroz como agregado fino,» *Universitat Politecnica de Valencia*, 2014.
- [71] DNP, «Departamento Nacional de Planeación,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ods.gov.co/es/objetivos/>.

Apéndices

Apéndice A. Cuadro metodológico de objetivos y actividades

Objetivo	Actividad	Descripción	Autores
Determinar la densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de los agregados gruesos y finos empleados en la realización de la mezcla, con el fin de realizar un correcto diseño de muestra.	Preparación del espécimen de muestra para agregado Fino	Tomar aproximadamente 1 Kg de masa, se cubre con agua (de manera que quede sumergida) consiguiendo que su humedad sea de 6% o más y se mantiene en ese estado por 24 horas. Se decanta cuidadosamente el agua para evitar la pérdida de finos, se seca la superficie de la arena. Se realiza la prueba del cono para verificar la condición saturada y superficialmente seca.	Dennis Villamizar Lizeth Viviescas Laboratorista Docente
	Procedimiento Gravimétrico para agregado Fino	Llenado parcial del picnómetro con agua añadiendo 500 ± 10 g de agregado fino y se añade agua hasta un 90% de la capacidad del picnómetro. Eliminación de burbujas. Remoción del agregado fino y secado a 110 ± 5°C. Se toma la masa del agregado una hora y media después de sacada del horno. Se toma la masa del picnómetro con agua luego de haber removido el agregado.	
	Preparación del espécimen de muestra para agregado Grueso	Se debe pasar el material por el tamiz N° 4 y se debe eliminar aquel material que pase por dicho tamiz. Se selecciona la masa mínima de la muestra según el tamaño máximo nominal.	
	Ensayo de laboratorio	Se sumerge en agua durante un período de 24 ± 4 horas. Se determina la masa de la muestra en la condición saturada con superficie seca. Se determina la masa del agregado sumergido en agua. Se seca la muestra en horno a 110 ± 5 °C, deja reposar de 1 - 2 horas y se toma su masa.	
Estimar la resistencia a flexión de una mezcla de concreto alterada con inclusión de residuos agroindustriales.	Preparación de dos especímenes de dosificación central para ensayo a flexión	Diseño de dosificación 1:2:3 de concreto. Elaboración de los especímenes (Vigas). Desenfrado de especímenes. Curado de especímenes por 28 días.	Dennis Villamizar Lizeth Viviescas Laboratorista Docente
	Preparación de especímenes de dosificación variada con reemplazos parciales de cemento y arena, por cáscara de huevo y tamo de arroz respectivamente, para ensayo a flexión.	Diseño de dosificación de mezclas de concreto 1:2:3 con reemplazos parciales de cemento y arena, por cáscara de huevo y tamo de arroz respectivamente Eliminación de humedad del tamo de arroz por medio de secado en horno. Carbonización del tamo de arroz para la eliminación de materia orgánica. Trituración de la cáscara de huevo a un tamaño de partícula que pase por el tamiz No.200	
	Resistencia a la Flexión de los espécimenes de dosificación central y de dosificación alterada.	Elaboración de los especímenes (Vigas). Desenfrado de especímenes. Curado de especímenes por 28 días. Se toman las dimensiones de los especímenes antes de realizar el ensayo. Se coloca el espécimen sobre el marco de carga de manera horizontal y centrada. Se aplica carga en los tercios medios del espécimen con una carga entre el 3% y 6% de la carga última esperada. Verificar que no existan espacios mayores de 1 pulgada entre los especímenes y los bloques de aplicación de carga o los de soporte Se pule la superficie o se colocan cuñas de cuero sobre el espécimen para eliminar cualquier espacio mayor a 0,1 mm Se carga el espécimen continuamente y sin impact Se calcula el módulo de rotura para cada viga.	
	Comparación de resistencias entre las mezclas alteradas y la mezcla central	Se calcula el porcentaje de error en las resistencias, tomando como valor real la resistencia de la muestra central, y como valor experimental la resistencia de las muestras alteradas	
Comparar la resistencia a flexión de una mezcla de concreto alterada con inclusión de residuos agroindustriales con una mezcla de concreto en condiciones normales.			Dennis Villamizar Lizeth Viviescas Laboratorista Docente

**Apéndice B. Herramienta de recolección de datos: Ensayos de agregado finos – INV 222**



**Herramienta de Recolección de Datos  
Ensayos de Agregados - INV 222**

**Fecha:**

7	2	2022
---	---	------



**Agregados Finos**

Variable	Descripción	Peso (g)
A'	Masa seca al horno sin corregir (SH')	665
A	Masa seca al horno (SH)	474
B	Picnómetro con agua	1336
C	Picnómetro con agua y muestra	1633
S	Arena Superficialmente Seca (SSS)	500
	Picnómetro	316
	Muestra (Previa al cono)	1000
	Corrección medición, masa seca al horno, ya que se consideró la masa del recipiente	191

**Cálculos**

Estado	Densidad Relativa / Gravedad Específica (g/cm <sup>3</sup> )
SH	2,33
SSS	2,46
Aparente	2,68

Estado	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
SH	2329,14
SSS	2456,90
Aparente	2671,27

Absorción (%)	5,49%
---------------	-------

Ecuaciones					
ρ relativa SH	$\frac{A}{(B + S - C)}$ g/cm <sup>3</sup>		ρ SH	$\frac{997,5A}{(B + S - C)}$ kg/m <sup>3</sup>	
ρ relativa SSS	$\frac{S}{(B + S - C)}$ g/cm <sup>3</sup>		ρ SSS	$\frac{997,5S}{(B + S - C)}$ kg/m <sup>3</sup>	
ρ relativa Aparente	$\frac{A}{(B + A - C)}$ g/cm <sup>3</sup>		ρ Aparente	$\frac{997,5A}{(B + A - C)}$ kg/m <sup>3</sup>	
	% Absorción	$\frac{B - A}{A} \times 100$			

**Realizado por:**

Dennis Danilo Villamizar Suárez - Lizeth Tatiana Viviescas Silva  
Semillero INAES

NOTA: TODAS LAS VARIABLES DE LA MUESTRA DEBERÁN SER REGISTRADAS AL MOMENTO

TOMADO DE INV 222

Apéndice C. Herramienta de recolección de datos: Ensayos de agregados gruesos - INV 223



**Herramienta de Recolección de Datos**  
**Ensayos de Agregados - INV 223**

Fecha: 

8	2	2022
---	---	------



**Agregados Gruesos**

Variable	Descripción	Peso (g)
A	Masa al aire de la muestra seca al horno	3291
B	Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca	3317
C	Masa aparente de la muestra saturada en agua	1838
	Tara metálica	285

Siguiendo el procedimiento de la INV 223 se deben realizar los cálculos

**Cálculos**

Estado	Densidad Relativa / Gravedad Específica (g/cm <sup>3</sup> )
SH	2,225
SSS	2,243
Aparente	2,265

Estado	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
SH	2219,589
SSS	2237,125
Aparente	2259,307

Absorción (%)	0,790%
---------------	--------

Ecuaciones					
ρ relativa SH	$\frac{A}{(B - C)}$	g/cm <sup>3</sup>	ρ SH	$\frac{997,5A}{(B - C)}$	kg/m <sup>3</sup>
ρ relativa SSS	$\frac{B}{(B - C)}$	g/cm <sup>3</sup>	ρ SSS	$\frac{997,5B}{(B - C)}$	kg/m <sup>3</sup>
ρ relativa Aparente	$\frac{A}{(A - C)}$	g/cm <sup>3</sup>	ρ Aparente	$\frac{997,5A}{(A - C)}$	kg/m <sup>3</sup>
	% Absorción			$\frac{B - A}{A} \times 100$	

NOTA: TODAS LAS VARIABLES DE LA MUESTRA DEBERÁN SER REGISTRADAS AL MOMENTO

TOMADO DE INV 223

**Realizado por:**

Dennis Danilo Villamizar Suárez - Lizeth Tatiana Viviecas Silva  
Semillero INAES

## Apéndice D. Herramienta de recolección de datos: Ensayos de agregados – INV 217



## Herramienta de Recolección de Datos

## Ensayos de Agregados - INV 217

Fecha: 

9	2	2022
---	---	------



## Densidades Bulk

## AGREGADOS FINOS

Variable	Descripción	Valor
G	Masa del agregado más el recipiente de medida (kg)	5,866
T	Masa del recipiente de medida (kg)	1,666
V	Volumen del recipiente de medida (m <sup>3</sup> )	0,00278
S	Gravedad Específica SSS INV - 222 (kg/m <sup>3</sup> )	2456,89
A	Porcentaje de absorción INV - 222	5,49%

## Cálculos

Estado	Densidad Relativa / Gravedad Específica (g/cm <sup>3</sup> )
M	1513,213
M <sub>SSS</sub>	1514,043
%vacíos	99,938

## AGREGADOS GRUESOS

Variable	Descripción	Valor
G	Masa del agregado más el recipiente de medida (kg)	20,4
T	Masa del recipiente de medida (kg)	4,997
V	Volumen del recipiente de medida (m <sup>3</sup> )	0,0097
S	Gravedad Específica SSS INV - 223 (kg/m <sup>3</sup> )	2237,12
A	Porcentaje de absorción INV - 223	0,79%

## Cálculos

Estado	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
M	1581,827
M <sub>SSS</sub>	1581,952
%vacíos	99,929

## Ecuaciones

M (D. Bulk)	$\frac{G - T}{V}$ kg/m <sup>3</sup>	M <sub>SSS</sub> (Bulk en SSS)	$M * (1 + \frac{A}{100})$ kg/m <sup>3</sup>
	% Vacíos	$\frac{(S * \rho_w) - M}{S * \rho_w} * 100$	

Realizado por:

Dennis Danilo Villamizar Suárez - Lizeth Tatiana Viviescas Silva  
Semillero INAES

NOTA: TODAS LAS VARIABLES DE LA MUESTRA DEBERÁN SER REGISTRADAS AL MOMENTO

TOMADO DE INV 217

**Apéndice E. Herramienta de recolección de datos: Dosificación de vigas con reemplazo parcial de Tamo de Arroz por Arena**



**Herramienta de Recolección de Datos**  
**Dosificación Ensayos Flexión - Reemplazo Arena**  
**Fecha:** 27 / 9 / 2022



Densidad bulk gruesos	1581,95	kg/m <sup>3</sup>	TENIENDO EN CUENTA LOS VACÍOS
Densidad bulk finos	1514,04		
Densidad bulk cemento	1200		

RELACIÓN		
Cemento	Finos	Gruesos
1	2	3

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO BLANCO

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Arroz	C. Huevo	Agua
Kg	4,332	11,022	17,259	-	-	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	-	-	0,0026

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 1 (3%C. ARROZ)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Arroz	Agua
Kg	4,332	10,802	17,259	0,220	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,0002	0,002599

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 2 (6%C. ARROZ)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Arroz	Agua
Kg	4,332	10,361	17,259	0,661	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,0004	0,003

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 3 (9%C. ARROZ)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Arroz	Agua
Kg	4,332	10,030	17,259	0,992	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,001	0,003

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 4 (12%C. ARROZ)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Arroz	Agua
Kg	4,332	9,700	17,259	1,323	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,001	0,003

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 5 (15%C. ARROZ)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Arroz	Agua
Kg	4,332	9,369	17,259	1,653	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,001	0,003

Relación Agua/Cemento = 0,6

**Realizado por:**

Dennis Danilo Villamizar Suárez - Lizeth Tatiana Viviescas Silva  
 Semillero INAES

**Apéndice F. Herramienta de recolección de datos: Dosificación de vigas con reemplazo parcial de Cáscara de Huevo por Cemento**



**Herramienta de Recolección de Datos  
Dosificación Ensayos Flexión - Reemplazo Cemento**

Fecha: 

27	9	2022
----	---	------



Densidad bulk gruesos	1581,95	kg/m <sup>3</sup>	TENIENDO EN CUENTA LOS VACÍOS
Densidad bulk finos	1514,04		
Densidad bulk cemento	1200		

RELACIÓN		
Cemento	Finos	Gruesos
1	2	3

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO BLANCO

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Arroz	C. Huevo	Agua
Kg	4,332	11,022	17,259	-	-	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	-	-	0,0026

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 1 (3%C. HUEVO)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Huevo	Agua
Kg	4,202	11,022	17,259	0,130	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,0001	0,003

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 2 (6%C. HUEVO)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Huevo	Agua
Kg	4,072	11,022	17,259	0,260	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,0002	0,003

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 3 (9%C. HUEVO)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Huevo	Agua
Kg	3,942	11,022	17,259	0,390	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,0003	0,003

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 4 (12%C. HUEVO)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Huevo	Agua
Kg	3,812	11,022	17,259	0,520	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,0003	0,003

CANTIDAD DE MATERIAL POR CADA PROBETA TIPO 5 (15%C. HUEVO)

	Cemento	A. Fino	A. Grueso	C. Huevo	Agua
Kg	3,682	11,022	17,259	0,650	2,599
m <sup>3</sup>	0,004	0,007	0,011	0,001	0,003

Relación Agua/Cemento = 0,6

Realizado por:

Dennis Danilo Villamizar Suárez - Lizeth Tatiana Viviescas Silva  
Semillero INAES

**Apéndice G. Herramienta de recolección de datos: Ensayos a flexión para especímenes con adición de Tamo de arroz NTC - 2871**



**Herramienta de Recolección de Datos**

**Ensayos a flexión - NTC 2871**

**Reemplazo Tamo de Arroz por Arena**

Fecha: 

9	3	2023
---	---	------



Muestra	Especímen	P (N)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	R (MPa)
Blanco	1	13609	450	150	150	1,81
Blanco	2	13560	450	150	150	1,81
R prom						1,81127

3%	1	13650	450	150	150	1,82
3%	2	11480	450	150	150	1,53
R prom						1,68

6%	1	14293	450	149	150	1,92
6%	2	11270	450	146	150	1,54
R prom						1,73

9%	1	8223	450	149	150	1,10376
9%	2	8895	450	150	150	1,186
R prom						1,14488

12%	1	3044	450	148	150	0,41
12%	2	4265	450	145	150	0,59
R prom						0,50

15%	1	5810	450	150	150	0,77467
15%	2	4800	450	150	150	0,64
R prom						0,70733

Variables	
P	Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, N
L	Distancia entre apoyos, mm
b	Ancho promedio de la probeta en la fractura, mm
d	Altura promedio del espécimen en el lugar de la fractura, mm
R	Módulo de rotura, MPa

**Realiza do por:**

Dennis Danilo Villamizar Suárez - Lizeth Tatiana Viviescas Silva

Semillero INAES

SE REGISTRAN DOS VALORES POR VARIABLE, CON UN "R" PROM

TOMADO DE NTC  
2871

**Apéndice H. Herramienta de recolección de datos: Ensayos a flexión para especímenes con adición de Cáscara de huevo NTC - 2871**



**Herramienta de Recolección de Datos**  
**Ensayos a flexión - NTC 2871**  
**Reemplazo Cáscara de huevo por Cemento**

Fecha: 

22	4	2023
----	---	------



Muestra	Especímen	P (N)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	R (MPa)
Blanco	1	13609	450	150	150	1,81
Blanco	2	13560	450	150	150	1,81
R prom						1,81127

3%	1	16096	450	150	150	2,14613
3%	2	16264	450	150	150	2,17
R prom						2,16

6%	1	13813	450	150	150	1,84
6%	2	15267	450	150	150	2,04
R prom						1,94

9%	1	17573	450	150	150	2,34307
9%	2	15519	450	150	150	2,0692
R prom						2,20613

12%	1	14431	450	150	150	1,92
12%	2	14959	450	150	150	1,99
R prom						1,96

15%	1	14385	450	150	150	1,918
15%	2	13212	450	150	150	1,7616
R prom						1,8398

Variables	
P	Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, N
L	Distancia entre apoyos, mm
b	Ancho promedio de la probeta en la fractura, mm
d	Altura promedio del espécimen en el lugar de la fractura, mm
R	Módulo de rotura, MPa

**Realizado por:**

Dennis Danilo Villamizar Suárez - Lizeth Tatiana Viviescas Silva  
 Semillero INAES

SE REGISTRAN DOS VALORES POR VARIABLE, CON UN "R" PROI

TOMADO DE NTC  
2871