



Institución Universitaria

**Aprovechamiento sostenible de  
residuos de la industria  
metalmecánica en el sector de la  
construcción. Caso de estudio:  
calamina procedente de la trefilación  
en seco del acero**

**Diana Claudia Muñoz Muñoz**

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas  
Medellín, Colombia  
2023



# **Aprovechamiento sostenible de residuos de la industria metalmecánica en el sector de la construcción. Caso de estudio: calamina procedente de la trefilación en seco del acero**

**Diana Claudia Muñoz Muñoz**

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Desarrollo Sostenible**

Director: M. Eng. Carlos Roberto Arango Gutiérrez

Codirector: Ph.D. Manuel Romero Sáez

Línea de Investigación:

Biomateriales, Ecodiseño y Construcción Sostenible

Grupo de Investigación:

Grupo de Calidad, Metrología y Producción - Semillero en Manufactura Sostenible.

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas

Medellín, Colombia

2023



# DEDICATORIA

*A mi hija, que siempre estuvo a mi lado alentándome a continuar. Por ser mi motivación para superarme cada día más. Por su tolerancia, y por compartir parte de su tiempo para que "mamá estudiara" y pudiera lograr este sueño*



# AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi director, MEng. Carlos Roberto Arango Gutiérrez, por compartir sus conocimientos, por sus aportes y en especial su compromiso y apoyo incondicional para desarrollar esta investigación. Por motivarme siempre a seguir y a terminar este proyecto de vida.

A mi codirector, Dr. Manuel Romero Sáez, y al Dr. Mauricio Vásquez Rendón, por sus aportes, por su apoyo y compromiso constante.

Al profesor José Luis González Manosalva, jefe del Departamento de Ciencias Ambientales y de la Construcción, por su apoyo siempre incondicional, por su colaboración y en especial por todos los aportes teóricos, prácticos y técnicos brindados para el desarrollo de esta investigación.

A Lina Marcela Acevedo, Daniela Gutiérrez y Karen Valencia, las laboratoristas del Laboratorio de Construcción, Alejandra Munera del Laboratorio de Metrología del ITM, por su apoyo; por siempre estar ahí alentándome y acompañándome, por su ayuda y los conocimientos que compartieron conmigo.

A la empresa Postelectras Dishierros S.A.S., y en especial al Gerente, Jorge Andrés Giraldo Sánchez, por su apoyo para proporcionar los materiales empleados durante la investigación.

Y un especial agradecimiento al gerente de la empresa Herrajes Gaher S.A.S., Humberto Gómez Gómez, por el apoyo económico y moral durante toda la maestría. Gracias por estar siempre a nuestro lado para no dejarnos desfallecer.





## RESUMEN

Tanto el desarrollo de la industria como el aumento de la población han provocado un crecimiento de las ciudades, y como consecuencia, una demanda mayor de materiales de construcción y también una mayor generación de materiales de desecho; como resultado de ello se presentan impactos económicos, sociales, ambientales y la reducción de recursos no renovables. Estos problemas podrían solucionarse al considerar el uso de diferentes residuos industriales como sustitutos de agregados en el sector de la construcción, lo que ayudaría a minimizar el problema de la disposición de los residuos y, al mismo tiempo, promover la elaboración de materiales de construcción más sostenibles.

Este trabajo investigó la incorporación de un residuo llamado “calamina” proveniente del proceso de laminación o trefilación en frío de la industria del hierro y del acero. Se empleó este material como reemplazo de arena en materiales de construcción como el mortero, las baldosas, el concreto y los bloques de tierra compactada (BTC). Se utilizaron diferentes porcentajes de reemplazo de arena por calamina en cada uno de los materiales y se validó la influencia de su incorporación de acuerdo con las normas existentes.

Como resultados, se obtuvo un aumento de la resistencia a la compresión para cilindros de concreto para porcentajes del 50% y 70% de reemplazo de arena por calamina, un aumento en la resistencia a la flexión para las baldosas con un reemplazo del 50%, y un incremento en la resistencia a la compresión en los BTC con el reemplazo de un 60% de la arena. Para los morteros y baldosas se obtuvo una disminución en el consumo de agua en las mezclas de 50% y 70% de reemplazo, lo mismo que para la mezcla de 50% de inclusión de calamina en los BTC (como un reemplazo total de la arena). Se encontró adicionalmente que la densidad de los especímenes aumentó a medida que se incrementa el reemplazo de arena en cada uno de los materiales analizados.

El reemplazo de arena por este residuo contribuye a minimizar impactos ambientales, económicos y sociales presentados por la explotación masiva de los agregados pétreos y la disposición de residuos.

**Palabras clave:** Valorización de residuos; Calamina de acero, Escamas de acero, Construcción sostenible; Concreto sostenible; Residuos de la industria metalmeccánica.

## ABSTRACT

*The development of industry and population increase has resulted in the growth of cities and, therefore, a greater demand for construction materials and generation of waste materials; as a result, there are economic, social, and environmental impacts and a reduction of non-renewable resources. These problems could be solved by considering the use of different industrial wastes as substitutes for aggregates in the construction sector, which would help minimize the problem of waste disposal and, at the same time, promote the development of more sustainable construction materials.*

*This work investigated the incorporation of a residue called "calamine" obtained from the cold rolling or drawing process of the iron and steel industry. This material was used as a replacement for sand in construction materials such as mortar, tiles, concrete, and compacted earth blocks (CEB). Different percentages of calamine were used as a replacement for sand in each of the materials and mixes, and the influence of its incorporation was validated according to existing standards.*

*As a result, an increase in compressive strength was obtained for concrete cylinders with 50% and 70% replacement of sand by calamine, an increase in flexural strength for tiles with 50% replacement, and an increase in compressive strength in CEBs with 60% replacement. For mortars and tiles, a decrease in water consumption was obtained for the 50% and 70% replacement mixes, as well as for the 50% calamine inclusion mix in the CEBs (as a total replacement for the sand). It was also found that the density of the specimens raised with increasing sand replacement in each of the materials analyzed.*

*The replacement of sand with this waste contributes to the minimization of environmental, economic, and social impacts caused by the massive exploitation of stone aggregates and the disposal of waste.*

**Keywords:** *Waste valorization; Steel calamine, Steel flakes, Sustainable construction; Sustainable concrete; Metal-mechanical industry waste.*

---

# CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1 VALORACIÓN DE LOS RESIDUOS METALMECÁNICOS PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1 CONSUMO DE LOS RECURSOS NATURALES EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.....	8
1.2 RESIDUOS EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y DEL ACERO .....	9
1.3 APLICACIONES DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	12
1.3.1 Aspectos Ambientales.....	13
1.3.2 Aspectos Económicos.....	15
1.3.3 Aspectos Sociales.....	17
1.4 OTROS MATERIALES SUSTITUTOS PARA EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.....	17
<b>2 RESIDUO METALMECÁNICO DEL CASO DE ESTUDIO.....</b>	<b>20</b>
2.1 ORIGEN Y DISPOSICIÓN DEL RESIDUO METALMECÁNICO DEL CASO .....	20
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO METALMECÁNICO DEL CASO DE ESTUDIO .....	22
2.2.1 Morfología.....	23
2.2.2 Densidad.....	24
2.2.3 Granulometría .....	28
2.2.4 Ensayo de fluorescencia .....	33
2.2.5 Difracción de Rayos X - DRXs .....	34
2.2.6 Caracterización de Peligrosidad del Residuo .....	37
<b>3 ALTERNATIVAS DE USO DEL RESIDUO METALMECÁNICO DEL CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>41</b>
3.1 APLICACIÓN EN CONCRETOS .....	42
3.1.1 Dosificaciones para la producción de concretos.....	42
3.1.2 Ensayos y resultados .....	45
3.2 APLICACIÓN EN MORTEROS Y BALDOSAS.....	48
3.2.1 Dosificaciones en morteros .....	49
3.2.2 Ensayos en cubos de mortero.....	51
3.2.3 Ensayos en vigas.....	63
3.2.4 Fabricación de baldosas .....	67
3.2.5 Ensayos y resultados para baldosas.....	69
3.3 APLICACIÓN EN BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA.....	72
3.3.1 Dosificaciones para Mezcla de BTC.....	74

---

3.3.2	Ensayos y resultados .....	77
<b>4</b>	<b>EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS .....</b>	<b>87</b>
4.1	ASPECTOS AMBIENTALES .....	88
4.2	ASPECTOS ECONÓMICOS .....	89
4.3	ASPECTOS SOCIALES .....	90
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>93</b>
5.1	CONCLUSIONES.....	93
5.2	RECOMENDACIONES .....	94
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>96</b>

---

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Residuos usados en la industria de la construcción como material de reemplazo de los agregados .....	18
Tabla 2. Densidad aparente de la calamina y la arena de Ottawa .....	25
Tabla 3. Densidad aparente de la calamina y la arena de concreto.....	27
Tabla 4. Sistema de clasificación de suelos determinada por la USCS .....	30
Tabla 5. Análisis granulométrico NTC 174 (2000) para los agregados .....	31
Tabla 6. Análisis granulométrico NTC 4205 (2000) para la arena de sello .....	31
Tabla 7. Porcentajes de retenido por tamaño en los tamizajes efectuados .....	32
Tabla 8. Análisis granulometría .....	33
Tabla 9. Resultado del análisis FRX a la calamina.....	34
Tabla 10. Resultado del análisis DRX a la calamina .....	36
Tabla 11. Fases que constituyen el patrón de difracción .....	37
Tabla 12. Resultados de caracterización física y química .....	38
Tabla 13. Resultados de la caracterización de reactividad al agua.....	38
Tabla 14. Resultados de la caracterización de toxicidad (prueba TCLP30) .....	39
Tabla 15. Resultado de caracterización de toxicidad en el lixiviado para Plata .....	39
Tabla 16. Resultados de la prueba de Ecotoxicidad – <i>Daphnia Pulex</i> .....	39
Tabla 17. Resultados de la prueba de Ecotoxicidad – <i>Chlorella vulgaris</i> .....	39
Tabla 18. Análisis de Blanco de campo.....	40
Tabla 19. Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto .....	43
Tabla 20. Diseño de mezclas para morteros .....	49
Tabla 21. Diseño de mezclas para vigas de morteros. ....	63
Tabla 22. Dosificaciones para la fabricación de las baldosas .....	68
Tabla 23. Mezclas de materiales analizadas en los BTC.....	74
Tabla 24. Dosificaciones de la mezcla con calamina.....	75

## LISTA DE IMÁGENES

	<b>Pág.</b>
Imagen 1. Alambre que ingresa al proceso de trefilación .....	21
Imagen 2. Decalaminador .....	21
Imagen 3. Tren laminador en frío .....	22
Imagen 4. Calamina recuperada del proceso de trefilación .....	23
Imagen 5. Imágenes de la forma de la calamina .....	24
Imagen 6. Procedimiento para obtener densidad aparente de la calamina.....	26
Imagen 7. Procedimiento para obtener densidad relativa absoluta .....	28
Imagen 8. Ensayo de granulometría para la calamina.....	30
Imagen 9. Homogenización de la calamina para los ensayos en concretos .....	41
Imagen 10. Fabricación y curado de cilindros de concreto .....	43
Imagen 11. Cilindros de concreto sin reemplazo de arena por calamina (0%) .....	44
Imagen 12. Cilindros de concreto con reemplazo de arena por calamina.....	45
Imagen 13. Ensayo de resistencia a la compresión en cilindros.....	47
Imagen 14. Molde de muestra con reemplazo de 30% de arena por calamina.....	51
Imagen 15. Moldes con reemplazo del 0% al 70% de arena por calamina.....	52
Imagen 16. Curado de cubos .....	52
Imagen 17. Cubos sometidos a condiciones ambientales .....	52
Imagen 18. Estado de cubos luego de 368 días a la intemperie.....	53
Imagen 19. Ensayo de resistencia a la compresión en cubos .....	54
Imagen 20. Cámara de ambiente controlado caso de 20 °C y 90% de humedad .....	57
Imagen 21. Cubos retirados de la cámara a 20 °C y 90% de humedad.....	57
Imagen 22. Cámara de ambiente controlado caso de 35 °C y 60% humedad .....	59
Imagen 23. Cubos retirados de la cámara a 35 °C y 60% humedad.....	59
Imagen 24. Fracturas observadas en las muestras. ....	61
Imagen 25. Fracturas observadas en los cubos fallados a 14 días .....	62
Imagen 26. Producción de vigas de mortero con y sin reemplazo de arena.....	64
Imagen 27. Curado y preparación del ensayo a flexión en vigas.....	64
Imagen 28. Ensayo de resistencia a la flexión en vigas.....	65
Imagen 29. Fracturas observadas en las muestras según contenido de Calamina .....	67

---

Imagen 30.	Fabricación y vaciado de las baldosas .....	68
Imagen 31.	Curado de las baldosas .....	69
Imagen 32.	Fracturas del ensayo de flexión .....	70
Imagen 33.	CINVA-RAM del Laboratorio de Construcción del ITM .....	76
Imagen 34.	Bloques macizos de tierra compactada obtenidos para el análisis .....	76
Imagen 35.	Curado de los BTC en el laboratorio de construcción .....	77
Imagen 36.	Ensayo de Proctor Estándar para la mezcla .....	78
Imagen 37.	Ensayo de abrasión según norma NTC 5324 .....	81
Imagen 38.	Ensayo de capilaridad según norma NTC 5324.....	83
Imagen 39.	Probetas para el ensayo de Resistencia a la Compresión Seca .....	85
Imagen 40.	Probeta fallada luego de la aplicación de la carga.....	85

---

---

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Principio del proceso de trefilación .....	20
Gráfica 2. Superposición de curvas las granulométricas de los tamizajes.....	32
Gráfica 3. Resultados DRX de la calamina .....	35
Gráfica 4. Imagen obtenida del análisis DRX realizado.....	37
Gráfica 5. Densidad de cilindros según el reemplazo de arena por calamina .....	46
Gráfica 6. Resistencia del concreto según el reemplazo de arena por calamina a los 28 días de curado.....	47
Gráfica 7. Agua empleada en la mezcla para cada dosificación de morteros.....	50
Gráfica 8. Densidad de cubos en función del porcentaje de calamina .....	53
Gráfica 9. Resistencia respecto al contenido de calamina y tiempo de curado .....	55
Gráfica 10. Resistencia respecto al porcentaje de calamina, a 20 °C y en condiciones húmedas .....	58
Gráfica 11. Resistencia respecto al porcentaje de calamina, a 35 °C y en condiciones húmedas .....	60
Gráfica 12. Densidad de las vigas con respecto al porcentaje de calamina .....	65
Gráfica 13. Resistencia a la flexión con respeto al contenido de calamina .....	66
Gráfica 14. Densidad de baldosas respecto al reemplazo de calamina .....	69
Gráfica 15. Resistencia a la flexión en baldosas respecto al reemplazo de calamina ..	71
Gráfica 16. Porcentaje de absorción respecto al reemplazo de calamina .....	72
Gráfica 17. Ensayo Proctor Estándar para mezcla con 10% de calamina.....	78
Gráfica 18. Ensayo Proctor Estándar para mezcla con 30% de calamina.....	79
Gráfica 19. Ensayo Proctor Estándar para mezcla con 50% de calamina.....	79
Gráfica 20. Densidad del BTC respecto a la inclusión de calamina .....	80
Gráfica 21. Coeficiente de Abrasión (Ca) respecto a la inclusión de calamina.....	82
Gráfica 22. Coeficiente de Capilaridad (Cb) respecto a la inclusión de calamina.....	84
Gráfica 23. Resistencia a la compresión del BTC respecto a la inclusión de calamina	86

---



# SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ANDI	Asociación Nacional de Industriales
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
BTC	Bloques de tierra compactada
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DRX	Difracción de rayos X
FRX	Fluorescencia de rayos x
MPa	Megapascales
NTC	Norma Técnica Colombiana
ONU	Organización de las Naciones Unidas
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (Microscopía electrónica de barrido)
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
$\delta$	Densidad	$\frac{g}{cm^3}$



# INTRODUCCIÓN

Colombia es el cuarto productor de acero de Latinoamérica, después de Brasil, Argentina y México, y cuenta con una industria siderúrgica establecida desde 1938, con una capacidad instalada de 2,2 millones de toneladas (ANDI, 2018). La producción de acero la realizan actualmente cinco siderúrgicas que representan el 100% de la producción de aceros largos en el país (Acerías Paz del Río, Gerdau-Diaco, GSR, Sidoc y Ternium), y está destinada principalmente a abastecer la mayor parte del mercado nacional en el sector de la construcción e infraestructura (ANDI, 2018).

La generación de excedentes o desechos en el sector de la industria metalmeccánica es considerada un problema ambiental en la actualidad; la Asociación Mundial del Acero estimó que para el año 2017 la producción del acero fue de 1.662 millones de toneladas, con aproximadamente 700 millones de toneladas de residuos (lo que equivale a un 42% de lo producido), y se estima que los residuos especiales o peligrosos tienen un promedio del 15% al 20% (World Steel Association, 2018). Para este mismo año, la producción de acero en Colombia estuvo cercana a los 1,2 millones toneladas, lo que llevó a que los residuos generados fueran aproximadamente de 504 mil toneladas (ANDI, 2018), entre los cuales se incluyen chatarra, arena y escoria procedentes del proceso de fundición, virutas y limallas que provienen del mecanizado, y calamina, considerada un residuo especial o peligroso en la Legislación Ambiental Colombiana (Ministerio de Medio Ambiente, 2005).

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) “*Sand, rarer than one thinks*”, en el mundo se consumen 53 mil millones de toneladas de arena y grava al año (United Nations Environment Program UNEP, 2014). Se estima que sólo para una casa de tamaño medio se necesitan unas 200 toneladas de arena y 30.000 toneladas para 1 km de autopista (Barbieri, 2017).

En esta investigación se trabajó con un residuo de la industria metalmeccánica llamado calamina, cascarilla o escama, proveniente de varios procesos como temple, trefilación<sup>1</sup> y laminación del acero. Se estima que se generan de 20 a 30 kilogramos de calamina por cada tonelada de acero procesada (Esguerra, A; Barona, 2010), y que normalmente está

---

<sup>1</sup> Trefilación es el proceso por el cual se reduce de diámetro a un alambre mediante hileras, mandriles o trefilas de carburo de tungsteno (Jensen, 2000).

constituida por óxido férrico o ferroso, aceites y lubricantes. Cuando el residuo contiene estos dos últimos componentes es considerada como residuo peligroso en Colombia mediante Decreto 4741 - Residuo 10-02-10 (Ministerio de Medio Ambiente, 2005).

El residuo de calamina para el estudio fue suministrado por la empresa Posteletras Dishierros S.A.S. Esta empresa se encuentra ubicada en el municipio de Copacabana, en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y es considerada una pequeña empresa por tener menos de 50 empleados (Congreso de la República, 2005); se dedica a la fabricación de postes de concreto para el alumbrado público y a la trefilación del acero, proceso que genera aproximadamente 16 toneladas mensuales del residuo. Esta situación genera dificultades en su almacenamiento y disposición final para la empresa, así como problemas con las autoridades ambientales respectivas.

En la actualidad, el residuo es mezclado con el concreto sobrante de los cilindros de prueba, o de los postes rechazados por calidad, para su disposición final en escombrera. Sólo en algunas ocasiones es almacenado en las instalaciones hasta ser entregado a una empresa de soldadura que lo usa para fabricación de electrodos. El impacto ambiental identificado para el residuo en estas condiciones es que puede llevar a contaminación de suelo, agua o aire (por ser tan pequeño y volátil) y que ocasiona esporádicamente contaminación visual o generación de derrames de calamina.

Diferentes investigaciones se han realizado orientadas a incluir la calamina en procesos pertenecientes al sector de la construcción, como "*Steel scale waste as component in mortars production: an experimental study*" (Furlani & Maschio, 2016), en donde agregaban este residuo durante tratamientos térmicos del acero, en reemplazo de la arena (del 5% al 40%), obteniendo efectos positivos en los esfuerzos a compresión y se lograba una variación del 1,5 al 2% en la absorción de agua. En otro estudio, denominado "*Recycling of scale and steel chips waste as a partial replacement of sand in concrete*" (Alwaeli & Nadziakiewicz, 2012), se usa este residuo en combinación con la viruta para el reemplazo de la arena (desde el 25% hasta el 100%) y como resultado encuentran la disminución del esfuerzo de compresión del concreto con valores de reemplazo en porcentajes superiores al 25%. La adición de estos elementos en el concreto permitió en este estudio que éste adquiriera la propiedad de absorción de radiación gama (Alwaeli & Nadziakiewicz, 2012).

---

En Colombia también se han llevado a cabo investigaciones, como trabajos de grado, con bajos reemplazos de arena por calamina. Se mencionan al menos morteros estructurales con reemplazos entre el 4% y 5% con una calamina procedente del tratamiento térmico de temple (Ordoñez & Villanueva, 2012) o baldosas de mortero en los cuales se recomiendan reemplazos del 3%, con una calamina proveniente del proceso de trefilación para la construcción de mallas, aunque se trata de una calamina contaminada con aceites lubricantes (Arciniegas & Muñoz, 2017).

En la presente investigación se busca usar la calamina procedente de la empresa Postelectras Dishierros S.A.S., como un reemplazo de algún agregado o materia prima en el sector de la construcción, evaluando antes su composición, peligrosidad, propiedades físicas y químicas, para así determinar la cantidad de residuo que se puede emplear como sustitución en los diferentes procesos de fabricación del mortero, el concreto, las baldosas y los bloques de tierra compactada (BTC), para luego determinar la afectación a las propiedades de estos materiales con dicha adición, su calidad y las posibles ventajas o desventajas de los productos obtenidos.

De acuerdo con lo anterior se plantea como hipótesis:

*La incorporación de la calamina a diferentes mezclas de materiales no afecta los parámetros de calidad y la resistencia mínima a la compresión para su uso, y es una alternativa sostenible para la disminución de insumos requeridos en el sector de la construcción y la reducción de residuos de la industria metalmecánica que van al vertedero*

Y cómo pregunta de investigación

*¿Es viable la integración de residuos provenientes de la industria metalmecánica, como la calamina, en el sector de la construcción?*

Con base en todo lo anterior, el objetivo general de la presente investigación es el siguiente:

*Evaluar el grado de incorporación de calamina en materiales del sector de la construcción, proponiendo diferentes mezclas con criterios sostenibles que permitan aplicaciones comerciales.*

---

Para lograr este objetivo general, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- *Caracterizar la calamina de acuerdo con su composición, granulometría y sus propiedades físico-mecánicas para determinar su potencial como materia prima en la industria de la construcción.*
- *Desarrollar tres tipos de materiales de construcción con reemplazo de sus insumos no renovables con diferentes proporciones de calamina, para la obtención de las condiciones óptimas de sustitución y sin afectar las propiedades de los materiales dictaminadas por la norma.*
- *Analizar los impactos desde la perspectiva del desarrollo sostenible de los productos de construcción obtenidos con reemplazo de calamina como opción para la reutilización de este residuo.*

El análisis de incorporación de este material sirve para abordar las dos visiones o problemas planteados: la sustitución de arena y la valorización de un residuo. Esta investigación, por lo tanto, se establece en el marco de la Política Nacional de Edificaciones Sostenibles, (DNP, 2018), en la cual se dan lineamientos de sostenibilidad en el sector de las edificaciones a nivel nacional y en entidades territoriales y se recomienda el uso eficiente de materiales y residuos.

Se toman en cuenta adicionalmente los objetivos del Desarrollo Sostenible números 9 (industria, innovación e infraestructura) y 12 (producción y consumo responsable), desde la perspectiva de reconvertir las industrias para que sean más sostenibles, realicen una gestión eficiente de los recursos naturales y reduzcan la generación de desechos mediante la prevención, reducción, reciclado y reutilización (ONU, 2015), y de esta forma contribuyan a la búsqueda de soluciones que lleven al logro de este objetivo.

La presente investigación está dividida en cinco capítulos, así:

- En el primer capítulo se realiza la contextualización del problema encontrado, presentando una perspectiva del consumo de los recursos naturales en el sector de la construcción, la generación de residuos en el sector metalmecánico, la aplicación de estos residuos en el sector de la construcción y los beneficios ambientales, sociales y económicos encontrados en las investigaciones analizadas.
-

- En el segundo se aborda el estudio realizado a la calamina, las características morfológicas, propiedades fisicoquímicas y de peligrosidad que se requieren para determinar la viabilidad de su uso.
- El tercer capítulo contiene el diseño de mezcla obtenido para diferentes materiales, las pruebas y resultados realizadas en concretos, morteros y BTC's.
- El cuarto capítulo aborda el análisis de los resultados obtenidos desde la perspectiva de la sostenibilidad, presentando los beneficios ambientales, económicos y sociales y adicionalmente cómo se puede llegar a reducir la huella ecológica, la huella de carbono y la hídrica con el reemplazo de agregados por los residuos, en este caso por la calamina.
- En el capítulo cinco, se sintetizan las conclusiones y se incluyen una serie de recomendaciones para futuras investigaciones.

Finalmente se incluye un conjunto de anexos, donde se encontrarán los diseños de mezclas realizados para cada uno de los productos abordados.

---





# 1 VALORACIÓN DE LOS RESIDUOS METALMECÁNICOS PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Los seres humanos requieren suplir sus necesidades básicas y requerimientos de bienes y servicios, lo cual demanda a su vez la explotación de recursos provenientes del subsuelo. Del medio ambiente se toman minerales como hierro y cobre, así como otros materiales como carbón, grava, arena y/o arcilla. Estos elementos tienen una gran importancia económica por ser fuente de trabajo y materias primas para industrias del sector metalmeccánico y de la construcción; ayudan al progreso del hombre, de sus ciudades y al avance tecnológico de todos los países. El sector metalmeccánico, por su parte, es uno de los más importantes a nivel mundial, siendo la industria del hierro y del acero una de las más significativas debido al impacto económico que genera, con una tasa de producción de aproximadamente de 50 millones de toneladas al año (Ferreira et al., 2016). La producción de acero crudo a nivel mundial en el año 2018 se incrementó en un 4,7% frente al 2017, llegando a 1.789 millones de toneladas (ANDI, 2018).

La industria de la construcción, por otro lado, impulsa el desarrollo de la infraestructura, considerada una base esencial para el avance de las economías de todos los países, garantizando beneficios sociales y económicos (Ortega et al., 2016), pero a su vez es un importante consumidor de materiales (Ríos Ocampo et al., 2017).

Un informe de CAMACOL del 2016, destaca la transversalidad del sector constructivo en Colombia, a nivel económico y logístico, así como el hecho de que promueve en gran cantidad la generación de empleos directos e indirectos, contribuyendo en un buen porcentaje a la formación de capital de los países (Ortega et al., 2016). Como ejemplo del efecto del consumo de materiales en la construcción se tiene que entre los años 2000 y 2011 el consumo de materiales para la fabricación de cemento y productos de hormigón, yeso y cemento, aumentó en 190% y 310% respectivamente (Ríos Ocampo et al., 2017).

El crecimiento de la población mundial, que en los últimos 60 años se ha triplicado (Unidas et al., 2019), ha impulsado la sobreexplotación de recursos naturales no renovables para suplir la creciente demanda de ambos sectores, metalmeccánico y construcción. La industria del hierro y del acero es considerada una de las principales responsables de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>, ya que tiene una alta dependencia del carbón y de la

electricidad requerida en sus procesos (Eloneva et al., 2010), y es también uno de los sectores con alta generación de residuos. Según la información proporcionada por la World Steel Association en el año 2018, 1.662 millones de toneladas son producidas, dando lugar a la generación de aproximadamente 700 millones de toneladas de residuos. Se estima que entre el 15% y el 20% de estos residuos corresponden a desechos especiales o peligrosos (World Steel Association, 2018).

## **1.1 CONSUMO DE LOS RECURSOS NATURALES EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.**

El sector de la construcción consume una gran cantidad de materiales que se tienen que fabricar a partir del uso de un conjunto de recursos naturales y energía (Chu, 2016). Se estima que puede consumir el 50% de los recursos naturales empleados (Arenas, 2007), y contribuir en un 40% al consumo energético mundial (Balaguera et al., 2018). De acuerdo con el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos del Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza, para la obtención y producción de los materiales de construcción requeridos para la edificación de un metro cuadrado de un edificio modelo se requiere una inversión de energía semejante a la que se genera en la combustión de más de 150 litros de gasolina, lo que correspondería a una emisión media de 0,5 toneladas de CO<sub>2</sub> y un consumo energético de 1.600 kWh (Zabalza Bribián, 2011).

Los procesos constructivos implican, entre otros, la limpieza de terrenos, la tala de árboles (incluidas las plantaciones primarias), el uso de arena, limo, hormigón y otros materiales, generando un consumo sustancial de recursos renovables y no renovables, principalmente en forma de arenas, gravas y arcillas extraídas (Zutshi & Creed, 2015). La arena y la grava representan el mayor volumen de materia prima utilizada después del agua, y su uso supera en gran medida las tasas de renovación natural (United Nations Environment Program UNEP, 2014). Datos indican que se utilizan en el mundo cada año 50.000 millones de toneladas de arena y grava, lo que equivale a la construcción de un muro de 35 metros de alto y 35 metros de ancho alrededor del Ecuador (ONU, 2022). En cuanto a la arcilla, sólo en Colombia se consumieron 82 millones de metros cúbicos en el año 2015, con un crecimiento anual de 25% desde el año 2010 (Universidad Industrial de Santander & Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2018). Además, el sector de la

---

construcción fue directa e indirectamente responsable del 18% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) en 2010 (OMM;PNUMA, 2014).

La producción de una tonelada de concreto convencional libera entre 0,05 y 0,13 toneladas de CO<sub>2</sub> al ambiente (Siddique et al., 2018), y en consecuencia, entre 1,25 y 3,25 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> se liberan a la atmósfera anualmente en todo el mundo por este motivo. Si bien entonces la minería de agregados naturales genera cerca del 1% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, la extracción de materiales naturales a gran escala para su uso en la fabricación de hormigón cada año deja un efecto negativo significativo en el ambiente (Siddique et al., 2018).

La extracción de materiales para el sector de la construcción, por cualquier método que se realice (bien sea dragado, explotación por canteras u otros), causa impactos negativos como la disminución de la biodiversidad, turbidez del agua, deterioro del paisaje, modificación del cauce de ríos y, por tanto, el aumento de la frecuencia e intensidad de las inundaciones y afectación del nivel freático; procesos que tienen consecuencias socioeconómicas, culturales e incluso políticas (Ministerio de Minas y Energía, 2013). Los agregados de construcción son, en consecuencia, un recurso no renovable que representa aproximadamente entre un 60% y un 80% del volumen de la mezcla para el concreto (Oancea et al., 2018), y hacen parte de otros productos del sector de la construcción cuya demanda ha aumentado, por lo que se hace necesario por tanto una alternativa para su sustitución parcial o total.

## **1.2 RESIDUOS EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y DEL ACERO**

En la industria del hierro y del acero se generan varios tipos de residuos en las diferentes etapas de su procesamiento; desde su producción en el horno de coque, seguido por los tratamientos las plantas de sinterización, luego en el alto horno u otros hornos como el de oxígeno y, por último, en los procesos de fundición o en los talleres de transformación. Estos residuos sólidos son clasificados principalmente como metálicos y no metálicos. Los primeros comprenden la escoria, la arena, cascarilla, virutas y chatarra; los segundos, el coque y polvo de carbón, lodo de aceite, cenizas volantes, lodo ácido y refrigerantes, refractarios y otros residuos como grasas y estopas (Chkravarty & Panigrahi, 1996).

---

Según datos de la Asociación Mundial de Acero los grandes productores de acero son China e India, con 87,5 y 9,3 millones de toneladas respectivamente. En Europa, Alemania e Italia son los países con mayor producción. Estados Unidos es uno de los grandes productores de América, seguido por Argentina y Brasil (World Steel Association, 2019). Colombia está catalogado como el tercer productor en Suramérica, con un total de 1,2 millones toneladas para el 2017, con la correspondiente generación de al menos 504.000 toneladas de residuos totales (ANDI, 2017).

En el proceso de obtención del acero, en los altos hornos, hornos de arco eléctrico o de cuchara se genera la escoria por fundición de mineral de hierro (Ferreira et al., 2016), a una tasa de una tonelada de escoria por cada tres toneladas de acero, lo que representan cincuenta millones de toneladas por año en el mundo (Balaguera et al., 2018).

En los procesos de fundición se emplea una mezcla de arena para fabricar los moldes, generalmente compuesta por un 85% a 95% de sílice de alta calidad, 4% a 10% de arcilla bentonita (que actúa como aglutinante) y del 2% al 10% de moldeo carbonoso empleado como aditivo para mejorar el acabado de la superficie de fundición, el cual contiene trazas de óxidos como MgO, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> (Bhardwaj & Kumar, 2017). En India, la industria de la fundición genera casi 1,71 millones de toneladas de arena al año y en Estados Unidos cerca de 10 a 15 millones de toneladas al año de este residuo (Arulrajah et al., 2017), cuyos costos del almacenamiento, transporte y mano de obra para el proceso de eliminación segura llegan a tener un valor entre 15 a 75 dólares por tonelada (Bhardwaj & Kumar, 2017). En el año 2017, el costo de la disposición o eliminación del residuo en este país se estimó entre 135 a 657 millones de dólares (Siddique et al., 2018).

Tanto en los procesos de tratamiento térmico como en los procesos de laminación o trefilación se produce la calamina, que es definida de diferentes formas según del proceso de donde proviene. Es considerada en general como una cascarilla de óxido, proveniente de las siderúrgicas y de las empresas laminadoras de acero, o como el recubrimiento de óxido delgado formado cuando el acero caliente entra en contacto con el aire y luego se desprende durante el trabajo del acero (Esguerra, A; Barona, 2010). También es definida como óxidos de hierro de aleaciones metálicas que se incluyen en el acero, llamadas escamas (Alwaeli & Nadziakiewicz, 2012). Se considera como un subproducto de la

---

producción de acero, que se forma en la superficie de los monolitos de acero durante tratamientos térmicos de alta temperatura después de la colada (Furlani & Maschio, 2016).

De acuerdo con la producción reportada por el boletín de la ANDI, y basados en una producción de residuo de entre 20 kg a 30 kg de calamina por cada tonelada de acero (Esguerra, A; Barona, 2010), en Colombia se producen anualmente de 26 a 28 millones de toneladas de calamina, solo como resultado de los procesos de laminación y trefilación.

En los procesos de mecanizado del acero se generan otros residuos, como viruta y limallas. Las virutas son también llamadas fibras de acero, por ser elementos de corta longitud y pequeña sección. Las limallas o limaduras son trozos de hierro muy pequeños que tienen el aspecto de un polvo oscuro brillante. Estos residuos, al estar mezclados con fluidos de corte hacen difícil su reciclado; sin embargo, existen algunos métodos para hacerlo, como un escurrido o un proceso de centrifugación (Valencia, Plinio Andres, Quintana, 2017). Según la Asociación Mundial de Acero, la viruta reciclada de cualquier producto de acero puede estar entre el 5% al 100%, y el acero fabricado a partir del uso de la viruta o rebaba puede representar el 25% aproximado de la producción mundial de este (World Steel Association, 2018).

Otro residuo conocido como chatarra se genera durante procesos de producción como el recorte y corte de aceros (Verma et al., 2018). Este residuo se considera una materia prima para ser utilizada nuevamente en los procesos de fabricación, como es el caso de las 600 millones de toneladas de chatarra empleadas para la producción de acero en el mundo en 2017 (World Steel Association, 2018).

En Colombia existen aproximadamente 172 empresas que realizan fundición y procesamiento del acero, y otras más que solo realizan procesamiento y/o fabricación de partes u objetos. En empresas pequeñas como Postelectras Dishierros S.A.S., en Copacabana (Antioquia), se tienen cifras de generación de residuos de 4 toneladas de chatarra y 16 toneladas de calamina por mes, y se estima que empresas como Acerías Paz del Río, Ternium y Diaco, grandes productoras de acero, pueden generar cifras mucho mayores, aunque ellas pueden reciclar estos residuos como insumos para el alto horno.

---

### **1.3 APLICACIONES DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN**

Existen varias alternativas de uso de los residuos de la industria metalmeccánica en la industria de la construcción, y especialmente los residuos que corresponden al sector de la producción del hierro y del acero. Por ejemplo, la escoria del proceso de fabricación del hierro y del acero es usada en la mezcla para pavimento de carreteras (Ferreira et al., 2016), así como un sustituto del Clinker para la fabricación del cemento portland compuesto, un producto que tiene una menor huella de carbono en comparación con el cemento ordinario (Imbabi et al., 2012), y es empleada también como material de reemplazo del caolín en la fabricación de cerámicas (Mendoza-Cuenca et al., 2015).

La limalla de acero o de hierro es utilizada como material de refuerzo en el concreto (Valencia, Plinio Andres, Quintana, 2017), teniendo como fundamento que a mayor contenido de fibras, mayor ductilidad (Askeland et al., 2011). La arena proveniente del proceso de fundición es usada como un reemplazo en porcentaje de la arena de cantera, y de ésta se estima que se producen aproximadamente 1,7 millones de toneladas al año en el mundo (Bhardwaj & Kumar, 2017).

Las virutas y la calamina han sido usadas en conjunto para el reemplazo de la arena en el concreto con el objetivo de buscar resultados favorables en el coeficiente de atenuación de radiación (Alwaeli & Nadziakiewicz, 2012), y para evaluar los resultados de los efectos de las mezclas con estos materiales en el esfuerzo de compresión (Alwaeli, 2016). Se han realizado diferentes investigaciones para incluir la calamina en procesos pertenecientes al sector de la construcción, como para la producción de morteros en reemplazo de agregado en diferentes proporciones (Furlani & Maschio, 2016) y con diferentes tipos de escamas, clasificando la calamina en gruesa o fina (Arıcı & Keleştemur, 2019). En estos últimos estudios se observó que la calamina estudiada viene de diferentes procesos como la laminación en caliente (Keleştemur & Arıcı, 2020) y tratamientos térmicos (Furlani & Maschio, 2016).

En cuanto a la investigación realizada en nuestro país sobre este tema, se incluyen trabajos de grado como los denominados “Elaboración de bloques de mortero tipo estructural mediante secado natural empleando la calamina procedente de Tenaris Tubocaribe S.A.” (Ordoñez & Villanueva, 2012), y “Propuesta para la elaboración de

---

baldosas artesanales tipo cerámica, adicionando calamina, en la empresa Alambres y Mallas ALMASA S.A.”, (Arciniegas & Muñoz, 2017). Ambas investigaciones sugieren porcentajes óptimos de reemplazo inferiores al 5% del residuo, denominado escamas de acero, cascarilla en procesos de trefilación (Arciniegas & Muñoz, 2017) y cascarilla proveniente del proceso de temple (Ordoñez & Villanueva, 2012). El residuo estudiado en nuestro caso proviene de un proceso de trefilación en frío y sin adición de lubricantes o grasas (como en el anterior caso citado en Arciniegas y Muñoz (2017), aunque con formas geométricas diferentes y una granulometría dirigida al reemplazo de agregados finos.

### **1.3.1 Aspectos Ambientales**

El uso de residuos industriales como reemplazo de materias primas en la industria de la construcción atenúa impactos que se ocasionan en la explotación de agregados, así:

- Reduce la demanda de extracción de materiales naturales para materia prima (Alwaeli & Nadziakiewicz, 2012), lo que minimiza los impactos a la disponibilidad de recursos para las futuras generaciones, biodiversidad marina, continental y de ríos.
- Disminuye la afectación de la provisión, protección y regulación de los servicios ecosistémicos (ONU, 2022).
- Disminuye la cantidad de residuos que van a un vertedero y la polución (Alwaeli, 2016)
- Mitiga impactos como contaminación del agua por sedimentos y cambios en niveles de pH, que causan daños importantes en los hábitats acuáticos y ribereños (United Nations Environment Program UNEP, 2014).

La explotación por minas a cielo abierto, o canteras, trae como consecuencia la degradación ambiental de la corteza terrestre de los municipios de la zona y de los alrededores, los cuales proveen de estos materiales al sector de la construcción. Esta explotación genera un detrimento del paisaje, ya que para obtener una tonelada de agregados se deben remover varias toneladas de suelo superficial, dañando no solo la cobertura vegetal del sitio e impactando en la actividad biótica de este (C. Bedoya & Dzul, 2015). La extracción de los materiales genera contaminación auditiva en su proceso, vertimientos al agua y residuos no aprovechables que deben ir a un vertedero, impactos que también disminuirían notablemente.

---

Sólo la huella de carbono causada por los combustibles fósiles usados para la maquinaria en la extracción está estimada en 0,002 kgCO<sub>2</sub>/kg (Freire et al., 2016); y la industria de la construcción requiere cerca de seis a siete veces más toneladas de arena y grava por cada tonelada de cemento (United Nations Environment Program UNEP, 2014).

El Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible indica que uno de los factores a considerar cuando se comparan los agregados vírgenes y los agregados reciclados u otros materiales para la construcción son los costos de transporte, incluyendo consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>. Generalmente los residuos metalmecánicos se encuentran en áreas urbanas cercanas al sitio de la construcción, mientras que los materiales vírgenes (como la arena), suelen obtenerse generalmente de canteras a una distancia mayor y en áreas naturales (Consejo mundial empresarial para el desarrollo sostenible, 2009). Por lo tanto, se puede decir que se requiere disminuir la huella de carbono ocasionada por el transporte de agregados, en especial la que se origina por los recorridos de municipios retirados al área metropolitana, para una disminución en la contaminación ambiental por material particulado (C. Bedoya & Dzul, 2015) y una disminución de contaminación auditiva.

El dragado de ríos ocasiona daños en las cuencas, y en especial, variaciones en la turbidez del agua y en las tasas de transporte de sedimentos. Como consecuencia de esta variación, la capacidad hidráulica de los ríos también se ve alterada, generando posibles cambios del cauce que impactan la frecuencia o intensidad de inundaciones. El abatimiento del nivel freático que puede acarrear sequías al alcanzar ciertos umbrales de la extracción de arena puede presentarse al eliminar capas de sedimentos de menor permeabilidad en el proceso de explotación. Todos ellos generan cambios en hábitats acuáticos y ribereños (United Nations Environment Program UNEP, 2014).

La minería de agregados ha afectado la provisión, protección y regulación de los servicios ecosistémicos (United Nations Environment Program UNEP, 2014) y el mantenimiento de la biodiversidad, al afectar hábitats y criaderos para diversas especies de flora y fauna, proporcionados por la arena (ONU, 2022), lo anterior cambiaría notablemente al tener la posibilidad de reemplazar parcialmente agregados no renovables por residuos. En la extracción de agregados se generan emulsiones y residuos sólidos (Romero, 2003), en

---



especial si son catalogados como especiales o peligrosos, lo que también disminuiría notablemente al reemplazar dichas fuentes.

Al usar un residuo como materia prima inerte se disminuye la cantidad de materiales que van a un vertedero (Alwaeli, 2016), lo que aumenta la vida útil esperada de esta zona. Nuevos vertederos de baja vida útil inducen impactos ambientales sustanciales, como la contaminación del agua y del suelo (Doussoulin & Bittencourt, 2022).

La extracción de arena a nivel mundial afecta una parte importante de las opciones para mitigar los impactos del cambio climático, dado que entre sus funciones se encuentra la protección contra la erosión costera, las marejadas ciclónicas, inundaciones y salinización de los acuíferos costeros. Este aspecto es muy importante dado que el aumento del nivel medio global del mar se estima entre 0,37 y 1,88 m para 2100, afectando tierras que actualmente albergan entre 147 y 216 millones de personas (ONU, 2022).

### **1.3.2 Aspectos Económicos**

En las investigaciones realizadas para reemplazar parte de la arena empleada con un material proveniente del proceso de fundición, se pudo evidenciar que este proceso consume menos energía y que el concreto obtenido es más económico comparado con el concreto convencional (Siddique et al., 2018). De igual manera, al incluir virutas como residuo se obtuvo una mayor resistencia a la flexión y a la tensión y un pequeño aumento en resistencia a la compresión (Furlani & Maschio, 2016), con lo que se pueden obtener ahorros en los costos de los concretos diseñados con resistencias específicas si se incorporan residuos. En esta investigación se espera ampliar el espectro de posibilidades en la valoración de la calamina como residuo del sector metalmeccánico mediante un análisis de impactos de una estrategia de economía circular con la industria de la construcción.

Al darle importancia al uso o inclusión de residuos en la construcción se hace más sostenible el sector y se ayuda a minimizar los impactos en un análisis de ciclo de vida. Al reusar los residuos industriales se ahorra en costos de transporte y disposición en vertederos (Alwaeli, 2016). El efecto de la incorporación de dichos residuos a los materiales de construcción tiene, por lo tanto, doble efecto favorable en los impactos de ambas industrias. Al descartar o disponer un residuo se pierde la energía incorporada de los

---

materiales que queda sin explotar (Doussoulin & Bittencourt, 2022), así como los costos correspondientes. En este caso se invierte una energía al extraer los materiales requeridos para la fabricación de acero, realizar la fundición, igual que al realizar la laminación y trefilación, parte de la cual queda en los residuos generados que no son utilizados y se van a un vertedero.

En la legislación colombiana se puede acceder a incentivos tributarios por inversiones que benefician el medio ambiente son conocidos como “Beneficios Tributarios Ambientales” como lo son el descuento del impuesto de Renta, exclusión del IVA, depreciación acelerada de activos y exención arancelaria.

El Artículo 158-2 del Estatuto Tributario, establece que las personas jurídicas que realicen directamente inversiones en control y mejoramiento del medio ambiente, tendrán derecho a deducir anualmente de su renta el valor de dichas inversiones que hayan realizado en el respectivo año gravable, previa acreditación que efectúe la respectiva autoridad ambiental (Congreso de la Republica, 1989). El Decreto 3172 de 2003 determina que las inversiones en control del medio ambiente son aquellas orientadas a la implementación de sistemas de control ambiental (Rama legislativa, 2003), que tienen por objeto el logro de resultados medibles y verificables de disminución de la demanda de recursos naturales renovables, o de prevención y/o reducción en la generación y/o mejoramiento de la calidad de residuos líquidos, emisiones atmosféricas o residuos sólidos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Algunas empresas del sector de la construcción han entendido los beneficios económicos del reciclaje y reúso de residuos de construcción. La empresa Indural, por ejemplo, recibió en el año 2022 la exclusión del IVA por invertir en una planta de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD), así como vidrio y loza de otras industrias, certificando que la elaboración de sus productos tendría como mínimo un 70% de material reciclado (Ambientalmente, 2022).

El sector de la construcción contribuye con un gran aporte al incremento del PIB, el cual presento una disminución en el año 2020 por la pandemia. En un informe de CAMACOL del año 2022 se menciona que, de acuerdo con los resultados revelados por el DANE sobre el Producto Interno Bruto (PIB), se evidencia que la reactivación económica del país avanza positivamente, al reconocer que la economía colombiana creció 10,6% frente a

---

2020 y que los resultados para el sector de la construcción presentaron un incremento destacado de 11,6% en 2021. Lo anterior evidencia su impulso al crecimiento de la economía, así como el valor agregado sectorial en la industria y el comercio de insumos, con los cuales mantiene un alto nivel de encadenamientos productivos (Camacol, 2022a). Para el año 2023 se proyectó un aumento en el PIB de edificaciones del 13,2%, sin embargo, se pronosticó por el Banco de la Republica una disminución para este mismo año del 1,1% al 0,5% (Camacol, 2022).

### **1.3.3 Aspectos Sociales**

Los sectores metalmecánico y construcción hacen un importante aporte a la generación de empleo. Para Colombia, en particular, se tiene que el sector construcción representa una fuente de empleo del 7% del total nacional (Ministerio de Trabajo, 2019), mientras que la metalmecánica alcanza un 13% del empleo del sector industrial en conjunto. Al encontrar alternativas sostenibles para ambas industrias se pueden lograr mejores eficiencias y garantizar la permanencia en el tiempo de estos dos sectores,

Respecto al impacto social de los residuos y la explotación de agregados en otros sectores productivos, vale mencionar que sectores como el turismo, indirectamente, puede verse afectado por la erosión de las playas ocasionada por la explotación de agregados (United Nations Environment Program UNEP, 2014); la pesca puede verse afectada por la destrucción de la fauna bentónica y el sector agrícola podría verse afectado por la pérdida de tierras agrícolas por la erosión de los ríos y el descenso en los niveles freáticos. Adicionalmente, el sector de seguros puede verse perjudicado por el aumento en impactos por eventos extremos como sequías, inundaciones y tormentas, en especial en zonas costeras o de ribera (United Nations Environment Program UNEP, 2014). Al afectarse el turismo, la pesca y la agricultura se pueden ver afectadas las familias que dependen de estos sectores.

## **1.4 OTROS MATERIALES SUSTITUTOS PARA EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN**

Distintas estrategias se han investigado con el fin de disminuir la explotación de los recursos y reducir la cantidad de residuos que van a los vertederos. Las posibilidades van desde el reciclaje de algunos de los residuos generados en la demolición de los edificios o

---

carreteras (Balaguera et al., 2018) o la sustitución de agregados naturales por residuos generados en otras industrias, como las del caucho, polímeros, agrícola y mecánica y de la misma industria de la construcción.

El uso de residuos en el sector de la construcción se aborda debido, principalmente, a las ventajas relacionadas con la amplia disponibilidad, mayor renovabilidad, costos reducidos y sostenibilidad, propiedades térmicas y propiedades acústicas (Oancea et al., 2018). En los últimos años se han realizado investigaciones que incluyen estos materiales como reemplazo del cemento, la arena o la grava, tal y como se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Residuos usados en la industria de la construcción como material de reemplazo de los agregados**

<b>Residuo</b>	<b>Cantidad estimada producida en el mundo</b>	<b>Uso específico</b>
Cenizas de incineración de residuos sólidos municipales	Su porcentaje de producción se estima cercano a los 800 millones de kilogramos en todo el mundo (Balaguera et al., 2018)	Es usada en las mezclas para pavimento de carreteras (Balaguera et al., 2018).
Caucho proveniente de los neumáticos	Se estima que la producción de estos residuos llega a 17 millones de toneladas en todo el mundo (Balaguera et al., 2018). La Unión Europea se estima que se generan 250.000 toneladas (Balaguera et al., 2018).	Es usado para reforzar el asfalto (Baricevic et al., 2018).
Cascarilla de arroz, aserrín, cáscara de maní y cáscara de coco	La cascarilla de arroz, es considerada uno de los residuos con una producción alta ya que tiene un rango de 20% a 33% en peso del arroz (Quispe et al., 2019).	Son usados para reemplazar la arena en ladrillos de cemento. La cascarilla de arroz como material cementante y la cáscara de coco como reemplazo de agregado grueso (Sathiparan, 2018).
Concreto reciclado proveniente de la demolición de obras	Según el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible se generan aproximadamente 900 millones de toneladas de concreto tan solo en Europa, Estados Unidos y Japón.	Es usado para reemplazo del agregado grueso (grava) (Balaguera et al., 2018).
Residuos Plásticos	Se estima que ingresan a los océanos 8,4 millones de toneladas por año de desechos plásticos (Willis et al., 2018).	Como refuerzo, ya sea por fibras o como polvo para reemplazar agregados (Balaguera et al., 2018).
Cenizas de fondo de carbón	Las cenizas de fondo de carbón se generan las centrales eléctricas de carbón (Sathiparan, 2018).	La ceniza de fondo de carbón es analizada para su uso como alternativa de los agregados (Sathiparan, 2018)
Residuos polvo de mármol	La producción de partículas finas (<2 mm) es uno de los grandes problemas de la industria del mármol (Sathiparan, 2018).	El polvo de piedra natural se utiliza como materia prima o material de construcción, ladrillos cerámicos y aditivos para cemento (Sathiparan, 2018).



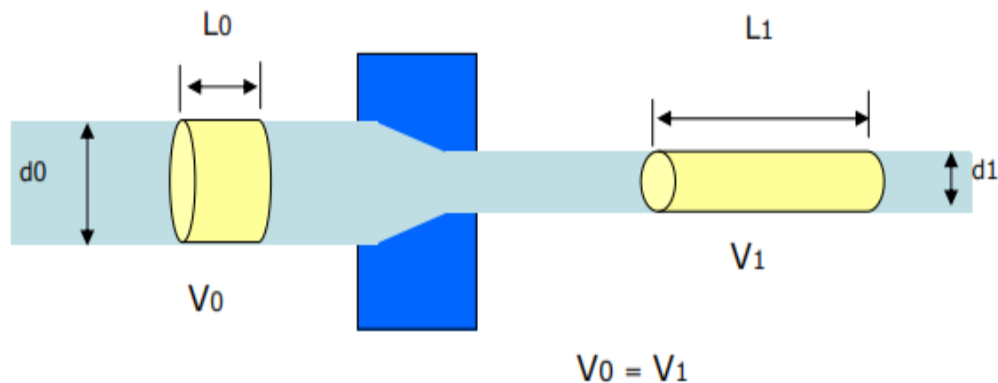
## 2 RESIDUO METALMECÁNICO DEL CASO DE ESTUDIO

### 2.1 ORIGEN Y DISPOSICIÓN DEL RESIDUO METALMECÁNICO DEL CASO

La calamina es una capa dura y lisa que se forma de manera inmediata sobre los productos de acero que se han obtenido por el proceso de laminación o trefilación en caliente, o posterior a tratamientos térmicos como el temple (Esguerra, 2009). La calamina empleada en este estudio proviene de la empresa Postelectras Dishierros S.A.S., ubicada en el municipio de Copacabana (Área Metropolitana del Valle de Aburrá), como resultado del proceso de trefilación en frío, el cual consiste en disminuir el diámetro del alambre mediante su paso escalonado por agujeros de diámetros más pequeños.

En la Gráfica 1 se puede observar el principio de la trefilación, el cual es aprovechar el mismo volumen del acero disponible, con una reducción en su diámetro, y un aumento en su longitud.

**Gráfica 1. Principio del proceso de trefilación**

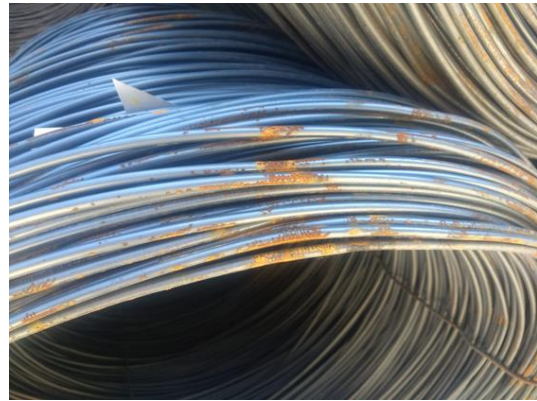


Fuente: *Tecnología del alambre* (Beunens, 1994)

El alambre llega a la empresa de diferentes partes de Colombia y del mundo, ya con la oxidación causada por las condiciones ambientales a las que se ve expuesto y los procesos de transformación anteriores. Antes de realizar el proceso de trefilación en frío, el alambre pasa por un decalaminador, el cual tiene la función de desprender la cascarilla con la cual llega el alambre a la empresa mediante el paso por un agujero de menor

diámetro. En la Imagen 1 puede observarse las chipas de alambre tal y como ingresan al proceso, en estado de oxidación. En Imagen 2 se presenta una vista general y el detalle del decalaminador.

**Imagen 1. Alambre que ingresa al proceso de trefilación**



**Imagen 2. Decalaminador**



Es muy común que en un proceso de trefilación la calamina queda impregnada de aceite y lubricantes, pero la calamina utilizada en este trabajo está libre de estos elementos ya que el proceso que se lleva a cabo en la maquinaria de la empresa no lo requiere. Por este motivo no es considerada un residuo peligroso. El alambre continúa al tren de trefilación en frío, para terminar de reducir su diámetro (Imagen 3).

**Imagen 3. Tren laminador en frío**



La calamina generada en la empresa era mezclada con los residuos de construcción y demolición (RCD), provenientes del concreto sobrante en la fabricación de cilindros de prueba y postes y adicionalmente de los postes rechazados por calidad, para así ser depositada en una escombrera. En algunos casos, el residuo de calamina era almacenado en la industria para entregarlo a una empresa de fabricación de electrodos. La empresa decidió asumir la disposición correcta de este residuo y contratar empresas con Licencias Ambientales para este fin, como ASEI o COAMBIENTAL para la separación, y apoyar iniciativas como este trabajo para así evitar o minimizar el impacto ambiental, lo que representa un sobre costo para la empresa.

## **2.2 CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO METALMECÁNICO DEL CASO DE ESTUDIO**

Para la caracterización de la calamina se realiza un estudio de su morfología, la densidad y la granulometría, características que se requieren conocer para determinar su posible

---



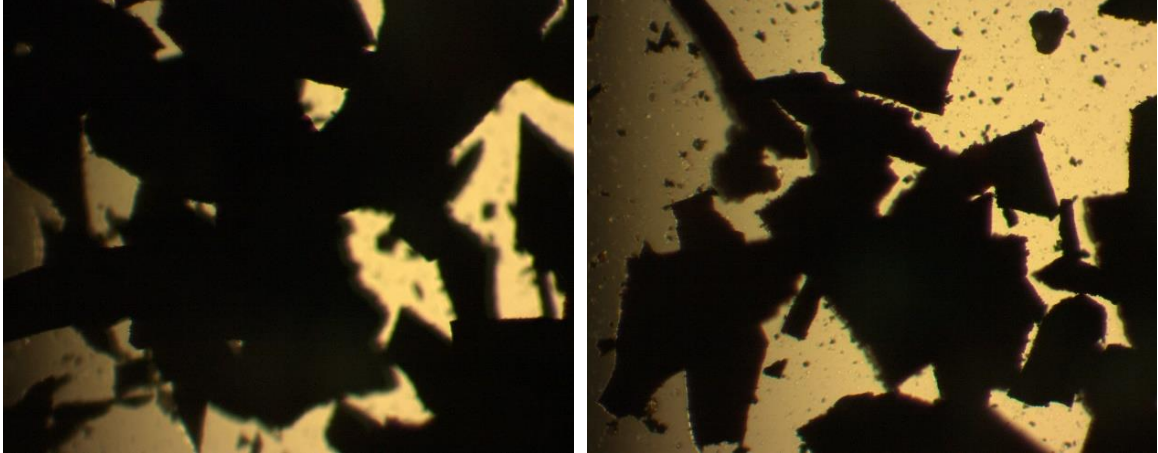
influencia en los materiales a analizar y que son realizadas en los agregados que se usan en el sector de la construcción. Los ensayos de fluorescencia y de difracción de rayos X se realizan para poder conocer los compuestos que conforman este residuo, así como las fases y los óxidos que se encuentran en él. Finalmente, se analiza la peligrosidad de la calamina con el fin de desvirtuar, para el caso de la calamina procedente del proceso de trefilación en seco, lo contenido en la Legislación Colombiana, que la considera como un residuo peligroso.

### **2.2.1 Morfología**

La calamina es una capa delgada de color negro azulado con partículas de óxidos de hierro creada al enfriar el acero a temperatura ambiente, dejando pasar la humedad y favoreciendo la corrosión. En la Imagen 4 se muestra la calamina en el estado en que se obtiene directamente del proceso realizado en el decalaminador, como un polvo oscuro y muy volátil. En la Imagen 5 se evidencia que este residuo no presenta características de forma definida, y que hay variedad de tamaños en las partículas, con terminaciones agudas, planas y redondeadas.

**Imagen 4. Calamina recuperada del proceso de trefilación**



**Imagen 5. Imágenes de la forma de la calamina**

### 2.2.2 Densidad

Para calcular la densidad aparente de la calamina y la arena a utilizar se realizó el procedimiento según la norma ASTM D 1556-82<sup>2</sup>. Se empleó un molde reglamentado de Proctor Modificado ASTM y el equipo para la elaboración del ensayo de Cono de Arena con el material en su interior, tal y como se aprecia más adelante en la Imagen 6. El objetivo de esta prueba es que la calamina se ubique libremente y de la manera más homogénea posible al interior del recipiente, de forma similar a como lo hace la arena de Ottawa (arena patrón del ensayo) durante el ensayo de densidad de campo.

Para este procedimiento se tiene que:

- Peso del molde:  $W_{molde} = 5.730 \text{ g}$
- Diámetro del molde:  $D_{molde} = 15,0 \text{ cm}$
- Altura del molde:  $H_{molde} = 11,7 \text{ cm}$ ,

El volumen del molde que se ocupará con calamina es:  $V = \pi D^2/4 \cdot H = 2.067,56 \text{ cm}^3$

---

<sup>2</sup> Norma ASTM D 1556-82: Densidad de campo por el método del cono de arena.

---

Para el ensayo básico se pesaron cinco diferentes muestras de calamina, ya que se presentaron algunas diferencias (en gramos) basadas posiblemente en el patrón de acomodamiento de las partículas. En el caso de la arena sólo se analizaron tres muestras por ser un material más homogéneo. El proceso se comparó con la calibración de arena en la Tabla 2.

**Tabla 2. Densidad aparente de la calamina y la arena de Ottawa**

Muestra	Peso calamina + molde (g)	Peso calamina (g)	Peso de arena + molde (g)	Peso de arena (g)
1	8.868,55	3.138,55	8.773,35	3.043,35
2	8.958,70	3.228,70	8.732,85	3.002,85
3	9.064,85	3.334,85	8.756,75	3.026,75
4	8.963,65	3.233,65		
5	9.033,50	3.303,50		
Promedio		3.247,85		3.024,32

**Imagen 6. Procedimiento para obtener densidad aparente de la calamina**

Con el peso promedio del material acomodado por su propio peso, y un volumen controlado, se tiene que:  $\delta_{aparente} = peso/volumen$ . Los resultados finales permitieron evidenciar que para la arena  $\delta_{arena} = 1,463 \text{ g/cm}^3$ , mientras que para la calamina  $\delta_{calamina} = 1,571 \text{ g/cm}^3$ . La diferencia en términos de densidad aparente entre ellas fue apenas del 7,4%. Para la densidad relativa de la calamina, respecto de la arena de concretos, se empleó el método del picnómetro según las recomendaciones de la norma ASTM D-3289<sup>3</sup> para materiales bituminosos sólidos y semisólidos. En la Imagen 7 se muestran algunas imágenes del proceso adelantado.

<sup>3</sup> Norma ASTM D-3289: Método alternativo para determinar la densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.

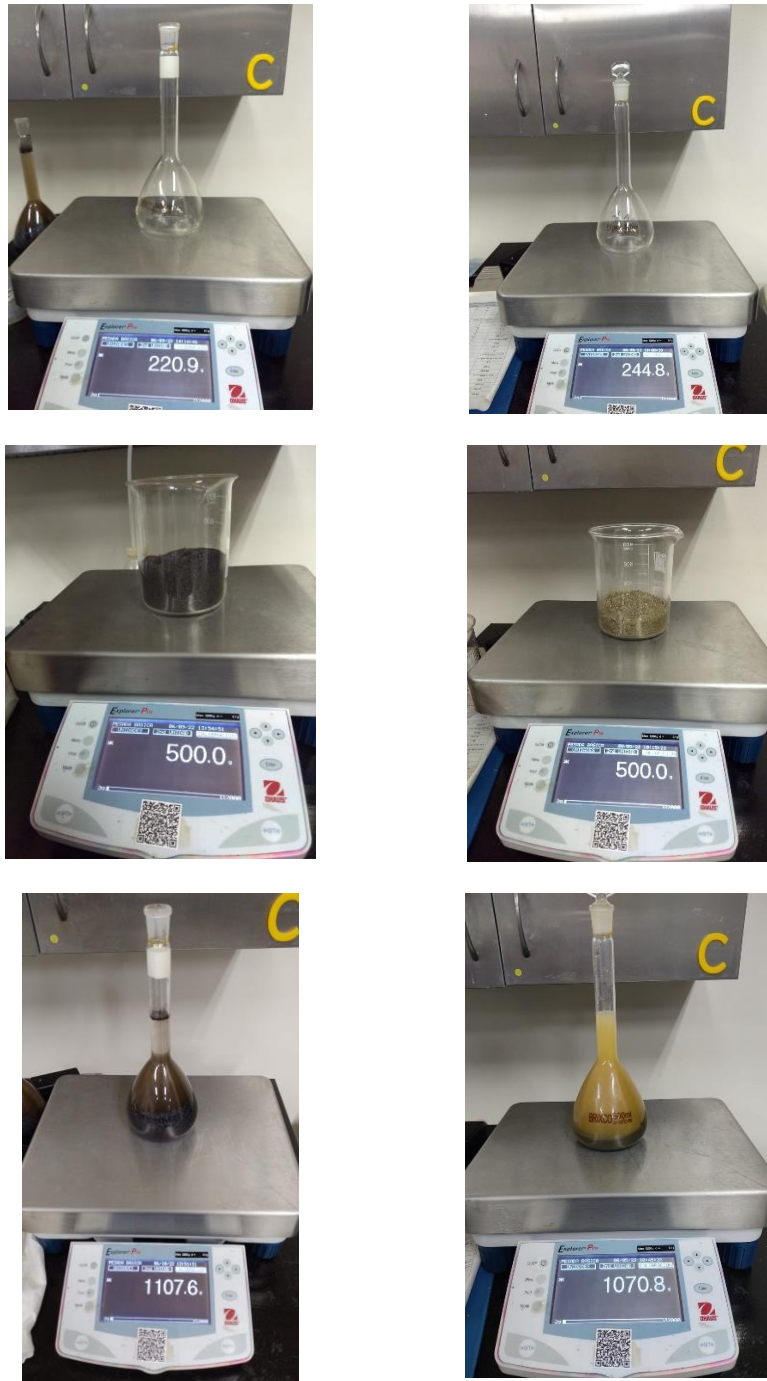
Se determinó el peso de un picnómetro vacío, de 500 ml de capacidad, y el del mismo picnómetro con agua destilada hasta la marca de patronamiento. Posteriormente, se agregaron 500 g de material (calamina y arena de concretos) y se completó el volumen hasta la misma marca. La densidad relativa de un material es la diferencia entre la densidad absoluta de material analizado y la densidad patrón (agua a 20 °C). En la Tabla 3 se presentan los cálculos correspondientes.

$$\delta_{rel. material} = \frac{W_{material+agua}/500 ml}{W_{agua}/500 ml}$$

**Tabla 3. Densidad aparente de la calamina y la arena de concreto**

Muestra	Calamina		Arena de concreto	
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
$W_{picnometro}$ (g)	203,6	220,9	244,8	228,3
$W_{picnom+agua}$ (g)	699,1	716,2	743,0	726,5
$W_{picnom+muestra+agua}$ (g)	1.086,7	1.107,6	1.070,8	1.052,9
$W_{agua}$ (g)	495,5	495,3	498,2	498,2
$W_{muestra+agua}$ (g)	887,1	886,7	826,0	824,6
$\delta_{rel. muestra}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,782	1,790	1,658	1,655
Promedio	1,786		1,657	

En términos de densidad relativa, los resultados finales permitieron evidenciar que para la arena de concreto  $\delta_{arena} = 1,657 g/cm^3$ , mientras que para la calamina  $\delta_{calamina} = 1,786 g/cm^3$ . La diferencia en términos de densidad aparente entre ellas fue solo un 7,8%. Este valor corresponde al incremento relativo en el aporte de áridos que se daría con los reemplazos en los materiales de estudio. En la Imagen 7 se muestran algunos aspectos del proceso.

**Imagen 7. Procedimiento para obtener densidad relativa absoluta**

### 2.2.3 Granulometría

Por granulometría de un agregado se entiende aquel procedimiento manual o mecánico por medio del cual se separan las partículas constitutivas del agregado, según tamaños, y

se determinan las cantidades porcentuales en peso que cada tamaño que aporta al peso total. Para esto se utilizan tamices de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica, los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se traza la gráfica de valores del material analizado granulometría (Laboratorio de Materiales de Construcción , 2010).

Mediante este ensayo se busca encontrar la distribución del tamaño de partículas, por peso, de tal manera que se logre establecer el porcentaje cada diámetro relativo y determinar la posibilidad de utilizarlo en la industria de la construcción como material de reemplazo de agregados finos o gruesos, usados en la fabricación de concretos, morteros y BTC. El método empleado es el estándar para análisis por malla de agregado grueso y fino, determinado por la ASTM 136-01<sup>4</sup>. Los resultados serán utilizados para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de las partículas con los requerimientos aplicables especificados (ASTM, 2003).

El procedimiento se realizó por triplicado, cada uno a partir de una muestra de 1.000 gramos. Las muestras se hicieron pasar durante 5 minutos por una serie de tamices establecidos según la norma ASTM, organizados de mayor a menor, en un equipo de rotación y golpeo RO-Tap (Imagen 8). La distribución porcentual de los pesos del material retenido en cada uno de los tamices permitió llevar a determinar la distribución de los tamaños en la muestra, lo que se grafica en una curva granulométrica.

La información permitió comparar los resultados con la clasificación de los suelos determinada por la USCS (ASTM, 1952) y con la norma NTC 174<sup>5</sup> y 4205<sup>6</sup> del 2000 (ICONTEC, 2000), mostradas de la Tabla 4 a la Tabla 6, respectivamente.

---

<sup>4</sup> Norma ASTM C136-01: Método estándar de ensayo para análisis por tamizado de agregados fino y grueso.

<sup>5</sup> Norma NTC 174: Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto

<sup>6</sup> Norma NTC 4205: Unidades de mampostería de arcilla cocida. ladrillos y bloques cerámicos

---



Imagen 8. Ensayo de granulometría para la calamina



A. Pesado



B. Tamices



C. Equipo RO-Tap

Tabla 4. Sistema de clasificación de suelos determinada por la USCS

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN USCS			
FINOS (≥ 50% pasa 0,08 mm)			
Tipo de Suelo	Símbolo	Lím. L. q. wL	Índice de Plasticidad IP
Limos Inorgánicos	ML	< 50	< 0,73 (wL - 20) ó < 4
	MH	> 50	< 0,73 (wL - 20)
Arcillas Inorgánicas	CL	< 50	> 0,73 (wL - 20) y > 7
	CH	> 50	> 0,73 (wL - 20)
Limos o Arcillas orgánicas	OL	< 50	** wL seco al horno ≤ 75% del wL seco al aire
	OH	> 50	
Altamente Orgánicos	P <sub>t</sub>	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente	

\* Si IP = 0,73 (wL - 20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0,73 (wL - 20), usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH

\*\* Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente wL seco al horno

En casos dudosos favorecer clasificación más plástica  
Ej.: CH-MH en vez de CL - ML

Si wL = 50; CL-CH ó ML-MH

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN USCS						
GRUESOS (< 50% pasa 0,08 mm)						
Tipo de Suelo	Símbolo	% Ret. en 5 mm	% Pasa* 0,08 mm	CU	CC	**IP
Gravas	GW	50% de lo Ret. en 0,08 mm	< 5	> 4	1 a 3	
	GP			Si no cumple requisitos de GW es GP.		
	GM					< 0,73 (wL - 20) ó < 4
	GC					> 0,73 (wL - 20) y > 7
Arenas	SW	< 50% de lo Ret. en 0,08 mm	< 5	> 6	1 a 3	
	SP			Si no cumple requisitos de SW es SP.		
	SM					< 0,73 (wL - 20) ó < 4
	SC					> 0,73 (wL - 20) y > 7

\* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC

\*\* Si IP = 0,73 (wL - 20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0,73 (wL - 20), usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC

En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica  
Ej.: GW-GM en vez de GW-GC

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Fuente: Clasificación USCS (ASTM, 1952)



**Tabla 5. Análisis granulométrico NTC 174 (2000) para los agregados**

<b>Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)</b>	<b>Porcentaje que pasa (%)</b>
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 $\mu$ m	25 a 60
300 $\mu$ m	10 a 30
150 $\mu$ m	2 a 10

Fuente: Norma NTC174 (ICONTEC, 2000)

**Tabla 6. Análisis granulométrico NTC 4205 (2000) para la arena de sello**

<b>Numero ASTM</b>	<b>Apertura (mm)</b>	<b>Pasa Mín (%)</b>	<b>Pasa Máx (%)</b>
#4	4,75	100%	100%
#10	2,00	100%	100%
#16	1,18	58%	96%
#20	0,85	49%	89%
#30	0,60	36%	70%
#40	0,43	24%	50%
#50	0,30	15%	38%
#80	0,18	3%	22%
#100	0,15	0%	17%
#120	0,13	0%	10%
#200	0,08	0%	5%

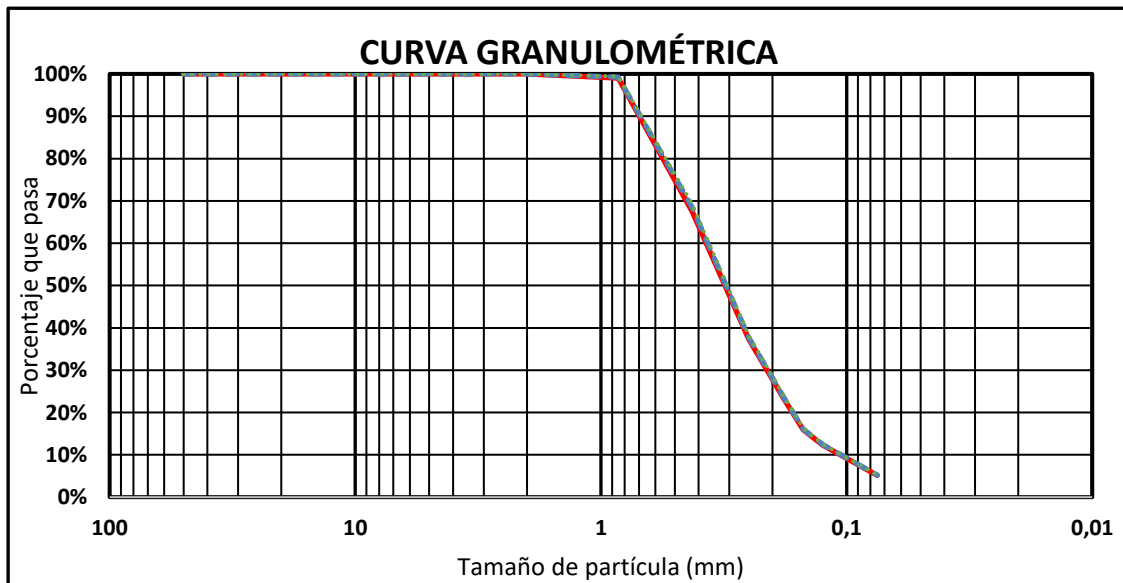
Fuente: Norma NTC4205 (ICONTEC, 2000)

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7, en donde se determina que este residuo tiene un gran porcentaje de finos, y podría utilizarse como sustituto en porcentaje de la arena fina o arcilla usada para fabricación de los materiales que los emplean.

**Tabla 7. Porcentajes de retenido por tamaño en los tamizajes efectuados**

Numero ASTM	Apertura (mm)	Tamizaje 1		Tamizaje 2		Tamizaje 3	
		Acum. (%)	Pasa (%)	Acum. (%)	Pasa (%)	Acum. (%)	Pasa (%)
#4	4,75	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%
#10	2,00	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%
#20	0,85	1,00%	99,00%	0,79%	99,21%	0,63%	99,37%
#40	0,43	32,51%	67,49%	31,53%	68,47%	30,75%	69,25%
#60	0,25	62,71%	37,29%	62,27%	37,73%	61,87%	38,13%
#80	0,18	76,80%	23,20%	76,52%	23,48%	76,21%	23,79%
#100	0,150	84,11%	15,89%	83,93%	16,07%	83,72%	16,28%
#120	0,125	87,73%	12,27%	87,59%	12,41%	87,44%	12,56%
#200	0,075	94,85%	5,15%	94,79%	5,21%	94,75%	5,25%
		100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%

En la Gráfica 2 se puede observar cómo se superponen las líneas resultantes correspondientes a cada uno de los tamizajes realizados, esto ocurre dada la congruencia de resultados obtenidos en la muestra de estudio. Cada uno de los colores corresponde a uno de los tamizajes dados en la tabla anterior.

**Gráfica 2. Superposición de curvas las granulométricas de los tamizajes**

Del análisis granulométrico se obtienen los siguientes resultados:

- El coeficiente de variación obtenido para cada una de las aperturas de tamiz y los resultados indican que la muestra de calamina es homogénea.
- El mayor porcentaje de las partículas se encuentra catalogado como arenas finas, tal como se observa en la Tabla 8; sin embargo, esto no quiere decir que no pueda reemplazar porcentajes de arenas muy finas o de arcillas en los productos estudiados, ya que solo requeriría de un ajuste granulométrico para que presente las mismas condiciones de la arena o pueda servir para llenar los intersticios que deja el agregado más grueso.

**Tabla 8. Análisis granulometría**

<b>% Arenas Tamiz: 100 mm - 0,08 mm</b>	<b>% Finos Tamiz: 0,08 mm - 0,000 mm</b>
94,80%	5,20%

- La calamina puede reemplazar un mayor porcentaje de arenas finas en lo que corresponde a arenas para concreto, con lo cual las mezclas quedarían con deficiencia en el porcentaje de partículas más gruesas correspondientes al tamaño de tamiz de 4,75 mm y 2,36 mm, que equivaldría aproximadamente a un 15%.
- Para las baldosas, la calamina podría reemplazar igualmente un porcentaje de arenas finas, limos y arcillas presentes en los agregados, ya que sus partículas están en estos límites.

## 2.2.4 Ensayo de fluorescencia

Este estudio brinda el análisis químico elemental de la muestra, tanto cuantitativa como cualitativamente, permitiéndonos encontrar los contenidos de los diferentes elementos del alambre trabajado en la empresa Postelectras Dishierros S.A.S.

El análisis de la muestra fue realizado por el Laboratorio de Espectrometría de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, sede Medellín, usando como equipo el Thermo ARL Optim'X WDXRF con un análisis semicuantitativo, con condiciones de

humedad de 36% y temperatura de 21,1 °C. Para la determinación del contenido de carbono se usó el método de análisis por determinación gravimétrica mediante combustión, con equipo determinador de carbono LECO, Referencia 523. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9. Resultado del análisis FRX a la calamina**

Elemento	% p/p	Elemento	% p/p
Hierro (Fe)	97,530	Magnesio (Mg)	0,098
Carbono (C)	0,442	Azufre (S)	0,055
Silicio (Si)	0,990	Cromo (Cr)	0,034
Calcio (Ca)	0,516	Níquel (Ni)	0,027
Manganeso (Mn)	0,320	Cobalto (Co)	0,0235
Aluminio (Al)	0,289	Cerio (Ce)	0,0212
Fosforo (P)	0,111	Titanio (Ti)	0,007

La caracterización por FRX demostró que el principal componente de la calamina es el hierro, correspondiente a su origen, seguido del silicio y del carbono, elementos aleantes que comercialmente se usan en la fabricación de este material. El principal elemento aleante del acero es el carbono; sin embargo, la técnica usada anteriormente no era altamente precisa para la cuantificación de elementos livianos (como lo es el carbono), por lo que fue necesario realizar una técnica de caracterización adicional denominada determinación gravimétrica mediante combustión, en la cual se encontró que el contenido promedio de carbono en la muestra analizada fue de 0,442%, lo que corresponde con un acero de medio carbono.

### 2.2.5 Difracción de Rayos X - DRXs

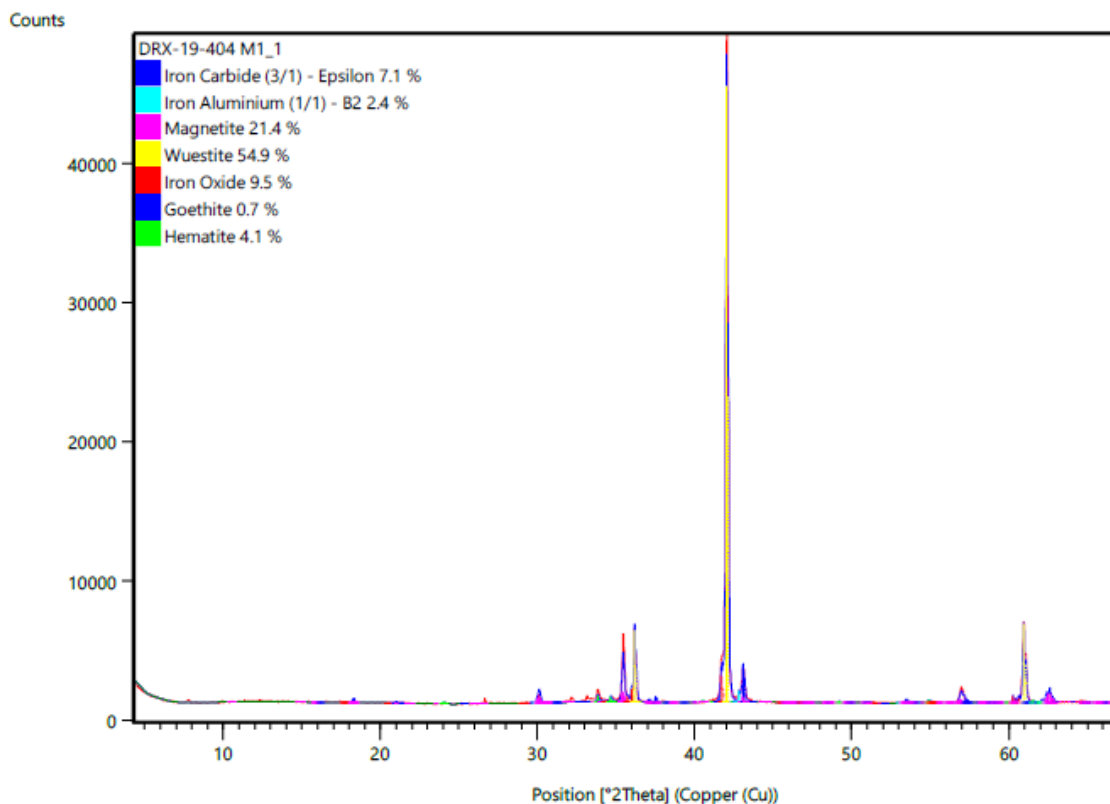
Este estudio brinda el análisis cualitativo y cuantitativo de las fases cristalinas. A partir de la difracción de rayos X se puede determinar las clases de óxidos que tiene y la determinación de su estructura.

Los ensayos fueron realizados por el Laboratorio de Espectrometría de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, sede Medellín, en un equipo el Malvern –

PANalytical Modelo Empyean 2012, con detector Pixel 3D y fuente de CO; Goniometro Omega/2 theta con configuración de la plataforma *Reflexión Transmission Spinner* con giros de 4 s. El paso fue de 0,05° y un tiempo por paso de 52 s. La semicuantificación se realizó usando el software High Score Plus mediante el método Rietveld y la base de datos ICSD FIZ karlsruhe 2012-1.

La Gráfica 3 presenta los resultados obtenidos por DRX de la calamina. Se observa que el pico principal se encuentra a aproximadamente a 42° y está asociado con el óxido de hierro. Esta configuración tuvo una intensidad 7 veces mayor que los picos correspondientes a las otras estructuras disponibles en el material estudiado.

**Gráfica 3. Resultados DRX de la calamina**



Los resultados del DRX confirman que el principal componente de la calamina es el óxido de hierro dispuesto en diferentes estructuras, como muestran las fórmulas químicas obtenidas en la base de datos ICSD FIZ Karlsruhe 2012-1, usada para la comparación de

los resultados obtenidos durante la caracterización del material. La Tabla 10 presenta el resumen de la composición aproximada de la calamina.

**Tabla 10. Resultado del análisis DRX a la calamina**

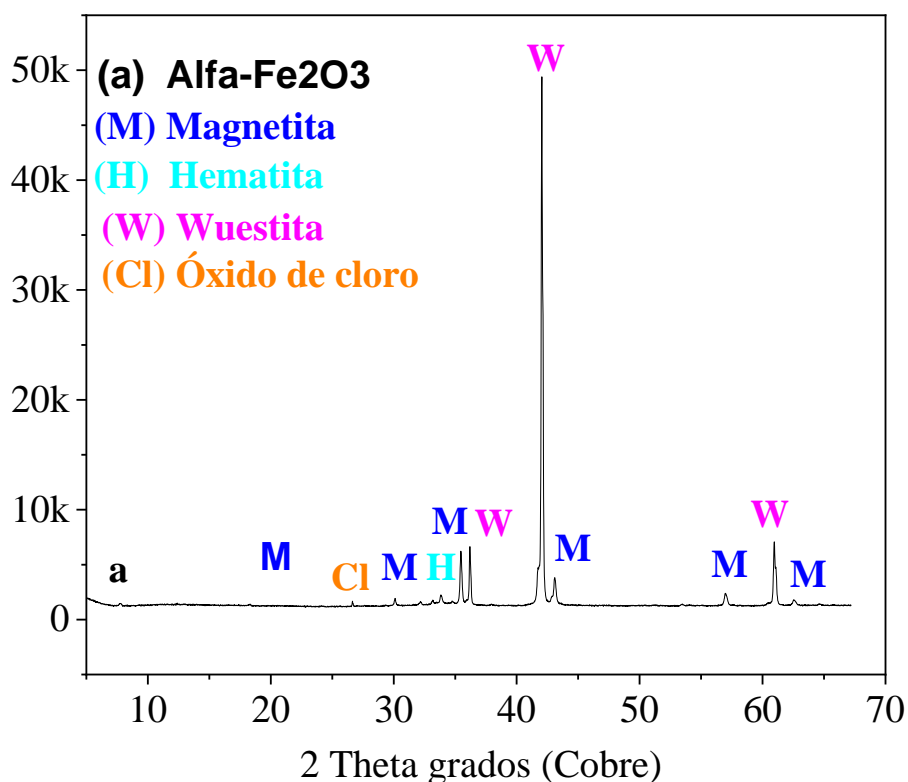
Nombre		Formula química	Composición (%)
<i>Iron Carbide (3/1) - Epsilon</i>	Carburo de Hierro	Fe <sub>3</sub> C	7,1
<i>Iron Aluminium (1/1) – B2</i>	Hierro Aluminio	AlFe	2,4
<i>Magnetite</i>	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	21,4
<i>Wuestite</i>	Wuestita	FeO	54,9
<i>Iron Oxide</i>	Óxido de Hierro	FeO	9,5
<i>Goethite</i>	Goetita	FeO <sub>2</sub> H	0,7
<i>Hematite</i>	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,1

Al realizar un análisis y tratamiento de los datos arrojados por el DRX con el programa *Rietveld en Highscore Plus*, se obtiene, de acuerdo con la cuantificación que se muestra en la Tabla 11, que el 80% de los compuestos en el patrón de difracción está constituido por Wuestita, en el cual el hierro está en su menor estado de oxidación Fe<sup>2+</sup>, seguido por Magnetita (9%) en la cual el hierro está en estados de oxidación 2+ y 3+, y finalmente se encuentra el óxido de hierro en sus formas gama y alfa, en cantidades de 3% y 5%, respectivamente, en el cual el hierro está en su estado de oxidación 3+. Pequeñas trazas de óxidos de cloro se observan en los patrones de difracción lo cual puede estar asociado a contaminantes atmosféricos (Gráfica 4).

**Tabla 11. Fases que constituyen el patrón de difracción**

ICSD	Nombre		Fórmula Química	Cantidad (%)
98-008-2235	<i>Wuestite</i>	Wuestita	Fe <sub>0.925</sub> O	75
98-063-3029	<i>Wuestite</i>	Wuestita	FeO	5
98-004-4525	<i>Magnetite</i>	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	9
98-009-6072	<i>Hematita</i>	Hematita	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5
98-003-6281	<i>Iron Oxide</i>	Óxido de hierro	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3
98-006-7665	<i>Chlorine oxide</i>	Óxido de cloro	ClO <sub>2</sub>	3

ICSD\* El patrón obtenido en en Highscore Plus

**Gráfica 4. Imagen obtenida del análisis DRX realizado**

### 2.2.6 Caracterización de Peligrosidad del Residuo

Para que la calamina pueda ser empleada como materia prima en las aplicaciones de esta investigación, se adelantan las pruebas requeridas para verificar si se ésta se clasifica como un residuo peligroso, según el Decreto 4741 -Residuo 10-02-10- (Ministerio de Medio Ambiente, 2005). El estudio de peligrosidad CRETIB se elaboró por parte del Grupo de

Investigaciones Ambientales GIA de la Universidad Pontificia Bolivariana Sede Medellín, según lo establecido en el Título 6 del Decreto 1076 de 2015, realizando los análisis de toxicidad por metales pesados (extracción TCLP y análisis de Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo Total, Mercurio, Plomo y Selenio en el lixiviado), análisis de Plata en el lixiviado, análisis de Reactividad al agua y ensayo de Toxicidad aguda.

Para la toma de la muestra del residuo se siguieron las metodologías de la Resolución 0062 de 2007, el II-PC-017: Muestreo Línea de Gestión y Valorización de Residuos y el II-IN-154: Toma de Muestras en Suelos y Residuos. Asimismo, se tuvo en cuenta lo establecido en las normas ASTM, la Resolución 0330 de 2017 y el Título 6 del Decreto 1076 de 2015. De este estudio se obtuvieron los resultados presentados de la Tabla 12 a la Tabla 18.

**Tabla 12. Resultados de caracterización física y química**

Parámetro	Decreto 1076 -2015 Titulo 6 Regulación CFR EPA40–Parte 261	Calamina
Sólidos totales	No Aplica	99,57 ± 0,68
pH	No Aplica	4,403 ± 0,160

**La muestra tiene como resultado un pH ácido.**

**Tabla 13. Resultados de la caracterización de reactividad al agua**

Parámetro	Resolución 0062 del IDEAM Literal 5.4	Calamina
Reactividad al agua	No Aplica	< 0,1

Según la Resolución 0062 de 2007 del IDEAM, un residuo es reactivo si la velocidad de desprendimiento de gases inflamables en contacto con agua es mayor a 1,0 l/kg sustancia, por lo que este resultado demuestra que no es reactivo al agua.



**Tabla 14. Resultados de la caracterización de toxicidad (prueba TCLP30)**

Parámetro	Unidades	LCM	Decreto 1076 -2015 Titulo 6 Regulación CFR EPA40–Parte 261	Calamina
Arsénico	mg As/L	0,005	5,0	0,0434 ± 0,0002
Bario	mg Ba/L	0,490	100,0	Menor de 0,490 ± 0,194
Cadmio	mg Cd/L	0,010	1,0	Menor de 0,010 ± 0,006
Cromo total	mg Cr/L	0,082	5,0	Menor de 0,062 ± 0,037
Mercurio	mg Hg/L	0,0005	0,2	0,0045 ± 0,0001
Plomo	mg Pb/L	0,067	5,0	Menor de 0,067 ± 0,010
Selenio	mg Se/L	0,230	1,0	Menor de 0,0050 ± 0,0002

Los resultados que se obtienen en esta caracterización para cada uno de los metales analizados son menores al límite establecido en la Norma. De igual manera, el resultado presentado en las tablas siguientes, en donde se analiza la toxicidad de la calamina.

**Tabla 15. Resultado de caracterización de toxicidad en el lixiviado para Plata**

Parámetro	Unidades	LCM	Decreto 1076 -2015 Titulo 6 Regulación CFR EPA40–Parte 261	Calamina
Plata	mg Ag/L	0,05	5,0	Menor de 0,05

**Tabla 16. Resultados de la prueba de Ecotoxicidad – *Daphnia Pulex***

Ensayo de toxicidad aguda con <i>Daphnia Pulex</i>	Resolución 0062 de 2007 IDEAM	Calamina
Porcentaje de inmovilización para 100% WAF	Si el porcentaje de inmovilización es mayor o igual a 50%, el residuo es clasificado como ECOTÓXICO	28,3 ± 1,1%

**Tabla 17. Resultados de la prueba de Ecotoxicidad – *Chlorella vulgaris***

Ensayo de toxicidad aguda en algas con – <i>Chlorella vulgaris</i>	Resolución 0062 de 2007 IDEAM	Calamina
Inhibición tasa de crecimiento 72h (%)	Si el porcentaje de inmovilización es mayor o igual a 50%, el residuo es clasificado como ECOTÓXICO	< 10,0 %

**Tabla 18. Análisis de Blanco de campo**

Parámetro	Unidades	LCM	Calamina
Cadmio	mg Cd/L	0,010	<i>Menor de 0,010 ± 0,006</i>

Después de realizar estas pruebas a la calamina con un análisis de peligrosidad TRE, realizado bajo los estándares establecidos por las metodologías EPA (Environmental Protection Agency) “*Analytical Methodos for the National Sewage Aludge Survey*” y la Resolución 0062 de 2007, y de acuerdo con los lineamientos establecidos en la parte 261 del CFR EP 40, se puede concluir que el residuo no es reactivo al agua, no es tóxico por presencia de metales pesados y no es ecotóxico. En conclusión, el residuo analizado, proveniente del proceso de trefilado en frío en las instalaciones de Postelectras Dishierros S.A.S. no es considerado un residuo peligroso

### 3 ALTERNATIVAS DE USO DEL RESIDUO METALMECÁNICO DEL CASO DE ESTUDIO

Para evaluar el uso sostenible de la calamina en la construcción se definieron tres productos en los cuales se incluirá como materia prima en reemplazo parcial de las arenas empleadas tradicionalmente, como son concretos, morteros y bloques de tierra compactada (BTC). Para esto se realizó el diseño de mezcla para cada uno de los productos (diseños que pueden ser observados en los anexos A, B y C) y se definieron diferentes ensayos que determinarían sus posibles aplicaciones.

Antes de comenzar los ensayos, se llevó a cabo la homogenización de 180 kilos de calamina traída de la empresa. Para ello se empleó una cuarteadora, con el fin de no sesgar el proceso de selección del material (Imagen 9).

**Imagen 9. Homogenización de la calamina para los ensayos en concretos**



Se realizaron los diseños de mezcla para los morteros según los determinan las Normas Técnicas Colombianas (NTC). Para los concretos y bloques de tierra comprimida (BTC's) se partió de mezclas con resistencias y dosificaciones determinadas previamente por la norma y/o comercialmente. Para los reemplazos de arena por calamina se establecieron entonces porcentajes de sustitución para cada tipo de material analizado, en algunos casos por encima de los usados en otras investigaciones, dado que se quería encontrar la

influencia de este residuo en las mezclas y al evaluar los efectos de dichos remplazos en los productos. En todo caso, cada una de las dosificaciones analizadas deberían contar con el número de individuos necesario para identificar efectos ajenos a la inclusión de la calamina en el experimento.

### **3.1 APLICACIÓN EN CONCRETOS**

El concreto es el material más usado en el sector de la construcción por sus propiedades mecánicas a largo plazo y por los acabados que se logran con prácticas eficientes. El concreto está compuesto por cemento como material aglutinante, agua (para activar la reacción química del mismo), arenas y gravas como agregados, y ocasionalmente aditivos para proporcionar características especiales (ICONTEC, 1999). Este material ofrece, como las rocas naturales, una gran resistencia a las fuerzas de compresión, sin embargo, presenta una resistencia moderada a la flexión y a la tracción (Gutiérrez, 2003).

#### **3.1.1 Dosificaciones para la producción de concretos**

Para la preparación de mezclas de concreto se requiere establecer la dosificación de cemento, arena, grava y agua. Para estas dosificaciones se tuvieron en cuenta las normas NTC174<sup>7</sup>, NTC77<sup>8</sup>, NTC92<sup>9</sup>, NTC129<sup>10</sup>, NTC176<sup>11</sup>, NTC237<sup>12</sup>, NTC550<sup>13</sup> y NTC1377<sup>14</sup>. En la Tabla 19 se especifica el diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto y, posteriormente, se determinan los materiales necesarios para el llenado de las probetas (véase el Anexo A, para el proceso de diseño de mezcla).

---

<sup>7</sup> Norma NTC 174: Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto

<sup>8</sup> Norma NTC77: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos

<sup>9</sup> Norma NTC92: Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados

<sup>10</sup> Norma NTC129: Toma de muestra de agregados

<sup>11</sup> Norma NTC176: Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso

<sup>12</sup> Norma NTC237: Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino

<sup>13</sup> Norma NTC550: Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra

<sup>14</sup> Norma NTC1377: Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio

---

**Tabla 19. Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto**

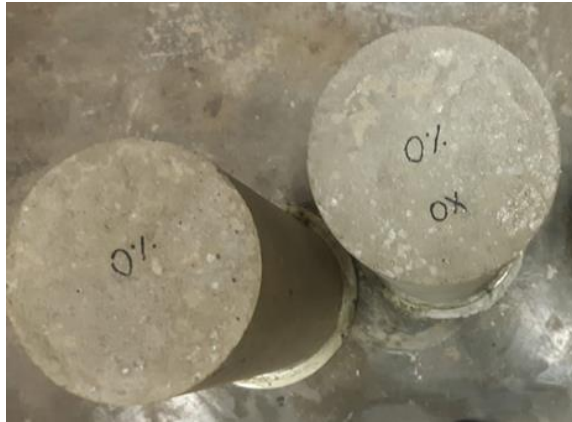
Cemento (kg)	A. Fino (kg)	A. Grueso (kg)	Agua (l)
396,98	583,13	1.216,10	209,47

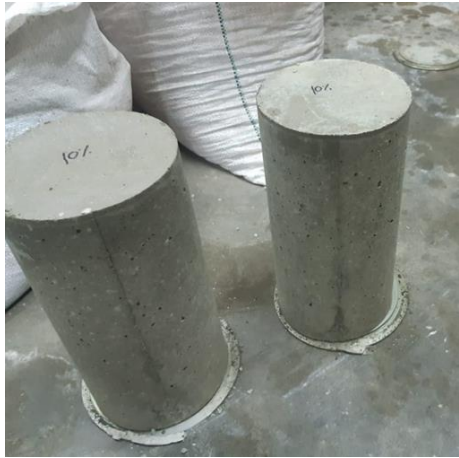
La arena de la mezcla del concreto (agregado fino) fue reemplazada por calamina en cuatro porcentajes diferentes (10%, 30%, 50% y 70% en peso), y se elaboraron tres muestras para cada uno de los porcentajes de reemplazo y tres para el blanco (sin reemplazo). Todas las muestras se vaciaron en cilindros con las dimensiones normalizadas y se llevaron al tanque curado por 28 días (Imagen 10).

**Imagen 10. Fabricación y curado de cilindros de concreto**

En la Imagen 11 se puede observar la apariencia de los cilindros de concreto sin reemplazo de arena por calamina terminado el proceso de curado en tanque. El color del cilindro no cambia apreciablemente a medida que aumenta el reemplazo de arena (Imagen 12).

**Imagen 11. Cilindros de concreto sin reemplazo de arena por calamina (0%)**



**Imagen 12. Cilindros de concreto con reemplazo de arena por calamina**

A. 10% de reemplazo



B. 30% de reemplazo



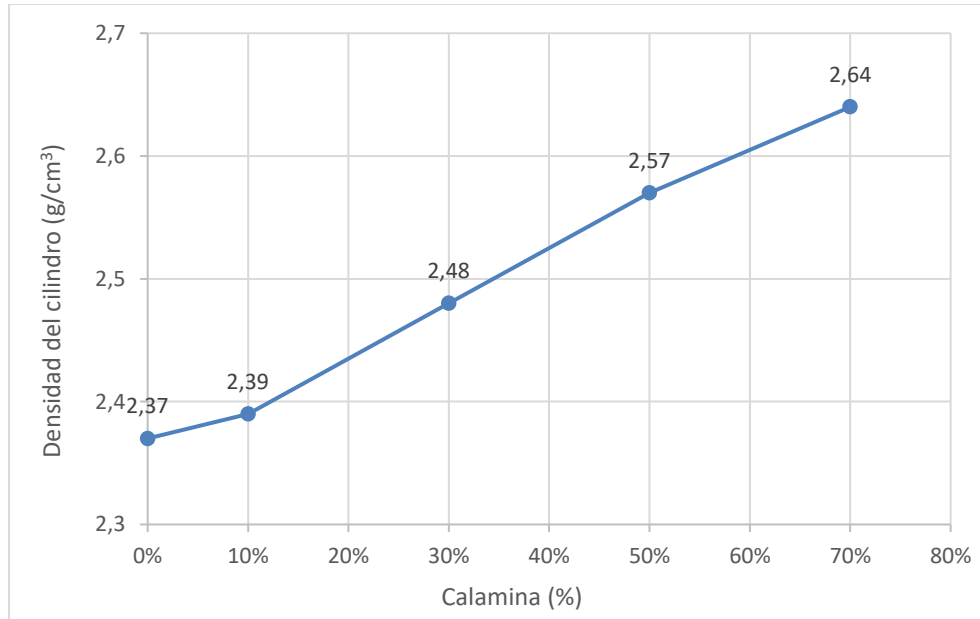
C. 50% de reemplazo



D. 70% de reemplazo

**3.1.2 Ensayos y resultados****3.1.2.1 Densidad**

Luego de extraer las muestras de la cámara de curado, éstas fueron pesadas y medidas para obtener la densidad de cada uno de los cilindros. Los resultados se pueden observar en la Gráfica 11.

**Gráfica 5. Densidad de cilindros según el reemplazo de arena por calamina**

La densidad del cilindro aumenta con el porcentaje de calamina. Con el 10% de reemplazo de arena la densidad aumenta un 0,84%, con el 30% de reemplazo un 4,64%, con el 50% de reemplazo un 8,43% y, finalmente, aumenta un 11,39% con un reemplazo del 70% de arena por calamina. Este aumento se debe a que el material de reemplazo tiene una mayor densidad aparente y relativa absoluta que el árido, como se determinó en el Capítulo 2.

### 3.1.2.2 Ensayos de resistencia a la compresión

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron siguiendo las indicaciones de la norma NTC673<sup>15</sup>. En la Imagen 13 se puede observar el montaje para el procedimiento llevado a cabo para la falla de los cilindros y el resultado final. En la Gráfica 11 se muestran los datos y resultados de los ensayos realizados.

---

<sup>15</sup> Norma NTC673: Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto

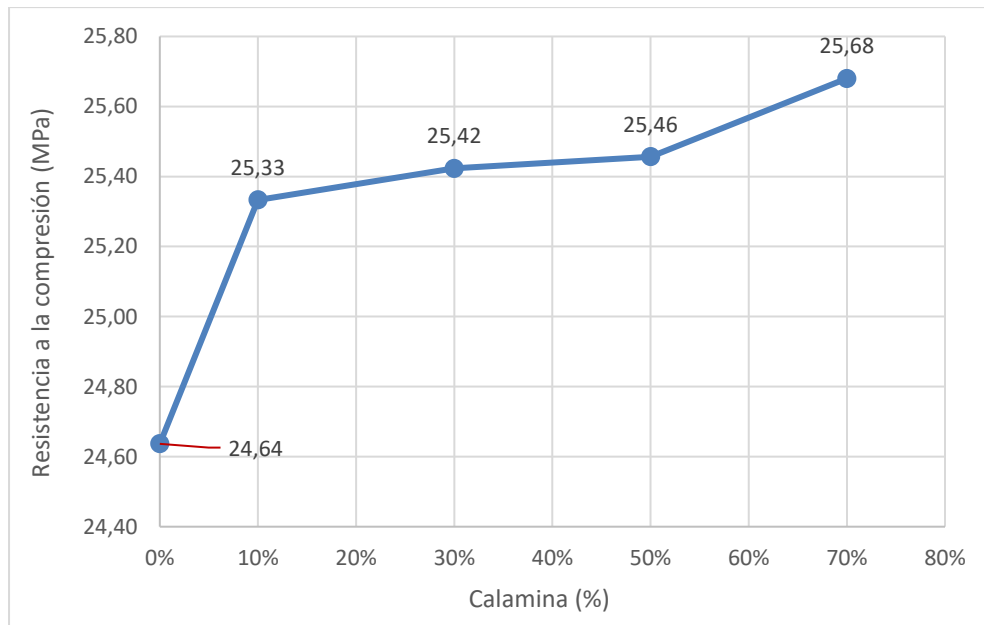
---



**Imagen 13. Ensayo de resistencia a la compresión en cilindros**



**Gráfica 6. Resistencia del concreto según el reemplazo de arena por calamina a los 28 días de curado**



Se observa que en todos los casos la resistencia a la compresión del concreto aumentó en comparación con el concreto sin reemplazo de arena (línea roja en la gráfica), y que esta resistencia fue mayor a medida que se aumentó para cada porcentaje. Así, para un

10% de reemplazo la resistencia la ganancia de resistencia a la compresión fue de un 2,80%; para un 30% de reemplazo de un 3,17%; para un 50% aumenta en un 3,33% y, finalmente, se incrementó en un 4,22% para un reemplazo del 70% de arena por calamina.

Las mezclas obtenidas con reemplazo de arena por calamina presentaron una mayor resistencia a la compresión que la mezcla de referencia o blanco. La mezcla con el contenido del 70% de reemplazo de arena por calamina, es la que presenta mayor densidad y resistencia a la compresión, aspectos que deben evaluarse en el uso que se va a dar a este tipo de mezcla, ya que la densidad del material obtenido será mayor. Sin embargo, el obtener un diseño de mezcla que permita un reemplazo máximo del 70% de un recurso no renovable como la arena, sin disminuir la resistencia en ninguna de las mezclas realizadas, permite la conservación de este y minimizar los impactos ambientales generados por la extracción de dicho recurso.

La norma sismo resistente colombiana (NSR10)<sup>16</sup>, en su Título C, capítulo C.1, establece que para el concreto estructural la resistencia a la compresión no debe ser inferior a 17 MPa. Comparando los resultados de resistencia a la compresión encontrados, se determina que cualquiera de las mezclas realizadas con reemplazo de calamina cumple con el valor mínimo establecido para este tipo de uso.

## **3.2 APLICACIÓN EN MORTEROS Y BALDOSAS**

El mortero de construcción es un material que en estado endurecido presenta propiedades físicas y mecánicas similares a las del concreto. Se compone de la mezcla de cemento, arena, agua y, en algunas ocasiones, aditivos que pueden darle características especiales. Este material es usado para la pega de mampostería compuesta por ladrillos y bloques estructurales, para la ejecución de revoques y resanes y, entre otros, la fabricación de elementos como adoquines y baldosas para pisos (Gutiérrez, 2003).

---

<sup>16</sup> Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Bogotá.

---

### 3.2.1 Dosificaciones en morteros

Para el diseño de mezcla para los morteros se utilizaron las normas NTC11<sup>17</sup>, NTC112<sup>18</sup> y NTC220<sup>19</sup>. Se realizó un diseño de mezcla basado en reemplazo de arena por calamina en cinco porcentajes diferentes (10%, 30%, 50%, 70% y 90% por peso). Se definió la cantidad de cemento y arena según el numeral 10.1 “Composición de los morteros” de la norma NTC 220, y para determinar la cantidad de agua requerida se mantuvo constante el porcentaje de fluidez de la mezcla, tal y como lo determina el numeral 7 de la norma NTC 112. El diseño de mezcla para composición se presenta en la Tabla 20 (véase el Anexo B, para el diseño de las mezclas).

En la Tabla 20 se presenta una comparación de la cantidad de agua requerida para cada porcentaje de reemplazo en morteros, y para una misma fluidez esperada entre el 105% y el 115%. La mezcla con un reemplazo del 70% de arena por calamina, requiere un 19% menos de agua con respecto a la mezcla que no contienen el reemplazo, tal como se muestran en la Gráfica 13.

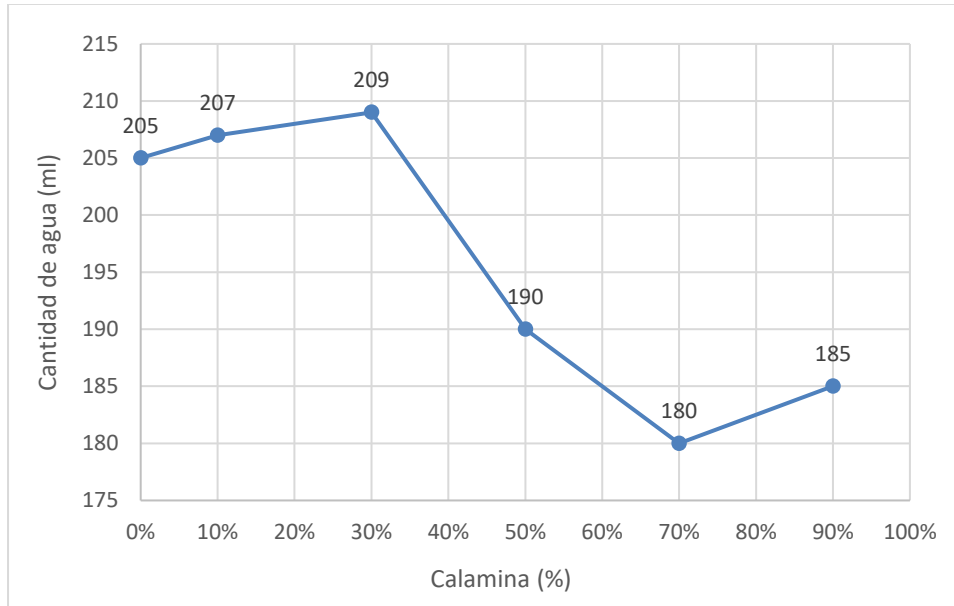
**Tabla 20. Diseño de mezclas para morteros**

Cemento (g)	Arena (g)	Calamina (g)	Porcentaje (%)	Agua (ml)	Porcentaje (%)	% Fluidez
250,00	687,50	0,00	0%	205	22%	107,50
250,00	618,75	68,75	10%	207	22%	108,50
250,00	481,25	206,25	30%	209	22%	112,00
250,00	343,75	343,75	50%	190	20%	109,25
250,00	206,25	481,25	70%	180	19%	110,25
250,00	68,75	618,75	90%	185	20%	105,00

<sup>17</sup> Norma NTC11: Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico

<sup>18</sup> Norma NTC112: Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico

<sup>19</sup> Norma NTC220: Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico

**Gráfica 7. Agua empleada en la mezcla para cada dosificación de morteros**

La cantidad de agua empleada aumenta en las mezclas con reemplazos del 10% y 30% de calamina en comparación con la muestra de referencia. Para un reemplazo del 50% la cantidad de agua comienza a disminuir, presentándose una reducción del 7,32%, para un reemplazo del 70% el agua requerida es un 12,20% menos y para un reemplazo del 90% se requiere un 9,76% menos de agua para la mezcla. Una disminución en la cantidad de agua en la mezcla puede atribuirse a que las partículas incluidas de calamina no absorben agua en el proceso de saturación de los agregados (lo que sí sucede con la arena reemplazada) y de esta forma el agua disponible se utiliza en mayor medida para la reacción química del cemento. El efecto se revierte para porcentajes mayores en la medida en que la porosidad de mezcla para el mortero tiene menor permeabilidad y la fluidez de la mezcla se ve afectada.

Con los diseños de mezcla obtenidos se fabricaron tres cubos de cada una de las mezclas siguiendo el procedimiento dado por la NTC 112<sup>20</sup>, numeral 8, "Procedimiento para la

---

<sup>20</sup> Norma NTC112: Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica

mezcla de morteros”. Se hicieron 11 series para ser sometidos a ensayos y análisis como se verá en el numeral 3.2.2., lo que corresponde a 33 cubos para cada una de las mezclas.

## 3.2.2 Ensayos en cubos de mortero

### 3.2.2.1 Densidad

Se realizaron tres cubos de 50 mm de lado para cada muestra (Imagen 14) y tres series completas de los cubos con los diferentes reemplazos (Imagen 15). La primera serie para someter los especímenes a 14 días de curado en tanque de agua (Imagen 16), la segunda a 28 días de curado en estas mismas condiciones, y una tercera con 14 días de curado en tanque y exposición al ambiente durante 368 días (Imagen 17). La totalidad de las muestras sería sometida a ensayos de compresión posteriores.

En la Imagen 18 puede observarse que los cubos sometidos a condiciones ambientales durante 368 días no sufrieron cambios externos de oxidación.

**Imagen 14. Molde de muestra con reemplazo de 30% de arena por calamina**



**Imagen 15. Moldes con reemplazo del 0% al 70% de arena por calamina**



**Imagen 16. Curado de cubos**



**Imagen 17. Cubos sometidos a condiciones ambientales**

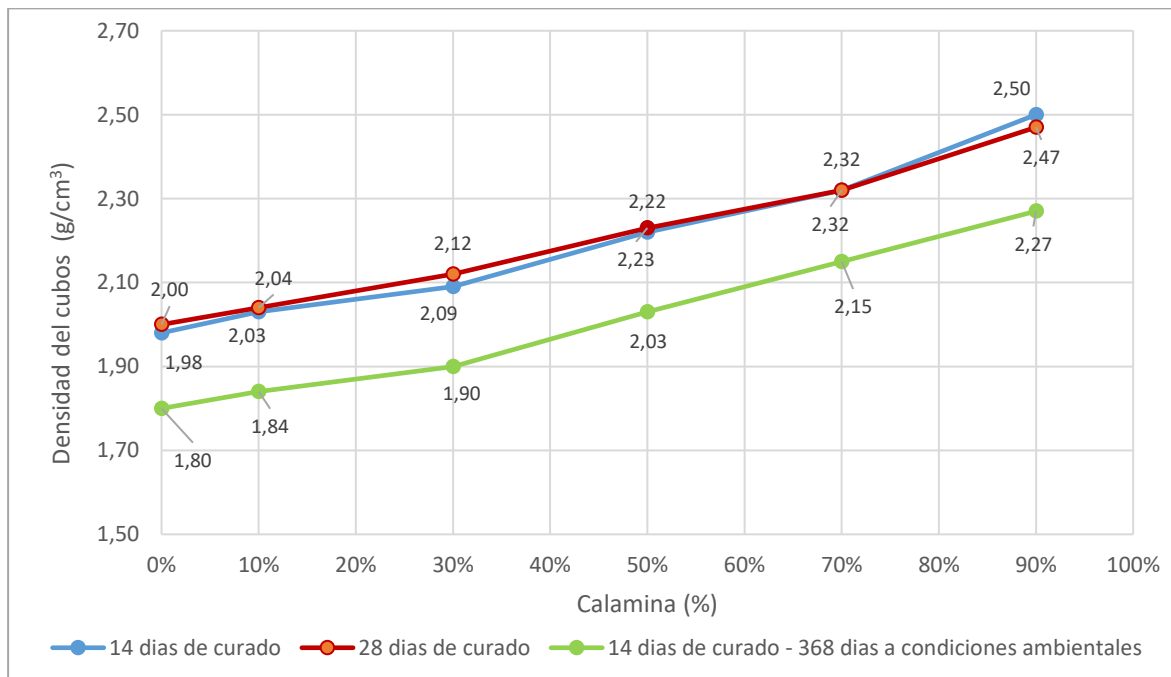


**Imagen 18. Estado de cubos luego de 368 días a la intemperie**



Luego de que cada serie de muestras cumpliera los días requeridos para la falla, se realizó el cálculo de densidades, evaluando el peso y sus medidas. Los resultados pueden observarse en la Gráfica 8.

**Gráfica 8. Densidad de cubos en función del porcentaje de calamina**



La densidad se incrementa debido a la inclusión de la calamina en la mezcla, aumentando cerca un 17% para la mezcla del 70% de reemplazo de arena por calamina y un 25% en peso para la mezcla del 90% de reemplazo de arena.



Se puede observar que la densidad disminuye un poco en el tiempo para las muestras que estuvieron sometidas a condiciones ambientales con respecto a las muestras que estuvieron a 14 y 28 días de curado. Esto puede atribuirse a posiblemente a la forma de las partículas de calamina que, al no ser redondeadas, puede crear una conexión entre los poros que permite una mejor evaporación del agua a mediano y largo plazo.

### 3.2.2.2 Resistencia a la compresión

Este ensayo se realizó teniendo en cuenta las indicaciones dadas en la norma NTC 220<sup>21</sup> en una prensa hidráulica, como se muestra en la Imagen 19. Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos se muestran en la Gráfica 9.

**Imagen 19. Ensayo de resistencia a la compresión en cubos**

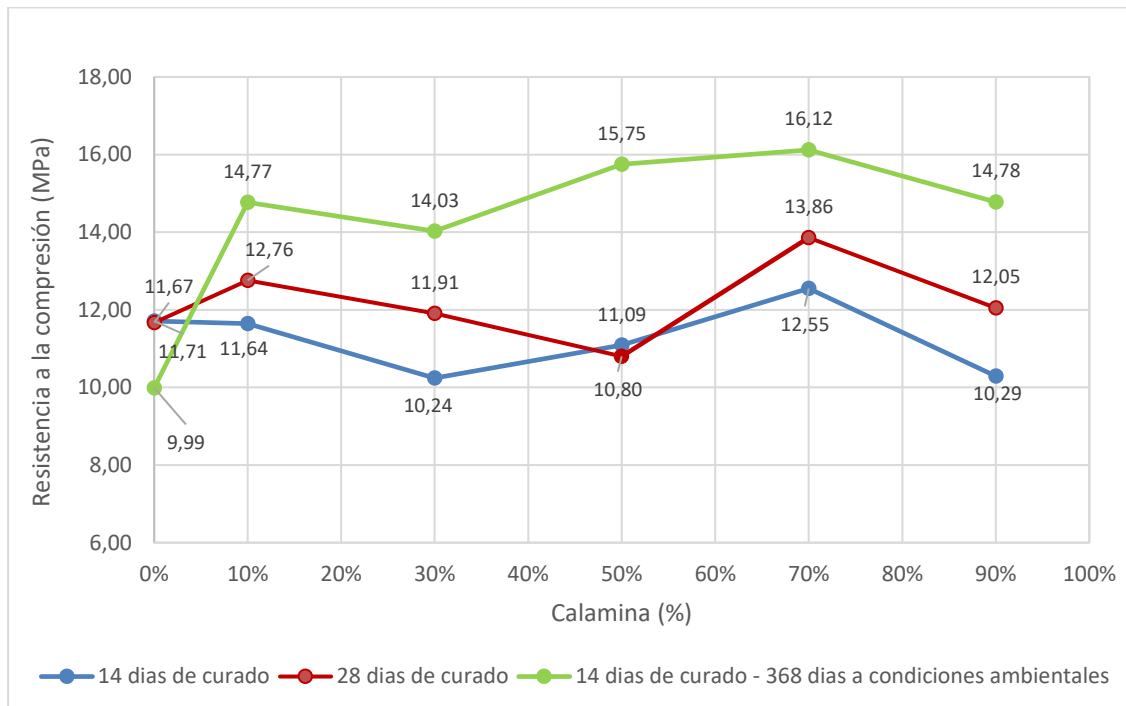


---

<sup>21</sup> Norma NTC220. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico

---



**Gráfica 9. Resistencia respecto al contenido de calamina y tiempo de curado**

Para las muestras con 14 días de curado la resistencia a la compresión disminuye en un 0,59% en comparación con la mezcla de referencia. Para un reemplazo de 10% de arena por calamina en un 12,55%, para un 30% de reemplazo, y en un 5,29% para el 50% de reemplazo. Sin embargo, el valor de resistencia a la compresión se incrementa en un 7,17% para el 70% de reemplazo, y nuevamente cae en un 12,12% para un reemplazo del 90% de arena por calamina.

Para la resistencia a la compresión en las muestras con 28 días de curado, respecto a la referencia, se identifica un decrecimiento del 7,45% únicamente para las muestras con el 50% de reemplazo. Hay incrementos del 9,34% para un reemplazo de 10%, del 2,05% para un reemplazo del 30% de arena, del 18,76% para el 70% de reemplazo y, finalmente, un 3,25% en el reemplazo de 90% de arena por calamina. El decrecimiento en estas muestras puede atribuirse a un error en la experimentación, o en el manejo de los cilindros para esa edad, dado que dicha tendencia no se presenta en las demás muestras con este contenido de calamina, en donde la resistencia siempre estuvo en aumento.

En las muestras que estuvieron sometidas a las condiciones ambientales durante un año luego de catorce días de curado se identificó un aumento de resistencia a la compresión

en cualquiera de los porcentajes de reemplazo. La resistencia crece un 47,84% para un 10% de reemplazo arena por calamina, un 40,44% para el 30% de reemplazo, un 57,65% para el 50% de reemplazo, un incremento 61,36% para el 70% de reemplazo (el valor más alto) y un 47,94% de incremento en la resistencia a la compresión para la mezcla con un 90% de reemplazo de arena por calamina.

En la Gráfica 9 se hace evidente que la mezcla de reemplazo del 70% de arena por calamina es la que obtiene mayor resistencia a la compresión, mientras que la muestras con 30% y 50% de calamina presentan pequeñas caídas en resistencias a edades entre 14 y 28 días de curado. El mortero aumentó su resistencia a un año para todas las mezclas con reemplazo de calamina, independientemente de la exposición al ambiente, con respecto a los datos obtenidos para las muestras y en especial para aquella con un reemplazo del 70% de arena por calamina.

Aunque para la mezcla con reemplazo del 90% se pierda resistencia, en los casos de curado de 28 días y sometidos a condiciones ambientales, la resistencia a la compresión sigue siendo mayor a la resistencia obtenida para el blanco, y solo es menor en la muestra con curado de 14 días. Estos resultados permiten determinar que el reemplazo de arena por calamina es viable y es posible realizarlo en cantidades superiores al 50%, reduciendo así la presión ante este recurso no renovable.

La NSR-10, Título D, tabla D.3.4-1<sup>22</sup>, presenta las resistencias a la compresión mínimas para un mortero empleado en mampostería. Para el tipo S se especifica al menos una resistencia de 12,5 MPa, por encima del tipo N, que tiene algunas restricciones en sistemas estructurales y exige al menos 7,5 MPa. Para las mezclas con un curado de 28 días, con reemplazos del 10% y el 70% de arena por calamina se determina un leve incremento de resistencia, pero llama la atención el efecto de ganancia (cerca del 33%) a los 365 días analizada con exposición al ambiente.

Para observar también la posible afectación de la humedad y la temperatura en el mortero, se realizaron por triplicado ensayos de curado en una cámara de ambiente controlado a

---

<sup>22</sup> Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Bogotá.

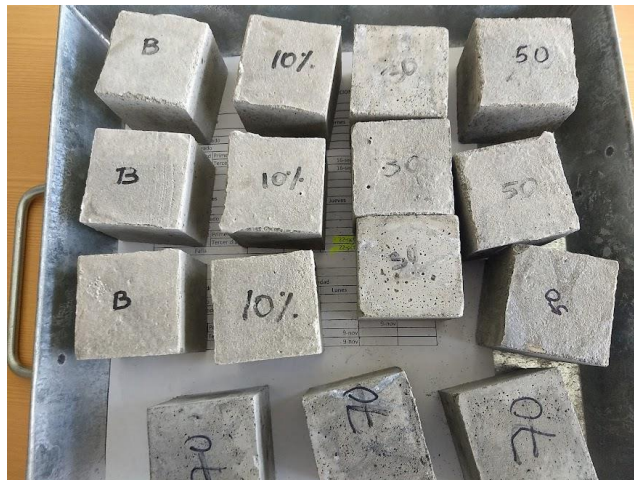
---

temperaturas de 20 °C y 35 °C, humedades relativas de 60%, 80% y 90% y durante un tiempo de 72 horas (Imagen 20). En la Imagen 22 pueden observarse que no se presenta oxidación, ni cambios perceptibles en la apariencia entre las diferentes mezclas luego de pasar por las diferentes condiciones a las que fueron sometidos.

**Imagen 20. Cámara de ambiente controlado caso de 20 °C y 90% de humedad**

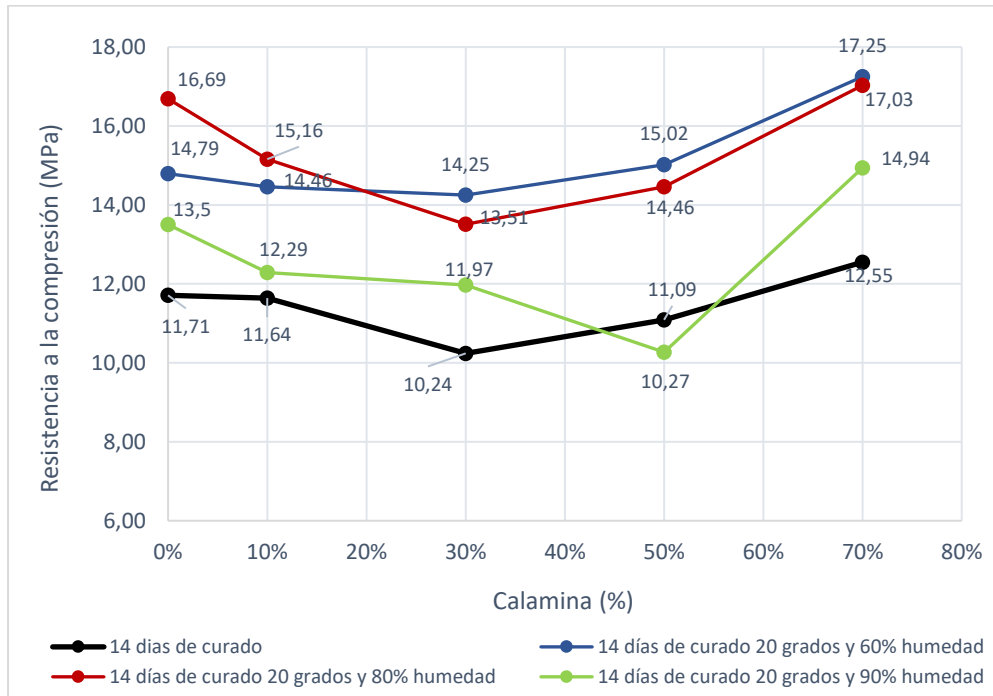


**Imagen 21. Cubos retirados de la cámara a 20 °C y 90% de humedad**



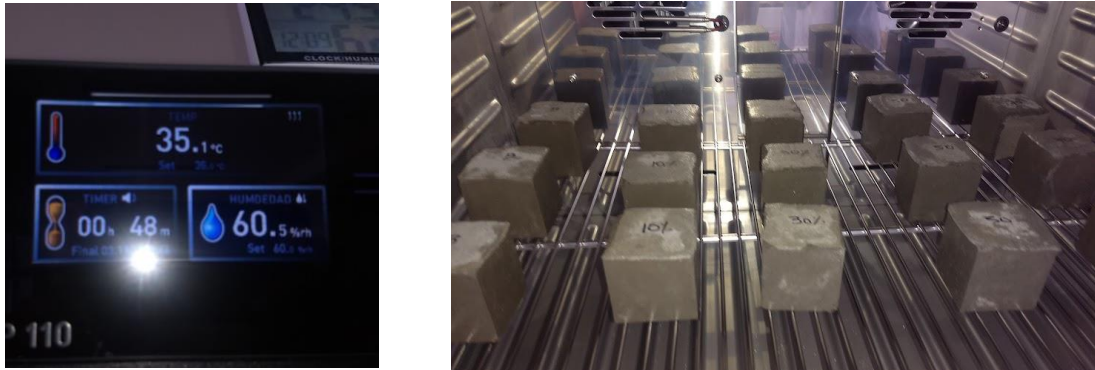
Los cubos iniciales fueron sometidos a 20 °C y 60% de humedad, 20 °C y 80% de humedad y 20 °C y 90% de humedad; y se fallaron para obtener la variación de la resistencia a la compresión en cuanto al porcentaje de calamina. Los resultados se muestran a continuación en la Gráfica 10.

**Gráfica 10. Resistencia respecto al porcentaje de calamina, a 20 °C y en condiciones húmedas**



En todos los casos, el tratamiento a 20 °C y diferentes porcentajes de humedad relativa aumenta la resistencia a la compresión de los morteros con calamina tras 14 días de curado. Sin embargo, como se observa en la Gráfica 10 para un reemplazo del 50% de arena por calamina, se identifica una variación en las tendencias observadas, debido posiblemente a un error experimental. Las muestras tratadas a 60% y 80% de humedad relativa presentan los mejores resultados de resistencia, con valores muy similares. El tratamiento con 90% de humedad disminuye la resistencia respecto a los anteriores, aunque siguen siendo mayores a los no tratados a 20 °C y humedad controlada.

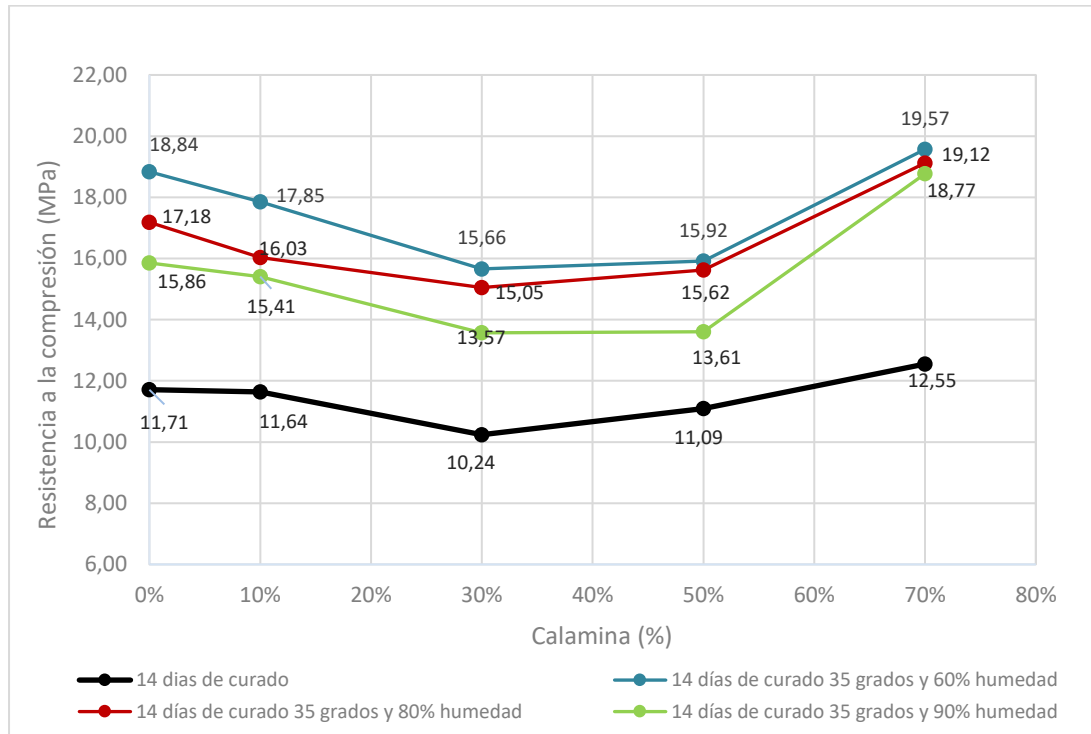
La siguiente serie de cubos se sometió a 35 °C y los mismos porcentajes de humedad relativa. En la Imagen 22 se muestran los cubos dentro de la cámara siendo sometidos a 35 °C y 60% de humedad relativa, y en la Imagen 23 su aspecto tras haber sido sometidos a estas condiciones durante 72 horas. No se presenta oxidación, ni cambios perceptibles en su apariencia.

**Imagen 22. Cámara de ambiente controlado caso de 35 °C y 60% humedad****Imagen 23. Cubos retirados de la cámara a 35 °C y 60% humedad**

Los resultados de resistencia a la compresión de los cubos de mortero tratados a 35°C y diferentes grados de humedad relativa se muestran en la Gráfica 11.

Para la mezcla de referencia y para las mezclas con un porcentaje de reemplazo del 10%, 30%, 50% y 70% de arena por calamina aumenta la resistencia en cualquiera de las tres condiciones. Todas las resistencias obtenidas para cualquier porcentaje de reemplazo fueron mayores en condiciones de cámara de humedad.

**Gráfica 11. Resistencia respecto al porcentaje de calamina, a 35 °C y en condiciones húmedas**



Adicionalmente, para todas las condiciones planteadas, se tiene que al aumentar el porcentaje de reemplazo de arena por calamina en un 10% y 30%, la resistencia a la compresión baja, y vuelve a aumentar para el reemplazo de 50% y 70% de arena por calamina.

La forma en que se fracturan las probetas puede demostrar si la fuerza aplicada sobre ella estuvo uniformemente distribuida. Al aplicar una carga axial de compresión a una velocidad normalizada, se produce una fuerza de fricción entre la placa de carga y la probeta, que genera idealmente una falla en un ángulo de 45° desde el extremo superior o inferior, que es conocida como cono de falla, esto también indica la calidad de la mezcla realizada y de los materiales usados (Calderon Linares & Burbano Cerón, 2016).

En el estudio se presentaron fracturas similares entre las muestras con curado a 14 días y 28 días y con variación de temperaturas y humedades; solo algunas de ellas presentan algo de desprendimiento lateral de material (Imagen 24), y todas ellas iniciando la fractura desde algunos de los extremos y tomando ángulo de 45°.



**Imagen 24. Fracturas observadas en las muestras.**

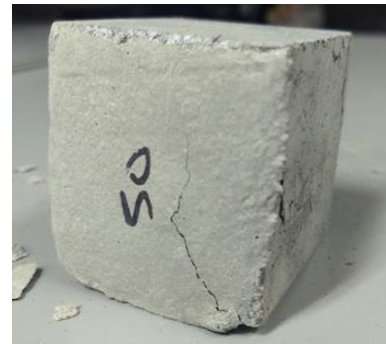
Blanco



A. 10% de reemplazo de arena



B. 30% de reemplazo de arena



C. 50% de reemplazo de arena



D. 70% de reemplazo de arena



E. 90% de reemplazo de arena

Las muestras de la mezcla patrón que tuvieron un curado de 14 días y 368 días sometidas a condiciones ambientales presentaron no solo una fractura sino un desbordamiento de material (Imagen 25). De igual manera para las probetas con porcentaje de reemplazo de arena por calamina del 10%, 30% y 50%, se presentó la destrucción de una de las probetas, fracturas cónicas y de reloj de arena, algunas con elementos paralelos. En los reemplazos de 70% y 90% no se dio destrucción, solo una fisura vertical.

**Imagen 25. Fracturas observadas en los cubos fallados a 14 días**

Blanco



A. 10% de reemplazo



B. 30% de reemplazo



C. 50% de reemplazo



D. 70% de reemplazo



E. 90% de reemplazo



### 3.2.3 Ensayos en vigas

A partir del diseño de mezcla empleado para morteros se realizó el cálculo de la cantidad de mezcla para producir vigas de 16 cm x 4 cm x 4 cm, según la norma NTC 120<sup>23</sup>. Igual que para los cubos, se emplearon mezclas basadas en el reemplazo de arena en porcentajes del 10%, 30%, 50%, 70% y 90% por calamina. En la Tabla 21 se pueden observar las mezclas y contenidos de agua empleados para la realización de las diferentes vigas. Al igual que la mezcla para los cubos, el criterio de fluidez evidencia una disminución en el agua requerida para la mezcla de concreto con un reemplazo del 70% con calamina.

**Tabla 21. Diseño de mezclas para vigas de morteros.**

Cemento (g)	Arena (g)	Calamina (g)	Porcentaje (%)	Agua (ml)	Porcentaje (%)
500	1.375,0	0,00	0%	410	22%
500	1.237,5	137,50	10%	414	22%
500	962,5	412,50	30%	418	22%
500	686,0	687,50	50%	380	20%
500	412,5	962,50	70%	360	19%
500	137,5	1.237,50	90%	370	20%

Se fabricaron tres vigas para cada mezcla (Imagen 26), y fueron sometidas a 28 días de curado antes de la falla.

---

<sup>23</sup> NTC 120. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico

---

**Imagen 26. Producción de vigas de mortero con y sin reemplazo de arena.**

A. Mortero sin reemplazo de arena.

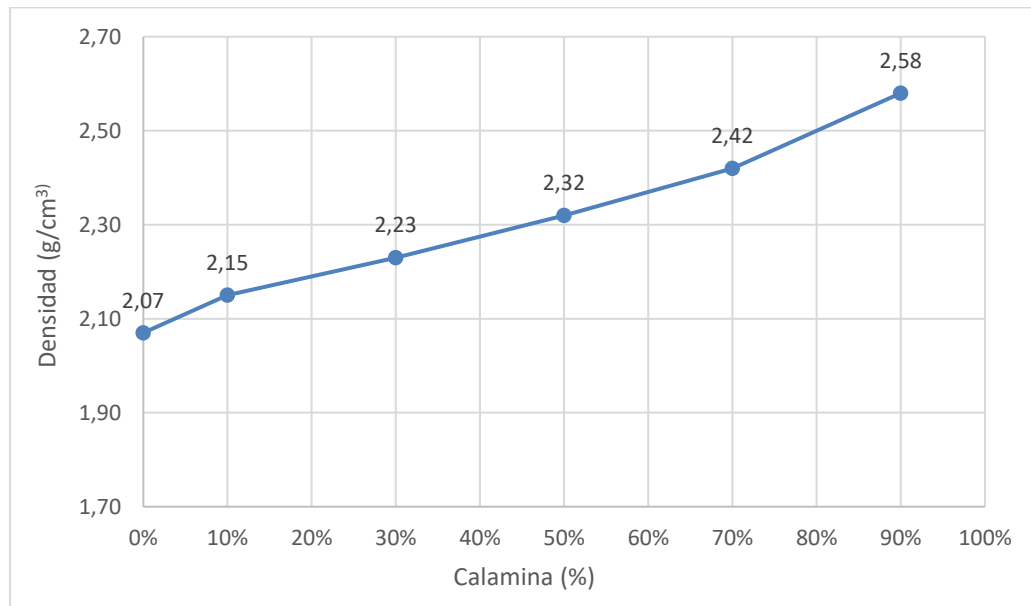


B. Mezcla con el 90% de reemplazo de calamina.

**3.2.3.1 Densidad**

Luego de que cada serie de muestras cumpliera los 28 días de curado, se sacaron del tanque (Imagen 27) y se realizó el cálculo de densidades a partir del peso y sus medidas. Los resultados se presentan en la Gráfica 12.

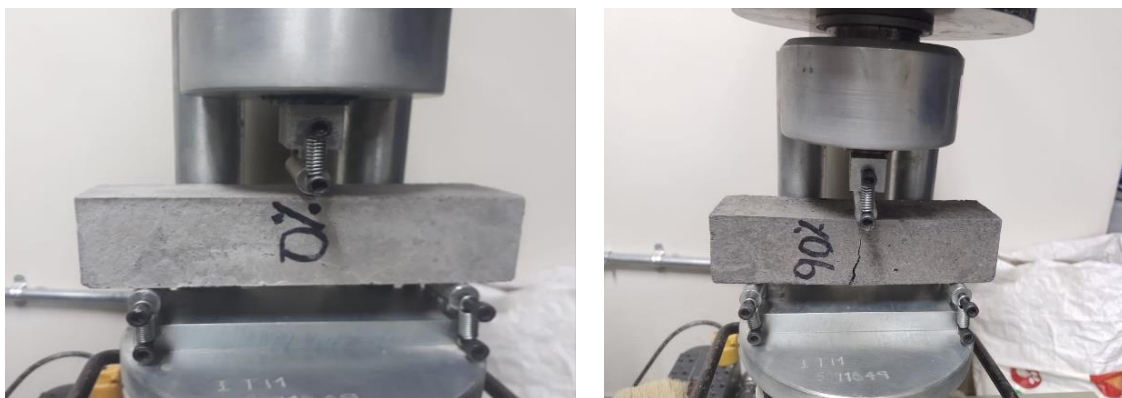
**Imagen 27. Curado y preparación del ensayo a flexión en vigas**

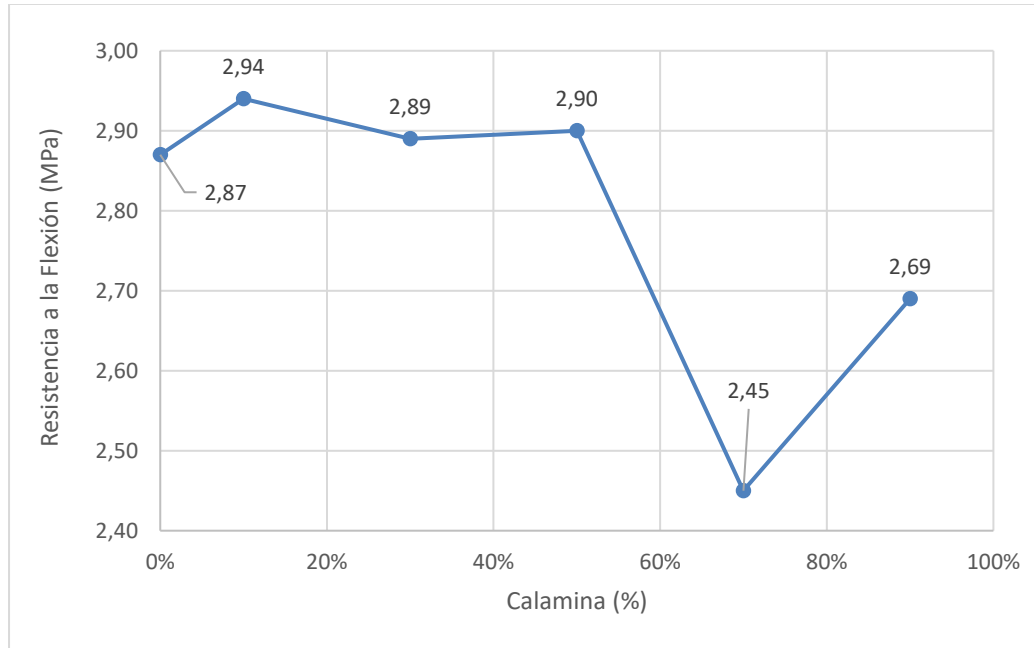
**Gráfica 12. Densidad de las vigas con respecto al porcentaje de calamina**

Como era de esperar, la densidad obtenida en las vigas aumenta respecto a la mezcla de referencia debido a la inclusión de la calamina.

### 3.2.3.2 Resistencia a la flexión

Este ensayo se realizó teniendo en cuenta las indicaciones dadas en la norma NTC 120. El ensayo puede observarse en la Imagen 28 y los resultados obtenidos de resistencia a la flexión se muestran en la Gráfica 13.

**Imagen 28. Ensayo de resistencia a la flexión en vigas**

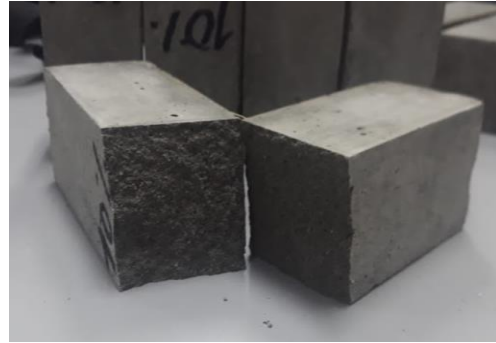
**Gráfica 13. Resistencia a la flexión con respecto al contenido de calamina**

La resistencia a la flexión obtenida, en comparación con la mezcla de referencia, se incrementa en un pequeño porcentaje, por lo que se puede decir que la resistencia a la flexión se conserva para los valores de reemplazo del 10%, 30% y 50%, sin embargo, para los reemplazos del 70% y 90% de arena por calamina, disminuye. No obstante, al no variar la resistencia en los porcentajes de reemplazo iniciales, esto puede permitir el uso de este residuo y disminuir el consumo de un recurso no renovable, sin comprometer la resistencia del producto final. La variación que se presenta en el porcentaje del 70%, en el cual se esperaba una disminución menos abrupta, puede atribuirse a la humedad de arena o una posible mezcla de esta en el laboratorio.

En la Imagen 29 se presenta una serie de fotografías detalladas de las caras falladas de las vigas para cada mezcla analizada.

**Imagen 29. Fracturas observadas en las muestras según contenido de Calamina**

A. Blanco



B. 10% de reemplazo de arena



C. 30% de reemplazo de arena



D. 50% de reemplazo de arena



E. 70% de reemplazo de arena



F. 90% de reemplazo de arena

**3.2.4 Fabricación de baldosas**

Una baldosa es un placa prefabricada de pequeño espesor, forma rectangular o de polígono regular y diferentes tamaños, destinada principalmente al recubrimiento de pisos (ICONTEC, 1976). Para realizar el diseño de mezcla se tomó como punto de partida la dosificación encontrada para morteros, teniendo en cuenta que los tamaños de las

baldosas son de 250 mm por 250 mm, con un espesor de 30 mm (Tabla 22), siguiendo las indicaciones dadas en la norma NTC 1085<sup>24</sup>. Se fabricaron tres baldosas por diseño de mezcla y se sometieron a curado por 28 días (Imagen 30 e Imagen 31).

**Tabla 22. Dosificaciones para la fabricación de las baldosas**

Cemento (g)	Arena (g)	Calamina (g)	Agua (ml)
1.210	3.328	0%	750
1.210	2.995	10%	760
1.210	2.329	30%	770
1.210	1.664	50%	678
1.210	998	70%	653

**Imagen 30. Fabricación y vaciado de las baldosas**



<sup>24</sup> Norma NTC 1085: Baldosas de Cemento



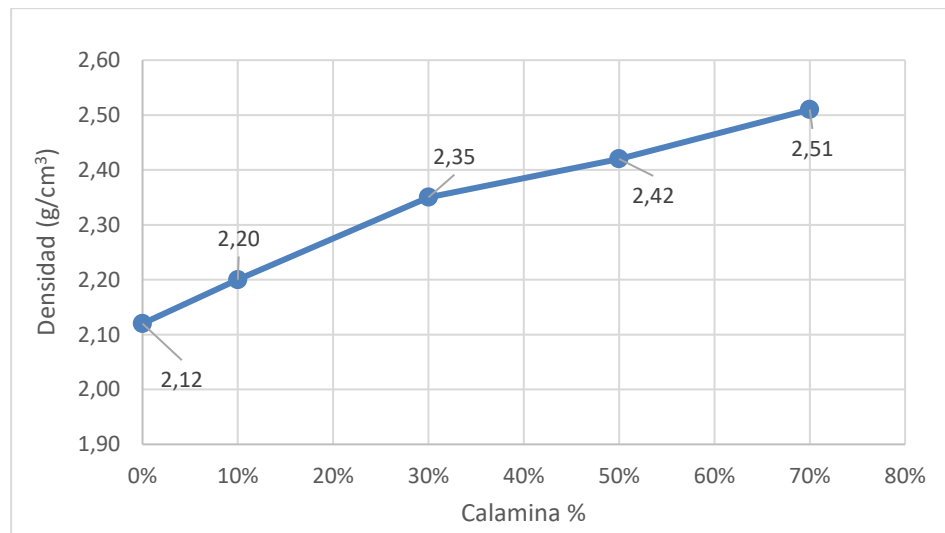
**Imagen 31. Curado de las baldosas**



### 3.2.5 Ensayos y resultados para baldosas

Luego del curado de las baldosas, éstas fueron medidas y pesadas para observar la variación de la densidad con respecto al porcentaje de sustitución de arena por calamina. Estos resultados se presentan en la Gráfica 14.

**Gráfica 14. Densidad de baldosas respecto al reemplazo de calamina**



La densidad aumenta como era de esperarse por la inclusión de este material de reemplazo, teniendo en cuenta que se observa un incremento final del 18,4% para la mezcla con reemplazo de arena del 70%.

### 3.2.5.1 Ensayo de flexión en baldosas

De acuerdo con las indicaciones dadas en la norma NTC 1085<sup>25</sup>, se llevó a cabo el ensayo de flexión para las baldosas obtenidas con cada mezcla. En la Imagen 32 se puede observar las fracturas obtenidas en algunas de las baldosas, y en Gráfica 15 los resultados obtenidos.

**Imagen 32. Fracturas del ensayo de flexión**

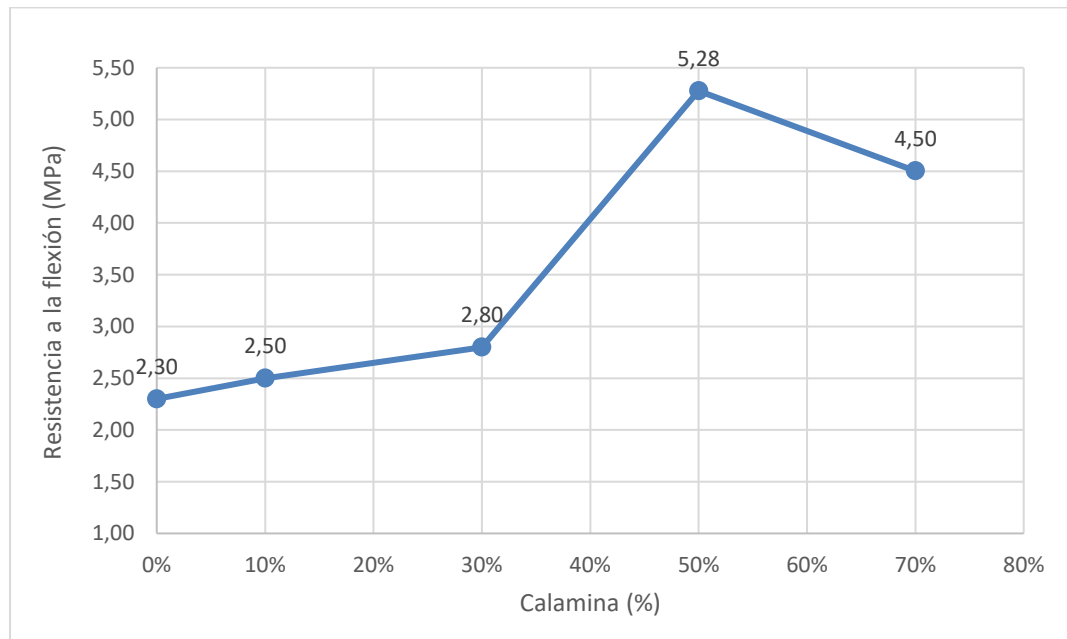


---

<sup>25</sup> Norma NTC 1085: Baldosas de Cemento

---



**Gráfica 15. Resistencia a la flexión en baldosas respecto al reemplazo de calamina**

La resistencia a la flexión aumenta para todas las muestras con reemplazo de calamina con respecto a la mezcla de referencia. Para un reemplazo del 10% de arena por calamina la resistencia aumenta en un 8,70%; para un reemplazo del 30% se incrementa en un 21,74%, para el reemplazo del 50% el aumento es de un 129,57% y, finalmente, se identifica un incremento del 95,65% en la resistencia para un reemplazo del 70% de arena por calamina. Es de anotar que se debe tener en cuenta el aumento de la densidad para determinar el desempeño y función de la baldosa a usar.

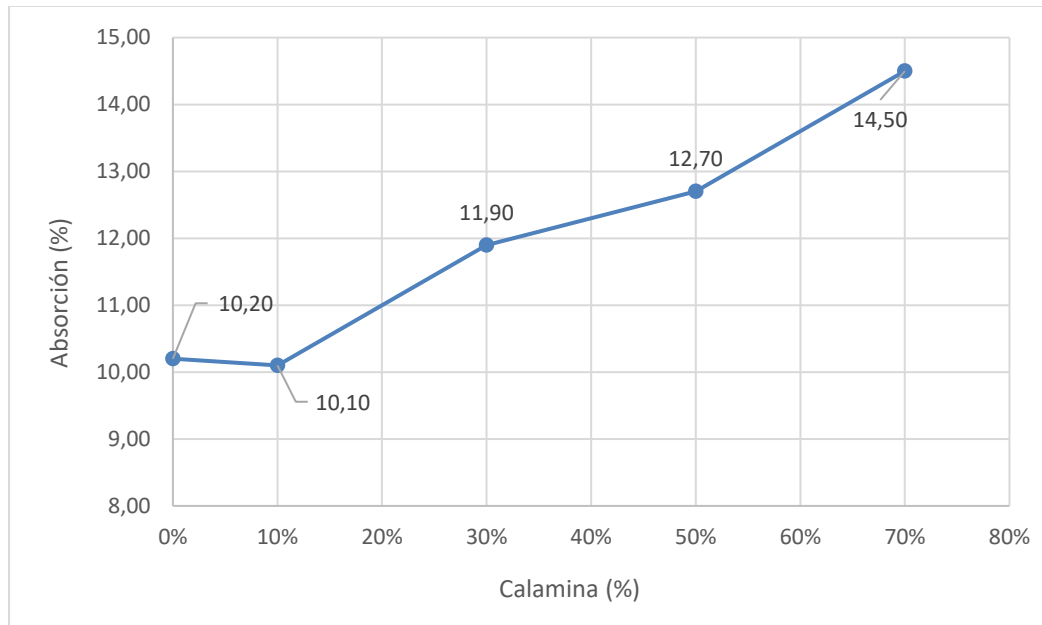
### 3.2.5.2 Ensayo porcentaje de absorción en baldosas

Este ensayo fue realizado según la norma NTC 2849<sup>26</sup>. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Gráfica 16.

---

<sup>26</sup> Norma NTC 2849 (2017): Baldosas con superficie de grano terrazo

---

**Gráfica 16. Porcentaje de absorción respecto al reemplazo de calamina**

El porcentaje de absorción aumenta a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de arena por calamina, excepto en la mezcla que contiene 10% de reemplazo. La disminución para dicha mezcla es muy pequeña (0,98%) en comparación con la mezcla de referencia, que no contiene calamina.

Para los demás contenidos se incrementa el porcentaje de absorción, teniendo que para el reemplazo del 30% la absorción aumenta en un 16,67%, para uno del 50% se incrementa en un 24,51% y finalmente se identifica un aumento del 42,16% de la absorción para un reemplazo del 70% de arena por calamina. Se deberá tener en cuenta este porcentaje de absorción ya que la mezcla con reemplazo del 50% fue la mejor en cuanto la resistencia a la flexión, por lo que se deberán tomar medidas para que las baldosas no sean tan susceptibles a las condiciones ambientales, a las cuales pueden estar sometidas.

### 3.3 APLICACIÓN EN BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA

Los bloques de tierra compactada (o comprimida) (BTC) son materiales de construcción que reemplazan los ladrillos cocidos; son fabricados con una mezcla de tierra y un material estabilizante, como cal, cemento o incluso arcilla. Es una mezcla compactada y moldeada

utilizando una prensa mecánica desarrollada en la década de los 60 por el ingeniero chileno Raúl Ramírez (Cañola et al., 2018), denominada CINVA-Ram.

Los BTC varían en los elementos de adición de material estabilizante, acorde con las proporciones existentes en el sitio y su composición química, como pueden ser el cemento y la cal. El primero de ellos (suelo-cemento) se emplea cuando el suelo presenta una mayor proporción de arenas o limos; el segundo (suelo-cal), cuando la presencia de suelos finos (principalmente arcillosos) es más representativa, lo que da cuenta de la variabilidad de las opciones de aplicación de la tecnología. Algunas investigaciones se limitan a preseleccionar la cantidad de estabilizante según la proporción de arena y suelo seleccionada (Sitton et al., 2018) (A. Acosta Valle, 2001).

Los rangos de desempeño de los bloques de tierra compactada o los bloques de suelo cemento (como figuran en la norma NSR10<sup>27</sup>) fabricados con la CINVA-Ram se establecen en la Norma Técnica Colombiana NTC 5324<sup>28</sup> (NTC 5324, 2005). Se definen allí tres diferentes categorías (BSC20, BSC40 y BSC60) relacionadas con la resistencia a la compresión requerida para ser empleados en paramentos (fachadas), como bloques accesorios para amarre, dinteles y columnas o como formaleta para el vaciado de estructuras de concreto reforzado en sistemas de mampostería confinada.

Para la producción de bloques de tierra compactada se requiere de una mezcla de suelo y cemento respectivamente (generalmente es de 9:1), y de una prensa que comprime el material humedecido hasta obtener un mampuesto que, a catorce días de su confección, está en condiciones óptimas para ser instalado en la obra (NTC 5324, 2005). Una de las ventajas del BTC con respecto a otros prefabricados para mampostería es la posibilidad de ser producido en el sitio sin necesidad de instalaciones costosas con altos consumos de energía (Bolaños, 2007). Esta última cualidad permite inferir la pertinencia que tiene esta técnica para la construcción de proyectos de vivienda en zonas rurales (C. M. Bedoya, 2018)

---

<sup>27</sup> Norma NRS-10: Reglamento colombiano de construcción sismo resistente

<sup>28</sup> Norma NTC 5324: Bloques de suelo cemento para muros y divisiones

---

### 3.3.1 Dosificaciones para Mezcla de BTC

Para determinar la dosificación de las mezclas se realizó inicialmente el estudio del material (arena y suelo) del que se disponía. Se efectúa un ensayo de granulometría y se diferencian los materiales, teniendo en cuenta que se considera “Arena” (A) el material que pasa tamiz ASTM #10 y se retiene en el ASTM #40 y de igual manera para el “Fino” (F), que será aquel material que pasa el tamiz ASTM #40.

Para el material Fino se emplean muestras obtenidas en el corregimiento de San Cristóbal, procedentes de un talud del borde derecho de la carretera que conduce de Medellín a San Jerónimo, 500 metros antes del peaje existente. Para la Arena se emplea arena de revoque lavada, según la granulometría mencionada anteriormente. Arena, cemento, suelo y agua se alternan en tres tipos de mezcla, que se definieron como se muestra en Tabla 23.

El procedimiento para la elaboración de los bloques requiere el secado y cernido previo de los componentes, según sus clasificaciones. Es recomendable almacenarlos en recipientes cerrados o bajo cubierto, de forma que no se altere la humedad antes de la mezcla. Se pesan y mezclan cada uno de ellos hasta obtener una masa homogénea, sin grumos, la cual se vierte en la tolva superior de la prensa manual.

**Tabla 23. Mezclas de materiales analizadas en los BTC.**

Material	Mezcla analizada (porcentajes de material)			
	A30F60C10	A40F50C10	A50F40C10	A60F30C10
Arena (A)	30%	40%	50%	60%
Fino (F)	60%	50%	40%	30%
Cemento (C)	10%	10%	10%	10%
Total	100%	100%	100%	100%

Para cada una de estas mezclas se realizaron ensayos de determinación del contenido óptimo de humedad en las diferentes mezclas mediante ensayos de Compactación Proctor Estándar (Norma ASTM D-698<sup>29</sup> o INV E-141-07<sup>30</sup>), densidad, abrasión, capilaridad y

<sup>29</sup> Norma ASTM D698: Compactación Proctor Estándar

<sup>30</sup> Norma INV E-141-07: Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos

resistencia a la compresión seca, con lo cual se determinó cuál de estas mezclas era la que presentaba mejores resultados y de esta forma orientar el reemplazo con el residuo metalmecánico. Para los ensayos se fabricaron entre 10 y 12 bloques para cada mezcla, teniendo en cuenta que para cada uno de los ensayos realizados se tomarían tres de cada una estas mezclas (véase el Anexo C para diseño de mezcla).

La mezcla seleccionada para realizar la comparación fue la A50F40C10, compuesta por un 50% de arena, 40% de fino y 10% cemento. A esta mezcla se le hicieron inclusiones del 10%, 30% y 50% de calamina en reemplazo de la arena, lo que implica que se han reemplazado el 20%, el 60% y el 100% de la arena incluida inicialmente.

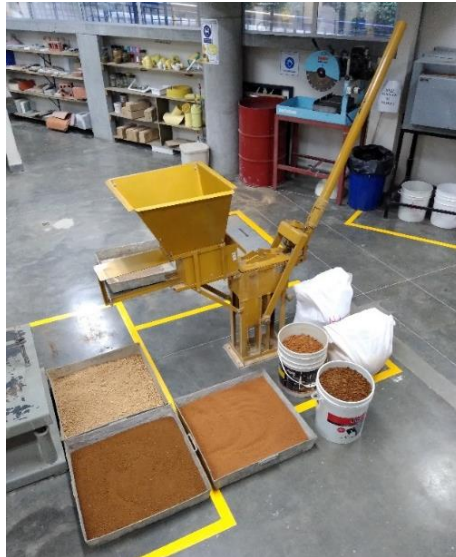
La calamina se pasa por el tamiz ASTM #10 para evitar cualquier partícula de sobretamaño respecto a la de la arena original. En la Tabla 24 se pueden ver las dosificaciones correspondientes.

**Tabla 24. Dosificaciones de la mezcla con calamina**

Material	Porcentajes		
	Arena (A)	40%	20%
Calamina (CAL)	10%	30%	50%
Fino (F)	40%	40%	40%
Cemento (C)	10%	10%	10%
TOTAL	100%	100%	100%

A las mezclas se les realizan nuevamente los ensayos realizados desde la evaluación del contenido óptimo de humedad, se preparan según la humedad encontrada (véase más adelante el numeral 3.3.2.1). Para la fabricación de las unidades se emplea la CINVA-Ram existente en el Laboratorio de Construcción del ITM, de marca GRACOMAQ (Imagen 33), y se atienden las instrucciones del fabricante y las directrices impartidas por el personal del laboratorio.

**Imagen 33. CINVA-RAM del Laboratorio de Construcción del ITM**



Los elementos se retiran de la CINVA-Ram y se ubican en un sitio ventilado para su curado por 28 días, antes de iniciar con los ensayos incluidos en la NTC 5324. En las siguientes figuras se observa le proceso realizado en el laboratorio para la construcción de los BTC.

**Imagen 34. Bloques macizos de tierra compactada obtenidos para el análisis**



Para el curado de los BTC se puede implementar un sistema de rociado de agua, o efectuar una humectación manual durante al menos los siete primeros días de curado. Para el estudio se efectuó una humectación manual.

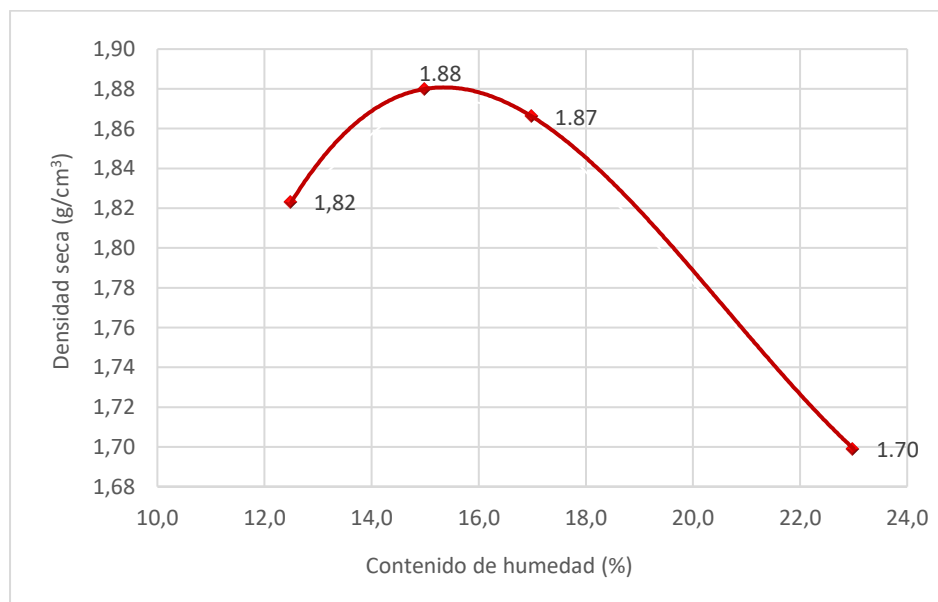
**Imagen 35. Curado de los BTC en el laboratorio de construcción****3.3.2 Ensayos y resultados****3.3.2.1 Ensayo Proctor**

Este ensayo se realiza previo a la fabricación de los BTC. Se selecciona el ensayo Proctor Estándar y no el Proctor Modificado debido a que éste representa mejor las condiciones de compactación manual de una masa de suelo como la empleada para la fabricación de los bloques.

Para la determinación del contenido óptimo de humedad en las diferentes mezclas empleadas en el proceso de elaboración de los BTC se realizan ensayos de Compactación Proctor Estándar (norma ASTM D-698 o INV E-141-07). Es preciso recalcar que el ensayo incluye únicamente la Arena (A) con reemplazo de calamina y el Fino (F) para no iniciar procesos de fraguado en el material y poderlo emplear en los bloques. La Imagen 36 muestra detalles del proceso adelantado.

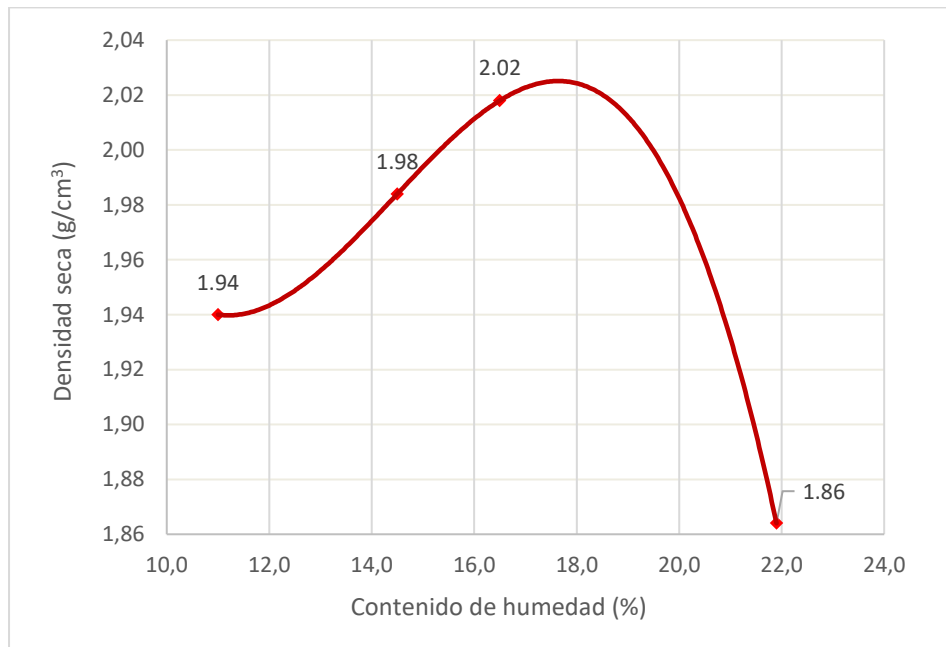
**Imagen 36. Ensayo de Proctor Estándar para la mezcla.**

En los siguientes gráficos se puede observar los resultados obtenidos para cada una de las mezclas determinadas, con la inclusión de un porcentaje de calamina como reemplazo. El resultado con reemplazo del 20% de arena por calamina en el bloque se presenta en la Gráfica 17, el reemplazo del 60% en la Gráfica 18 y el reemplazo total de la arena en la Gráfica 19.

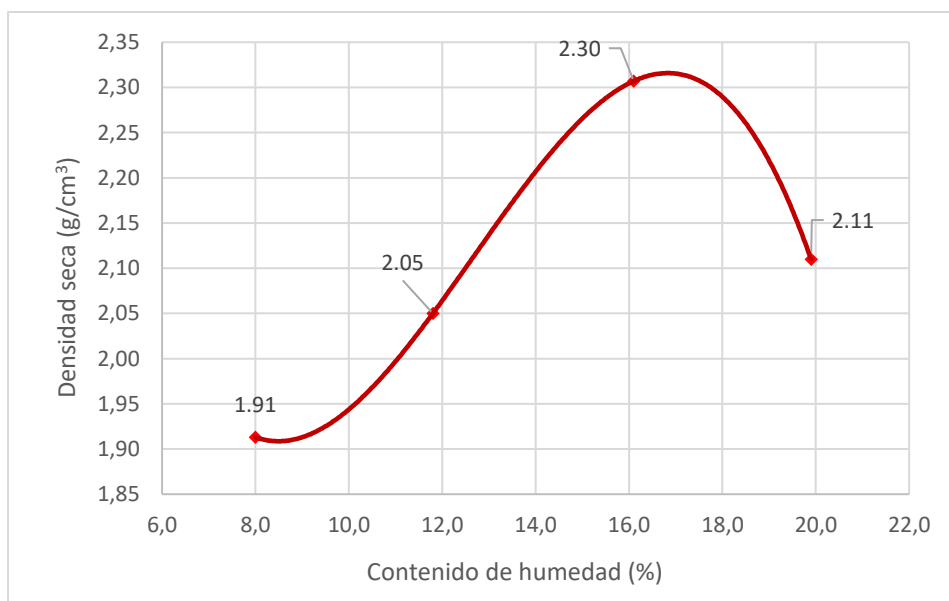
**Gráfica 17. Ensayo Proctor Estándar para mezcla con reemplazo del 20%**



**Gráfica 18. Ensayo Proctor Estándar para mezcla con reemplazo del 60%**



**Gráfica 19. Ensayo Proctor Estándar para mezcla con reemplazo del 100%**

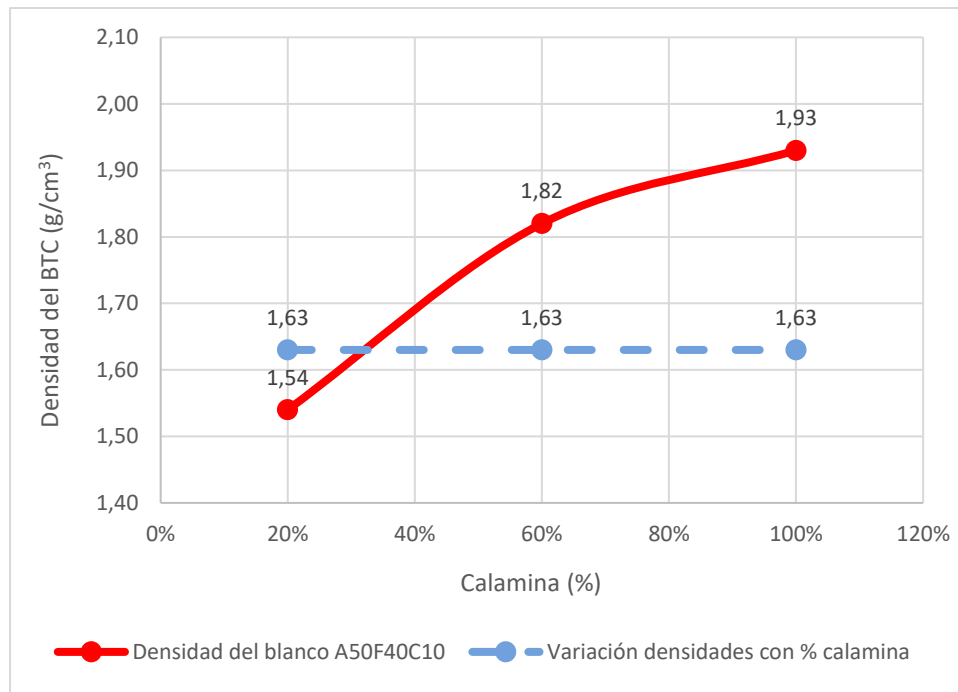


Este ensayo permitió definir la humedad óptima necesaria para alcanzar la densidad seca máxima del suelo, y así moldear los bloques para cada una de las mezclas.

### 3.3.2.2 Densidad

En las gráficas siguientes podrá observarse la variación de la densidad de los BTC con inclusión de calamina, comparada con la densidad de la mezcla de referencia, con Arena en un 50%, Fino en un 40% y Cemento en un 10%, denominada A50F40C10 (línea punteada), y cuya dosificación se presentó anteriormente en la Tabla 23.

**Gráfica 20. Densidad del BTC respecto a la inclusión de calamina**



En la Gráfica 20 se puede observar que la densidad del bloque disminuye en un 5,52% con la inclusión a la mezcla de 20% de calamina, y se incrementa en un 11,4% con la inclusión del 60% y un 18,3% con la inclusión del 100% de calamina. A mayor contenido de calamina, mayor el peso, como era de esperarse.

### 3.3.2.3 Coeficiente de Abrasión (Ca)

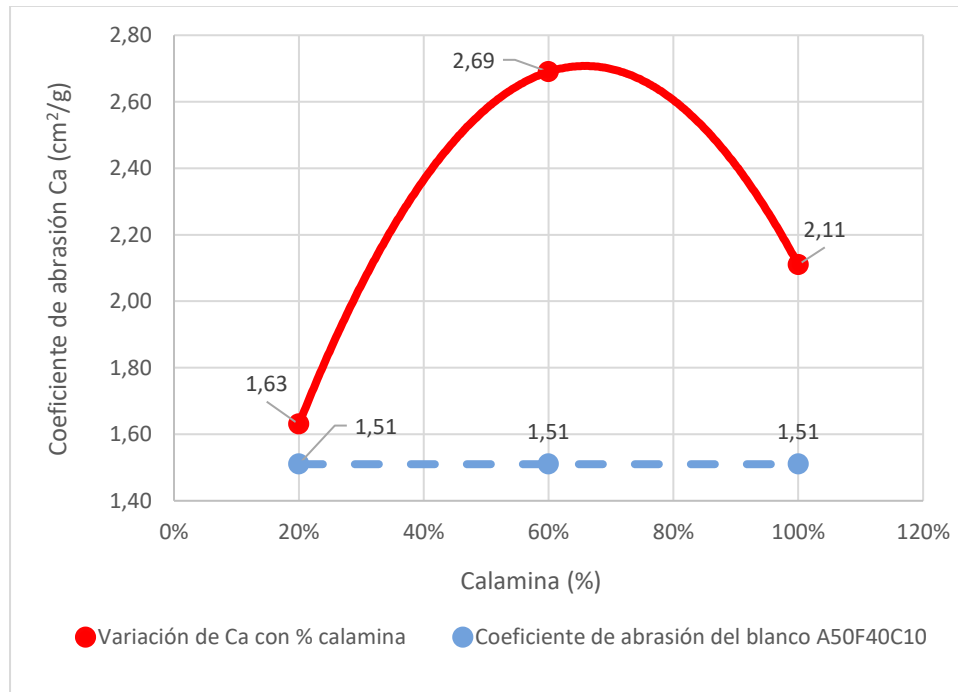
Se emplea para determinar el comportamiento de cualquier material frente al desgaste que producirá un agente externo, de acuerdo con lo contenido en el numeral 4.7 de la norma NTC 5324 (NTC 5324, 2005). Para el ensayo se somete cada muestra a una abrasión producida por un cepillo de alambre con un peso adicionado de 3.000 gramos. Se toma el

peso inicial del bloque y el peso final, luego de pasar 60 veces en un minuto dicho cepillo de lado a lado del bloque. En la Imagen 37 se ilustra el ensayo de abrasión realizado.

**Imagen 37. Ensayo de abrasión según norma NTC 5324**



En la Gráfica 21 se presenta la variación del Coeficiente de Abrasión (Ca) con el reemplazo de la arena por calamina, comparado con la mezcla de referencia A50F40C10 de referencia (línea punteada).

**Gráfica 21. Coeficiente de Abrasión (Ca) respecto a la inclusión de calamina**

Se puede observar que el coeficiente se incrementa en todos los porcentajes, con un 10,7% más para una inclusión del 20% de calamina, un 77,8% para una inclusión del 60% y un 39,3% para una inclusión del 100% de la calamina (reemplazo total de la arena). Por tanto, en este caso la mezcla optima corresponde al 60% de calamina, 40% de arena, lo que permite que se disminuya el consumo de arena y los impactos generados en la extracción de este recurso no renovable.

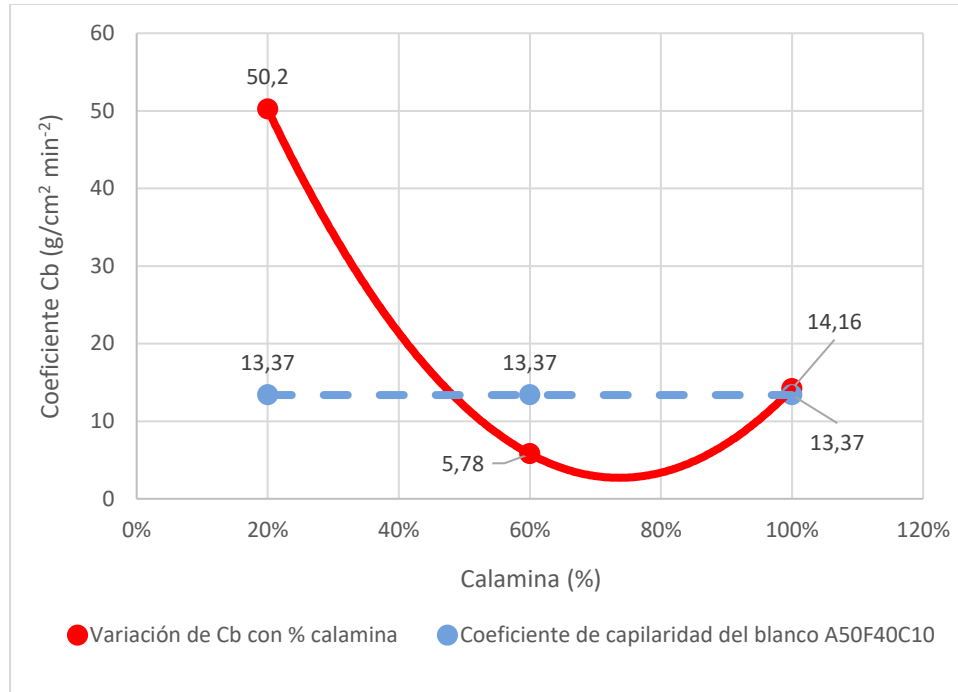
### 3.3.2.4 Capilaridad

La capilaridad es un fenómeno a través del cual los líquidos tienen la capacidad de subir o bajar a través de un elemento permeable. El ensayo se encuentra definido en el numeral 4.3 de la norma NTC 5324 (NTC 5324, 2005). En el ensayo se determina la cantidad de agua que sube en el bloque sumergido una profundidad de 5 milímetros por un tiempo de 10 minutos, a un nivel constante (Imagen 38). En la Gráfica 22 se presenta la variación del Coeficiente de Capilaridad (Cb) para los bloques con reemplazo de calamina

**Imagen 38. Ensayo de capilaridad según norma NTC 5324**

Se observa en la Gráfica 22 que el coeficiente de capilaridad con 20% de inclusión de calamina en la mezcla aumenta en un porcentaje superior al 250%, con una inclusión del 60% por calamina en la mezcla se presenta una disminución del coeficiente del 56,8% y finalmente con una inclusión del 100% de calamina (reemplazo total de la arena) se presenta un aumento de 7,40% en el coeficiente de capilaridad.

Con este ensayo se determina también que la mejor mezcla es la que contiene el 60% de calamina, ya que tiene el mínimo valor de capilaridad, corroborando el dicho popular “buen sombrero, buena botas”, lo que ayuda a que los cimientos y muros no se debiliten, disminuyendo su resistencia y la degradación de los materiales.

**Gráfica 22. Coeficiente de Capilaridad (Cb) respecto a la inclusión de calamina**

### 3.3.2.5 Ensayo Resistencia a la Compresión Seca

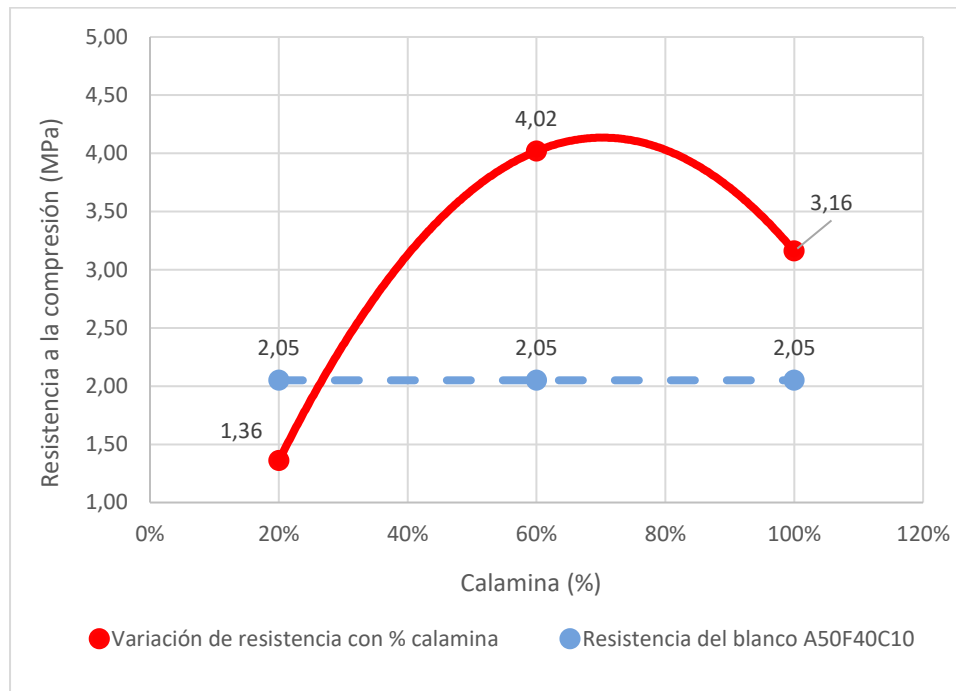
Es la característica mecánica principal del suelo. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm<sup>2</sup>, MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (PSI). El ensayo se adelanta según lo consignado en el numeral 4.5 de la norma NTC 5324 (NTC 5324, 2005). Requiere la preparación de unas probetas de falla, consistentes en dos mitades superpuestas del mismo bloque, con las caras irregulares resultantes orientadas en lados opuestos, unidas por una mezcla de mortero y un pañete de nivelación de hasta 1 cm de espesor, preparado con pasta de cemento, tanto para la superficie superior como la inferior.

En la Imagen 39 se muestra el grupo de probetas preparadas de cada una de las mezclas en la fase de secado para el proceso de falla. Como parámetros del ensayo en la prensa del laboratorio se empleó una velocidad de 0,15 m/s y una sensibilidad de 5 kN en la medida y en la Imagen 40 se puede observar la falla de una de las muestras.

**Imagen 39. Probetas para el ensayo de Resistencia a la Compresión Seca****Imagen 40. Probeta fallada luego de la aplicación de la carga**

En la Gráfica 23 puede observarse la variación de la resistencia a la compresión seca para las mezclas con inclusión de calamina en reemplazo de la arena. La resistencia disminuye en un 33,6 % para una inclusión del 20% de calamina, sin embargo, al aumentar al 60% de inclusión se incrementa en un 96,4% esta resistencia. De igual manera, con un reemplazo total de la arena por calamina se obtiene un incremento del 54,6%. Por lo que, a mayor contenido de calamina, esta resistencia va aumentando, lo que favorece el uso de este residuo como reemplazo de un recurso natural no renovable.

**Gráfica 23. Resistencia a la compresión del BTC respecto a la inclusión de calamina**



Luego de realizar estos ensayos se determina que la mezcla con un reemplazo de arena en la mezcla del 60% presenta una mayor aplicabilidad, dado que tiene una mayor resistencia, su coeficiente de capilaridad es menor y tiene el mayor coeficiente de abrasión y permite una disminución del uso de arena.

La norma india IS 1795, al igual que la brasilera, evalúan la resistencia a la compresión de bloques saturados, estableciendo que la resistencia de los BTC debe ser como mínimo 2,0 MPa para un elemento no portante y de 3,5 MPa para uno portante. (Cabrera, González, & Rotondaro, 2020). Se puede decir, por lo tanto, que los BTC encontrados con reemplazo de 60% de arena por calamina cumplen con las especificaciones dadas por estas normas para los BTC portantes.



## 4 EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

El sistema productivo actual consume recursos naturales a un ritmo superior al de su regeneración, y se producen residuos a un ritmo superior al de su absorción. Si se analizan las condiciones requeridas para el desarrollo sostenible, *“ningún recurso no renovable deberá aprovecharse a mayor velocidad de la necesaria para sustituirlo por un recurso renovable utilizado de manera sostenible”*, además, *“ningún contaminante deberá producirse a un ritmo superior al que pueda ser reciclado, neutralizado o absorbido por el medio ambiente”* (Comisión Brundtland, 1987).

Si se analiza la definición de desarrollo sostenible como “aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones”, los seres humanos tienen la obligación de resolver los problemas que afectan la calidad de vida actual, sin comprometer la posibilidad de que las futuras generaciones puedan disponer de los recursos necesarios para solucionar los que se les presenten.

En cuanto a la arena, recurso a reemplazar en este trabajo, el documento presentado por la ONU *“Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis”* presenta varias alternativas para tratar de disminuir los impactos generados por la extracción de la arena. La estrategia 8, denominada *“Promote resource efficiency & circularit”* promueve la economía circular, donde se propone el uso de residuos de la demolición de construcciones, de la misma explotación y de otras industrias para reemplazar la grava y la arena, de forma que puedan asemejar las propiedades de los agregados y así disminuir la extracción de estos recursos. Las estimaciones actuales indican que a nivel mundial, se utilizan 40-50 mil millones de toneladas métricas de arena por año, un promedio aproximado de 18 kg por persona y día (ONU, 2022).

Acosta y Cilento (Acosta & Cilento, 2005) afirmaron que *“...la posibilidad de desarrollar sistemas y tecnologías que reduzcan sustancialmente la extracción de materias primas de los ecosistemas naturales, que reutilicen y reciclen todos los residuos y desechos de la construcción y de otros procesos industriales, es una meta que debería estar presente en todos los esfuerzos destinados a racionalizar ambientalmente el sector de la construcción”*. Posibilidad que se estaría abordando con el reciclaje de la calamina y su uso en el sector

de la construcción, disminuyendo así la extracción de un recurso natural finito, como es la arena.

La valorización de los residuos, y en particular los de la industria metalmeccánica, mediante su uso en el sector de la construcción es una alternativa para disminuir los impactos generados por éstos, lo que ha sido objeto de varias investigaciones. Sin embargo, el uso de la calamina proveniente de la limpieza inicial del acero antes de realizar la laminación o trefilación en frio donde se usan aceites lubricantes, no ha sido estudiado. La disposición que se hace de este residuo puede llegar a generar impactos en el agua, suelo y aire, y son necesarios estudios que aborden este tipo de residuos, aportando a los aspectos no solo ambientales, sino también sociales y económicos. (Alwaeli, 2016; Furlani & Maschio, 2016).

A continuación, se abordarán estos aspectos de acuerdo con las investigaciones o estudios técnicos disponibles, y una pequeña investigación sobre los agregados disponibles en Antioquia y la disponibilidad del residuo.

#### **4.1 ASPECTOS AMBIENTALES**

La arena y la grava representan el mayor volumen de materia prima utilizada en la tierra después del agua, y debido al rápido crecimiento del sector de la construcción, la cantidad que se extrae aumenta exponencialmente (ONU, 2022). Al usar calamina en las mezclas para los productos investigados se obtuvieron excelentes resultados con reemplazos entre el 30% y el 70% de los agregados naturales no renovables, lo que tendría varios beneficios para la zona en la que se encuentra el proyecto, en este caso el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Menos materias primas no renovables explotadas y menos materiales dispuestos en vertederos son impactos positivos cuantificados.

Las 16 toneladas mensuales de calamina que genera la empresa Postelectras S.A.S. pueden incorporarse directamente en los concretos fabricados en ella misma en los porcentajes referidos y sin deterioro de la resistencia de los elementos mismos. Este es un doble efecto positivo, tanto en la disminución directa de la misma masa de extracción de materia prima y en la disposición del residuo.

---

En los resultados se puede observar también que en los diseños de mezclas obtenidos se disminuye la cantidad de agua usada para la elaboración de los materiales de construcción. En los diseños de mezclas de morteros, baldosas y BTC se presentó una disminución del consumo de agua para los porcentajes de 50% y 70% de reemplazo de arena por calamina, los que supone una reducción de costos en su fabricación y una disminución en la presión por el uso del recurso hídrico, espacialmente. Se estima que este sector es responsable de un 20% del consumo de agua a nivel global (Pernett, 2012).

## **4.2 ASPECTOS ECONÓMICOS**

En investigaciones realizadas con la sustitución de agregados por residuos se ha obtenido que el concreto producido tiene un costo de hasta un 30% menor que el concreto convencional (Balaguera et al., 2018). Los resultados de este trabajo muestran que, al estar sustituyendo del 30% al 70% de la arena por calamina en cada uno de los productos analizados, tenemos que podría presentarse una reducción de costos ya que solo 1 metro cúbico de arena tiene un costo aproximado de \$70.302, costo en el cual está incluido el transporte, que es aproximadamente de \$1.000 por kilómetro recorrido.

En el caso de los BTC, se tiene en cuenta únicamente el valor de la arena y del cemento que se requieren, ya que el porcentaje de suelo que se use debe ser producto de la excavación del lugar donde se realizará la construcción. La producción y uso de BTC supone al menos un ahorro del 75% con respecto a ladrillos cocidos (P. Gatani, 2000), pero con un reemplazo del total de la arena por residuos de calamina este ahorro se podría incrementar, según el sitio de implementación de la medida.

Las baldosas producidas en este trabajo podrían ser usadas en bodegas de tráfico pesado, ya que su resistencia aumentó considerablemente, lo que podría llevar también a una disminución de costos de adquisición o fabricación por el uso del residuo, con una mejor resistencia y una mayor durabilidad.

En cuanto al manejo de los residuos, los costos de eliminación y manejo de desechos industriales están aumentando considerablemente en el mundo, por lo que su utilización y reutilización en diferentes aplicaciones, como la construcción, es de vital importancia para reducir el costo tanto de las operaciones industriales como de los contratistas de construcción (Runxiao et al., 2015). De acuerdo con la tarifa establecida para el año 2022,

---

la empresa Postelectras S.A.S. incurre en un costo por disposición de residuos de \$70.000 por tonelada, lo que equivale \$280.000 semanales para una disposición de 4 toneladas en este periodo. La incorporación de este residuo a sus procesos de fabricación de elementos de concreto prefabricado evitaría gastos por su disposición y, en el caso de realizar la valorización de éste, un ingreso para la empresa.

Con el uso de la calamina como reemplazo, se recupera en parte la energía incorporada en la extracción de los materiales requeridos para la fabricación del acero y los costos correspondientes, como menciona Doussoulin (Doussoulin, 2022), evitando que estos vayan al vertedero. Finalmente, las empresas que implementen estas alternativas de sustitución de agregados pueden acceder a incentivos tributarios por inversiones que benefician el medio ambiente y que están establecidos en la legislación colombiana.

### **4.3 ASPECTOS SOCIALES**

La creciente demanda de agregados está desencadenando conflictos socioeconómicos debido a su explotación ilegal. Esto es algo muy común en el Área Metropolitana, en donde se observan extracciones de arena de los ríos y montañas, lo que lleva a conflictos sociales por la adquisición de este recurso. Con el uso de los residuos de la industria en el sector de la construcción se disminuyen las amenazas para la salud planetaria, humana, animal y de las plantas (Singh et al., 2017) y, adicionalmente, se conserva un recurso no renovable para las nuevas generaciones.

Como se ha mencionado anteriormente, según Balaguera, con la sustitución de agregados por residuos se ha logrado disminuir el costo de un concreto convencional hasta en un 30% (Balaguera et al., 2018). Por tanto, el uso de la calamina como reemplazo de la arena en el sector de la construcción para materiales como el concreto, morteros, baldosas y BTC, junto con el ahorro de parte del agua consumida en sus procesos, podrían rebajar los precios y hacer más asequibles estos materiales. Al menos para las empresas en las que sea posible hacer efectiva dicha circularización, como el caso específico de Postelectras S.A.S.

Para los BTC, un reemplazo total de la arena en la mezcla por un residuo y entendiendo que el material fino es el suelo obtenido en el lugar de la construcción, podría determinar un producto a bajo costo para viviendas de interés social, y una participación de las

---

comunidades en la construcción de estas viviendas, proporcionando la configuración de vínculos y fortaleciendo el tejido social.

Disminuir la explotación de agregados contribuye a minimizar las posibles afectaciones realizadas a familias que dependen de sectores como el turismo, la pesca y la agricultura, sectores que como se mencionó anteriormente se ven afectados por la extracción de la arena de playas, ríos y pérdida de tierras agrícolas. Por otro lado, los beneficios económicos de una circularización de residuos, como los presentados en el numeral anterior, beneficiarán a un sector que representa una fuente de empleo del 7% del total nacional (Ministerio de Trabajo, 2019). Investigaciones como esta, dedicadas a encontrar alternativas que hagan más sostenible dos sectores como el metalmecánico y el de construcción, favorece la permanencia en el tiempo de las industrias.

Para finalizar, abordando los temas de huella hídrica, de carbono y la huella ecológica, temas que afectan tanto lo económico, lo ambiental y social, podríamos decir que estas disminuyen al reducir la presión sobre un recurso no renovable como la arena. La huella hídrica disminuiría, como queda evidenciado en menores requerimientos de este recurso para los materiales empleados, teniendo en cuenta que se tienen datos que el consumo de agua para el lavado de este tipo de áridos en la eliminación de los finos, está entre 1.500 y 3.500 litros de agua por tonelada de arena (Bellart & Mesa, 2011).

Aunque la huella de carbono es relativamente pequeña en la extracción de la arena, 0,002 kg de CO<sub>2</sub> por kg de arena (Freire et al., 2016), se requieren seis a siete toneladas de arena y grava por cada tonelada de cemento, como se mencionó al inicio de este documento. Si se tiene en cuenta adicionalmente que el transporte de los agregados al sitio de obra eleva adicionalmente esta huella, debido al consumo de combustibles fósiles, y que las industrias que realizan los procesos de trefilación están en las ciudades, o más cerca de estas que los sitios de extracción, los efectos de reemplazar áridos por residuos metalmecánicos tienen beneficios ambientales, económicos y sociales, ya que disminuyen impactos como el cambio climático.

En cuanto a la huella ecológica el efecto general para los áridos, que incluye la energía necesaria durante su ciclo de vida, el transporte del material y la maquinaria usada para extracción representa un total de 1.147,006 de Ton de CO<sub>2</sub> para el año 2015, equivalentes a 559,12 hag (hectáreas globales) (Freire et al., 2016). Este efecto global de la extracción

---

de áridos para la construcción es el que se afectaría específicamente en la medida en que se consiga una adecuada conexión entre las industrias metalmeccánica y de construcción, disminuyendo el consumo de arena y de generación de residuos.

.

---

# 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1 CONCLUSIONES

La calamina analizada para el estudio presenta granulometrías afines con relación a la fracción fina de la arena y densidades ligeramente superiores; es un residuo no peligroso y está compuesto en su gran mayoría por óxidos de hierro en diferentes composiciones. Es un reemplazo adecuado y competente como materia prima en la industria de la construcción.

Todos los materiales o productos de construcción analizados presentan un aumento de la densidad al reemplazar un porcentaje de arena por la calamina. Se incrementa el peso de éstos, y por lo tanto su densidad, lo que tiene implicaciones favorables en las propiedades físicas finales.

El reemplazo de arena por calamina en las mezclas del 50%, 70% y 90% disminuye la cantidad de agua requerida, tanto para morteros y baldosas como para BTC, lo que reduce el uso de este recurso y podría disminuir la huella hídrica causada por el sector de la construcción.

El mayor aumento de resistencia a la compresión en los morteros y concretos se presenta para la mezcla con un reemplazo de arena por calamina del 70%. Este resultado en morteros es independiente de los días de curado, condiciones ambientales y cambios de temperatura y humedad. En el caso de los concretos tiene efectos favorables para el dimensionamiento de los elementos estructurales, o para emplearse como complemento en aplicaciones donde el uso del refuerzo se limita por restricciones de recubrimiento. Aumentos de la resistencia a la compresión se encuentran también en investigaciones realizadas por autores como M. Alwaeli, Erika Furlani y Stefano Maschio, Erdiñç Arıcı, y Og̃uzhan Kelestemur, en donde son usados residuos de la industria metalmecánica como calamina y virutas de acero. Erdiñç Arıcı, y Og̃uzhan Kelestemur atribuyen este aumento en la resistencia a la compresión a la adhesión entre el residuo metalmecánico y la pasta de cemento, debido a superficie rugosa del primero.

Para las baldosas, la mezcla más recomendable es la que contiene un reemplazo del 50% de arena por calamina de acuerdo con los resultados de densidad y resistencia a la flexión.

Con este grado de reemplazo se duplicó la resistencia a la flexión en los elementos analizados, con un porcentaje de absorción menor que en la mezcla con reemplazo del 70%, y un menor consumo de agua en la mezcla. Se puede recomendar dicha mezcla baldosas en aplicaciones como bodegas de tráfico pesado, ya que presentan una excelente resistencia a la flexión y su menor porcentaje de absorción, implica más resistencia a los agentes exteriores y menos nivel de suciedad.

En cuanto a los BTC, la resistencia a la compresión, el coeficiente de abrasión y el porcentaje de capilaridad, el mejor diseño de mezcla evaluado es el que contiene 20% de arena, 30% de calamina, 40% de fino y 10% de cemento (un reemplazo del 60% de la arena original empleada).

Los resultados de esta investigación mostraron que es posible sustituir agregados naturales como la arena por residuos de la industria metalmeccánica, como la calamina. Se demostró que es viable la producción de materiales como morteros, baldosas, concretos y BTC de manera más sostenible, con una sustitución entre el 30% y el 70% de arena por calamina, mostrando además el potencial que tienen estos materiales para su uso en el sector de la construcción y a nivel industrial, con beneficios ambientales, económicos y sociales.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá existen aproximadamente 10 explotaciones de agregados, y otras 7 están en los municipios cercanos; se identifican igualmente cerca de 15 empresas realizan la trefilación del acero, por lo que sería conveniente realizar un estudio en el que se puedan observar los beneficios económicos y ambientales del uso del residuo de estas empresas en la industria de la construcción, en una estrategia de economía circular. La zona cuenta también con empresas de fabricación de baldosas, concretos y otros productos evaluados en este trabajo, lo que permitiría hacer una evaluación más completa de la valorización de este residuo, que podría ser ejemplo para otras regiones y países.

Se debe tener presente que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de la arena por la calamina aumenta la densidad de los productos propuestos, por lo que se debe definir su uso según el proyecto a desarrollar.

---



Se recomienda realizar el ensayo de desgaste en las baldosas para determinar una propiedad adicional, y así poder determinar otras posibles aplicaciones.

Se recomienda en el proceso de fabricación de morteros tener especial cuidado con la homogeneidad de los materiales empleados para las mezclas, y en particular en el contenido de humedad de la arena, de forma que no se presenten cambios significativos en ellos, al tiempo que realizar corrección por humedad y minimizar los posibles errores experimentales.

Según estudios realizados por autores referenciados en el capítulo 1 (Alwaeli & Nadziakiewicz, 2012), se encontró que la adición de calamina y de viruta de metal al concreto mejoraba su absorción de radiación gamma. Sería recomendable evaluar la capacidad aislante a esta radiación de los materiales desarrollados en este trabajo.

---

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- A. Acosta Valle. (2001). Durability of compressed soil-cement bricks. *Materiales De Construcción*, 51(262), 23–67. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>
- Acosta, D., & Cilento, A. (2005). Edificaciones sostenibles: estrategias de investigación y desarrollo. *Tecnología y Construcción*, 21(1), 15–30. [http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/45288306/Edificaciones\\_sostenibles\\_estrategias\\_de\\_investigacion\\_y\\_desarrollo.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1477777232&Signature=Zonoap1yIEsqXDe%2B7gLjAmfKtnQ%3D&response-content-disposition=](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/45288306/Edificaciones_sostenibles_estrategias_de_investigacion_y_desarrollo.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1477777232&Signature=Zonoap1yIEsqXDe%2B7gLjAmfKtnQ%3D&response-content-disposition=)
- Alwaeli, M. (2016). The implementation of scale and steel chips waste as a replacement for raw sand in concrete manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1038–1044. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.211>
- Alwaeli, M., & Nadziakiewicz, J. (2012). Recycling of scale and steel chips waste as a partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.047>
- Ambientalmente, C. (2022) Gestión ambiental. *Boletín mes de junio*. .
- ANDI. (2017). *Comité del sector cerámico*. 39. <http://www.andi.com.co/Uploads/LaIndustriaCeramicaDeColombia.pdf>
- ANDI. (2018). *Informe del Sector Siderúrgico 2018*.
- Arciniegas, E., & Muñoz, Y. (2017). *Propuesta para la elaboración de baldosas artesanales tipo cerámica adicionando calamina, en la empresa Alambre y Mallas S.A. - ALMASA*. 107. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Arenas, F. J. (2007). *El impacto Ambiental en la construcción industrial, criterios para una construcción sostenible*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=42003>
- Arıcı, E., & Keleştemur, O. (2019). Optimization of mortars containing steel scale using Taguchi based grey relational analysis method. *Construction and Building Materials*, 214, 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.135>
- Arulrajah, A., Yaghoubi, E., Imteaz, M., & Horpibulsuk, S. (2017). Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation. *Sustainable Cities and Society*, 28, 343–349.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.009>

Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2011). *Ciencia e ingeniería de materiales* (C. Learning (ed.); Madrid, Sexta edic).

Balaguera, A., Carvajal, G. I., Albertí, J., & Fullana-i-Palmer, P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 132(May 2017), 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>

Baricevic, A., Pezer, M., Jelcic Rukavina, M., Serdar, M., & Stirmer, N. (2018). Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete. *Construction and Building Materials*, 176, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.229>

BARBIERI, A. (2017). “La arena una emergencia medioambiental de la que nadie habla”. *La Vanguardia*.  
doi:<https://www.lavanguardia.com/natural/20170430/422038159271/arena-mergencia-medioambiental.html>

Bedoya, C., & Dzul, L. (2015). Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project. *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(2), 99–108. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732015000200002>

Bedoya, C. M. (2018). Construcción de vivienda sostenible con bloques de suelo cemento: del residuo al material. *Revista de Arquitectura*, 20(1), 62–70. <http://www.javegraf.com.co/index.php>

Bellart, M., & Mesa, S. (2011). Impacto ambiental y ciclo de vida de los materiales de construcción. *Energy and Buildings*, 34(6), 1 recurs electrònic. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2684167%0Ahttps://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/7360%0Ahttp://hdl.handle.net/2099.1/13759%0Ahttp://hdl.handle.net/2099.1/24336%0Ahttps://www.jstor.org/stable/info/10.2307/4449248%0Awww.epi.yale.edu%0Ah>

Beunens, P. (1994). *La trefilación* (Bekaert (ed.)). <http://trefiladoprocesos2.blogspot.com/2017/03/blog-post.html>

Bhardwaj, B., & Kumar, P. (2017). Waste foundry sand in concrete: A review. *Construction*

- 
- and Building Materials*, 156, 661–674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010>
- Bolaños, S. R. (2007). El uso masivo de la tierra como material de construcción en Colombia. *Scielo*, 20(2), 354–363. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1657-97632007000200015&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1657-97632007000200015&script=sci_arttext)
- Cabrera, S., González, A., & Rotondaro, R. (2020). Resistencia a compresión en Bloques de Tierra comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo. Consejo Superior de Investigación Científica. *Informes de la Construcción*, 72(560); e360. <https://doi.org/10.3989/ic.70462>.
- Calderon Linares, A. S., & Burbano Cerón, M. J. (2016). Efectos en la resistencia del hormigón simple elaborados con agua residual tratada proveniente de la pta cañaveralejo. *Ingeniería y Región*, 16(2), 35. <https://doi.org/10.25054/22161325.1297>
- Camacol. (2022a). *El valor agregado en la construcción de edificaciones-crecimiento durante el 2021*. <https://camacol.co/actualidad/noticias/valor-agregado-en-la-construccion-de-edificaciones-crecimiento-116-durante-2021#:~:text=Noticias-,Valor agregado en la construcción de edificaciones creció 11%,más frente al año 2019>.
- Camacol. (2022). *Proyección sectorial: PIB edificador 2023*. Bogotá. doi:<https://camacol.co/descargable/proyeccion-sectorial-pib-edificador-2023>
- Cañola, H., Builes-Jaramillo, A., Medina, C. A., & González-Castañeda, G. E. (2018). Bloques de tierra comprimida (BTC) con aditivos bituminosos. *TecnoLógicas*, 21(43), 135–145. <https://doi.org/10.22430/22565337.1061>
- Chkravarty, T. K., & Panigrahi, S. K. (1996). Strategies for solid waste management in Steel plants. *PROCEEDINGS: NS-EWM*, pp.52-62. <https://core.ac.uk/download/pdf/297712188.pdf>
- Chu, J. (2016). Solutions to Sustainability in Construction: Some Examples. *Procedia Engineering*, 145, 1127–1134. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.146>
- Comisión Brundtland. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común. *Documentos de Las Naciones Unidas*, 416. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Informe+de+la+comision+mundial+sobre+el+medio+ambiente+y+el+desarrollo.+nuestro+futuro+comun#5>
- Congreso de la Republica. (1989). Decreto 624 de 1989, Por el cual se expide el estatuto
-

- tributario de los impuestos administrados por la dirección general de impuesto nacionales. *Estatuto Tributario Colombiano*, 1989, 598.  
<https://www.mincit.gov.co/ministerio/normograma-sig/procesos-misionales/facilitacion-del-comercio-y-defensa-comercial/decretos/1967-1990/decreto-624-de-1989-2.aspx>
- Congreso de la Republica. (2005). *Ley 905 De 2004 Bogotá*.
- Consejo mundial empresarial para el desarrollo sostenible. (2009). Iniciativa por la sostenibilidad del cemento. *Reciclando Concreto*, 41.
- DNP. (2018). Conpes 3919. *Consejo Nacional de Política Económica y Social. Departamento de Planeación Nacional*, 98.  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3919.pdf>
- Doussoulin, J. P., & Bittencourt, M. (2022). How effective is the construction sector in promoting the circular economy in Brazil and France? : A waste input-output analysis. *Structural Change and Economic Dynamics*, 60, 47–58.  
<https://doi.org/10.1016/j.strueco.2021.10.009>
- Eloneva, S., Puheloinen, E. M., Kanerva, J., Ekroos, A., Zevenhoven, R., & Fogelholm, C. J. (2010). Co-utilisation of CO<sub>2</sub> and steelmaking slags for production of pure CaCO<sub>3</sub> - Legislative issues. *Journal of Cleaner Production*, 18(18), 1833–1839.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.026>
- Esguerra, A. y. (2009). EVALUACIÓN DE LA REDUCIBILIDAD DE LA CALAMINA PROVENIENTE DE UNA SIDERÚRGICA DE LA REGIÓN, POR REDUCCIÓN CON MONÓXIDO DE CARBONO. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 3, 1289-1294 .
- Esguerra, A; Barona, W. (2010). *Cinética de reducción de una cascarilla de óxido de hierro con mezcla gaseosa CO-H<sub>2</sub>*. 3–10.
- Ferreira, V. J., Sáez-De-Guinoa Vilaplana, A., García-Armingol, T., Aranda-Usón, A., Lausín-González, C., López-Sabirón, A. M., & Ferreira, G. (2016). Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: Technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production*, 130, 175–186.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.094>
- Freire, A., Marrero, M., & Muñoz, J. (2016). Incorporación de huella de carbono y huella
-

---

ecológica en las bases de costes de construcción. Estudio de caso de un proyecto de urbanización en Écija, España. *Revista Hábitat Sustentable*, 6, 6–17.

Furlani, E., & Maschio, S. (2016). Steel scale waste as component in mortars production: An experimental study. *Case Studies in Construction Materials*, 4, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.02.001>

Gutiérrez, L. (2003). *El Concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

ICONTEC, I. de N. T. y C. (1976). *NTC1085 Baldosas de Cemento*.

ICONTEC, I. de N. T. y C. (1999). *NTC385 Ingeniería civil y arquitectura. Terminología relativa al concreto y sus agregados*.

Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>

Jensen, C. H. (2000). *Dibujo y Diseño de ingeniería* (McGraw-Hill (ed.); Primera ed).

Keleştemur, O., & Arıcı, E. (2020). Analysis of some engineering properties of mortars containing steel scale using Taguchi based grey method. *Journal of Building Engineering*, 29(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101015>

Mendoza-Cuenca, J. L., Mayorga, M., Romero-Salazar, L., Yee-Madeira, H. T., Jiménez-Gallegos, J., & Arteaga-Arcos, J. C. (2015). Advances in the Use of the Steel Industry by-products when Manufacturing Traditional Ceramics for Sustainable Purposes. *Procedia Engineering*, 118(722), 1202–1207. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.464>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 26 de mayo de 2015. In *Diario Oficial* (Vol. 1, Issue 2015, p. 654). <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2013/08/Decreto-Unico-Reglamentario-Sector-Ambiental-1076-Mayo-2015.pdf>

Ministerio de Medio Ambiente, V. y D. T. (2005). *Decreto 4741 Prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos*. 1–27.

Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Explotación de materiales de construcción*. 56.

---

- Molaei Raisi, E., Vaseghi Amiri, J., & Davoodi, M. R. (2018). Mechanical performance of self-compacting concrete incorporating rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 177, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.053>
- Oancea, I., Bujoreanu, C., Budescu, M., Benchea, M., & Grădinaru, C. M. (2018). Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements. *Journal of Cleaner Production*, 203, 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.273>
- OMM;PNUMA. (2014). Informe Del Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre El Cambio Climático. In *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)
- ONU. (2015). *Objetivos del desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- ONU. (2022). *Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis*.
- Ordoñez, K., & Villanueva, L. (2012). Elaboración de bloques de mortero tipo estructural mediante secado natural empleando la clamina procedente de Tenaris Tubocaribe S.A. como aditivo. *Universidda de San Buenaventura*, 76.
- Ortega, K., Sarmiento, V., & Villegas, A. M. (2016). La construcción alrededor del mundo. *Cámara Colombiana de La Construcción - CAMACOL*, 84, 1–13.
- P. Gatani, M. (2000). Compressed earth blocks: traditional masonry based on a material of sustenance. *Informes de La Construcción*, 51(466). <https://doi.org/10.3989/ic.2000.v51.i466.713>
- Pernett, G. (2012). *El ACV de los materiales. Una herramienta incidente y valorativa de gran potencial en el diseño de proyectos arquitectónicos de bajo impacto ambiental en Colombia*.
- Quispe, I., Navia, R., & Kahhat, R. (2019). Life Cycle Assessment of rice husk as an energy source. A Peruvian case study. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1235–1244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.312>
- Rama legislativa. (2003). Decreto 3172 de 2003. *Republica de Colombia Diario Oficial*, 1–4.
-

- 
- Ríos Ocampo, J. P., Olaya Morales, Y., & Rivera León, G. J. (2017). Proyección de la demanda de materiales de construcción en Colombia por medio de análisis de flujos de materiales y dinámica de sistemas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 75–95. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a4>
- Romero, B. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IIE*, 91–97. [http://www.icesi.edu.co/blogs/mercadeosostenible2012\\_02/files/2012/10/ACV\\_MEDIO-AMBIENTE.pdf](http://www.icesi.edu.co/blogs/mercadeosostenible2012_02/files/2012/10/ACV_MEDIO-AMBIENTE.pdf)
- Runxiao, Z., Qureshi, T. S., & Panesar, D. K. (2015). *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management - Chapter 29 Use of industrial waste in construction and cost analysis*.
- Sathiparan, N. (2018). The effects of using agricultural waste as partial substitute for sand in cement blocks. *Journal of Building Engineering*, 19, 216 -227
- Siddique, R., Singh, G., & Singh, M. (2018). Recycle option for metallurgical by-product (Spent Foundry Sand) in green concrete for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1111–1120. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.255>
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Gupta, M. K. (2017). Towards zero waste manufacturing: A multidisciplinary review. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1230–1243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.108>
- Sitton, J. D., Zeinali, Y., Heidarian, W. H., & Story, B. A. (2018). Effect of mix design on compressed earth block strength. *Construction and Building Materials*, 158, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.005>
- Unidas, N., Unidos, E., Zelanda, N., Occidental, A., Zelanda, N., & Zelanda, N. (2019). *Un mundo envejeciente Ventajas y desventajas*. 2–5. [www.un.org/es/desa/world-population-prospects-2019](http://www.un.org/es/desa/world-population-prospects-2019)
- United Nations Environment Program UNEP. (2014). Sand, rarer than one thinks. United Nations Environment Program (UNEP). *Global Environmental Alert Service (GEAS)*, 2012(March), 1–15. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8665/GEAS\\_Mar2014\\_Sand\\_Mining.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8665/GEAS_Mar2014_Sand_Mining.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Universidad Industrial de Santander, & Unidad de Planeación Minero Energética UPME.
-



- (2018). Realizar un análisis del potencial de reutilización de minerales en Colombia y definir estrategias orientadas a fomentar su aprovechamiento por parte de la industria en el país bajo el enfoque de economía circular. *Noviembre*, 3, 468. <http://www.andi.com.co/Uploads/Documento Análisis Nacional.pdf>
- Valencia, Plinio Andres, Quintana, C. D. (2017). *Análisis comparativo entre el concreto simple y el concreto con adición de fibra de acero al 4% y 6%*. 66. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14513/1/ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO SIMPLE Y EL CONCRETO CON ADICIÓN DE FIBRA DE ACERO AL 4%25 Y.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14513/1/ANÁLISIS%20COMPARATIVO%20ENTRE%20EL%20CONCRETO%20SIMPLE%20Y%20EL%20CONCRETO%20CON%20ADICIÓN%20DE%20FIBRA%20DE%20ACERO%20AL%204%25%20Y.pdf)
- Verma, P., Saha, R., & Chaira, D. (2018). Waste steel scrap to nanostructured powder and superior compact through powder metallurgy: Powder generation, processing and characterization. *Powder Technology*, 326, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.061>
- Willis, K., Maureaud, C., Wilcox, C., & Hardesty, B. D. (2018). How successful are waste abatement campaigns and government policies at reducing plastic waste into the marine environment? *Marine Policy*, 96(August 2017), 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.11.037>
- World Steel Association. (2018). *Steel and Raw materials*. 15(4), 710–739. [http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/fact-sheets/Fact-sheet\\_Raw-materials2011/document/Fact sheet\\_Raw materials2011.pdf](http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/fact-sheets/Fact-sheet_Raw-materials2011/document/Fact%20sheet_Raw%20materials2011.pdf)
- World Steel Association. (2019). Sustainable steel, Indicators 2019 and the steel supply chain. *World Steel Association*, 6. <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2019/sustainable-steel-indicators-2019.html>
- Zabalza Bribián, I. (2011). *Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España*. 464. <https://zaguan.unizar.es/record/5751/files/TESIS-2011-032.pdf>
- Zutshi, A., & Creed, A. (2015). An international review of environmental initiatives in the construction sector. *Journal of Cleaner Production*, 98, 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.077>
-



# A. Anexo: Diseño de mezcla de concretos,

## 1. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETOS - Ensayos previos

Peso unitario Suelto		
Cilindro		
Diámetro	15,5	cm
Altura	16	cm
		D=m/V
Volumen	3019,07054	cm <sup>3</sup>
Volumen	0,00301907	m <sup>3</sup>
Peso fino + molde	7,428	Kg
Peso molde	2,884	Kg
Peso suelto fino		4,544
Densidad suelta fino		2460,4
Peso unitario suelto finos		2460,4 Kg/m <sup>3</sup>
Cilindro		
Diámetro	20,3	cm
Altura	30,5	cm
Volumen	9871,46924	cm <sup>3</sup>
Volumen	0,00987147	m <sup>3</sup>
Peso grueso	22,258	Kg
Peso molde	6,248	Kg
Peso suelto grueso		16,01
Densidad suelta Grueso		2254,8
Peso unitario suelto Grueso		2254,8 Kg/m <sup>3</sup>

## Peso unitario Compactado

Cilindro			
Diámetro	15,5	cm	
Altura	16	cm	
			D=m/V
Volumen	3019,07054	cm <sup>3</sup>	
Volumen	0,003019071	m <sup>3</sup>	
Peso fino + molde	7,856	Kg	
Peso molde	2,884	Kg	
Peso suelto fino		4,972	
Densidad suelta fino		2602,1	
Peso unitario suelto finos		2602,1	Kg/m <sup>3</sup>
Cilindro			
Diámetro	20,3	cm	
Altura	30,5	cm	
Volumen	9871,469239	cm <sup>3</sup>	
Volumen	0,009871469	m <sup>3</sup>	
Peso grueso + molde	22,586	Kg	
Peso molde	6,248	Kg	
Peso suelto grueso		16,338	
Densidad compactado Grueso		2288,0	
Peso unitario compactado Grueso		2288,0	Kg/m <sup>3</sup>

## 2. LISTA DE CHEQUEO

### Concretos

Item	Unidades	Agregado		Verificación	
		Fino	Grueso		
<b>Perfil</b>	Sin			No	Nota 1.
<b>Peso unitario suelto</b>	Kg/m3	1.605,8	1.456,5	Ok	
<b>Peso unitario compactado</b>	Kg/m3	1.694,5	1.566,1	Ok	
<b>Peso específico</b>	Kg/m3			Ok	
<b>Módulo de finura</b>	Sin			No	Nota 2.
<b>Tamaño Máximo Nominal</b>	"	3/8"	3/4"	Ok	
<b>% Abs</b>	%			Ok	
<b>% W</b>	%	1	0,7	No	

Nota 1. Ver Archivo GLAB-DE-001\_V1\_Normas\_Invias\_Seccion\_100-13.pdf pag. 36

Nota 2. Ver Archivo MÓDULO DE FINURA M.F. (MÓDULO GRANULOMÉTRICO).pdf

**3. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS UNIFICADO "U.S.C.S."**

DIVISIONES PRINCIPALES			Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO		
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5%->GW,GP,SW,S P. >12%->GM,GC,SM,SC . 5 al 12%->casos límite que requieren usar doble símbolo.	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3	
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.	
			GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$ .	Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.
		Arenas limpias (pocos o sin finos)	GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$ .	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3
	SW		Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos	Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.			
	Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos			Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$ .	Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.
		SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.			Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$ .	
		SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.				
	SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50		ML		Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa o limos.	
				CL		Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.	
OL				Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.			
Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50			MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.			
			CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.			
			OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.			
Suelos muy orgánicos		PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.				

**4. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO**

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
	A-1		A-3	A-2-4			A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6	
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa:											
N° 10 (2mm)	50 máx	-	-					-			
N° 40 (0,425mm)	30 máx	50 máx	51 mín					-			
N° 200 (0,075mm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx				36 mín			
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											
Límite líquido	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	41 mín (2)
Índice de plasticidad	6 máx	NP (1)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Características como subgrado	Excelente a bueno						Pobre a malo				

- No  
 (1): plástico  
 El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL  
 (2): menos 30  
 El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL  
 menos 30

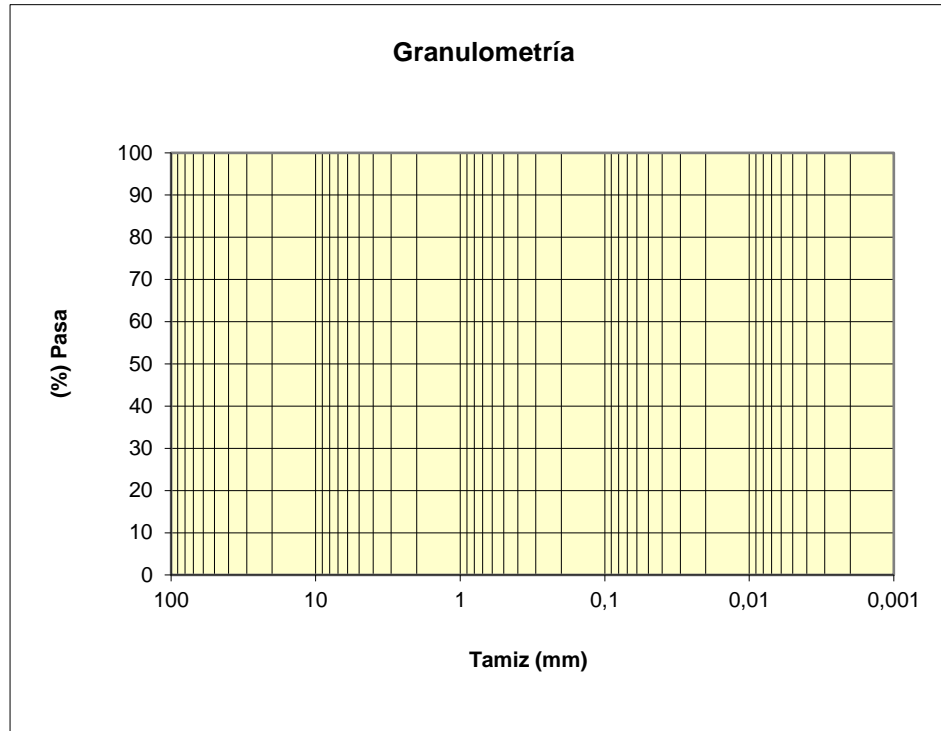
**Clasificación AAHSTO**

	<b>Tamiz</b>	<b>Pasa</b>	<b>Pasante</b>	<b>Retenido</b>	<b>Retenido</b>
	<b>(mm)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>acumulado</b>	<b>parcial (%)</b>
				<b>(%)</b>	
Numero ASTM					
3"	75,00	100,00	100,00	0,00	0,00
2"	50,80	79,14	79,14	20,86	20,86
1-1/2"	38,10	68,97	68,97	31,03	10,17
1"	25,40	59,00	59,00	41,00	9,97
3/4"	19,10	49,63	49,63	50,37	9,37
3/8"	9,51	41,04	41,04	58,96	8,59
4	4,76	33,23	33,23	66,77	7,81
10	2,00	26,20	26,20	73,80	7,03
20	0,85	19,75	19,75	80,25	6,45
40	0,43	14,83	14,83	85,17	4,91
60	0,25	10,46	10,46	89,54	4,38
140	0,11	6,47	6,47	93,53	3,98
200	0,08	2,99	2,99	97,01	3,48

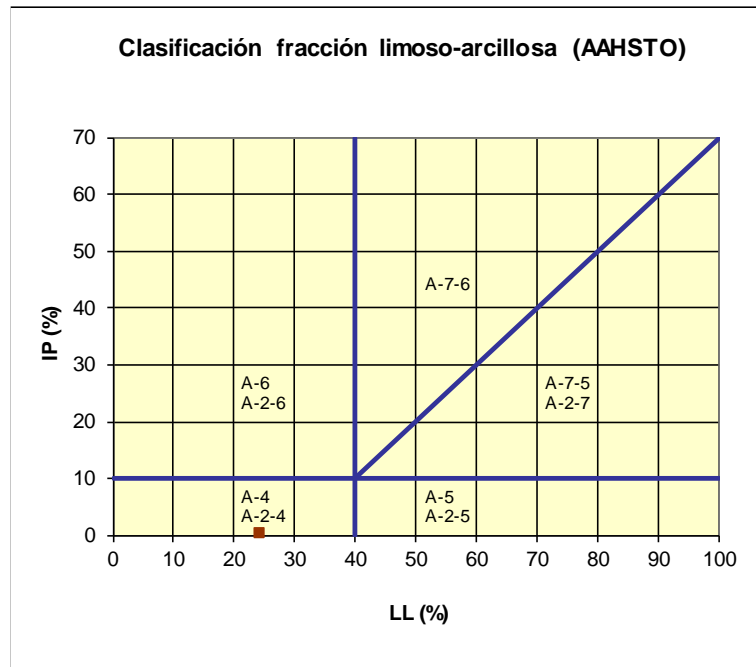
<b>Límite líquido LL</b>	13,17	%		
<b>Límite plástico LP</b>	11,62	%		
<b>Índice plasticidad IP</b>	1,55	%		

<b>Pasa tamiz N° 4 (5mm):</b>	<b>33,23</b>	<b>%</b>
<b>Pasa tamiz N° 200 (0,080 mm):</b>	<b>2,99</b>	<b>%</b>
<b>D60:</b>	<b>26,67</b>	<b>mm</b>
<b>D30:</b>	<b>3,49</b>	<b>mm</b>
<b>D10 (diámetro efectivo):</b>	<b>0,23</b>	<b>mm</b>
<b>Coefficiente de uniformidad (Cu):</b>	<b>114,21</b>	
<b>Grado de curvatura (Cc):</b>	<b>1,96</b>	



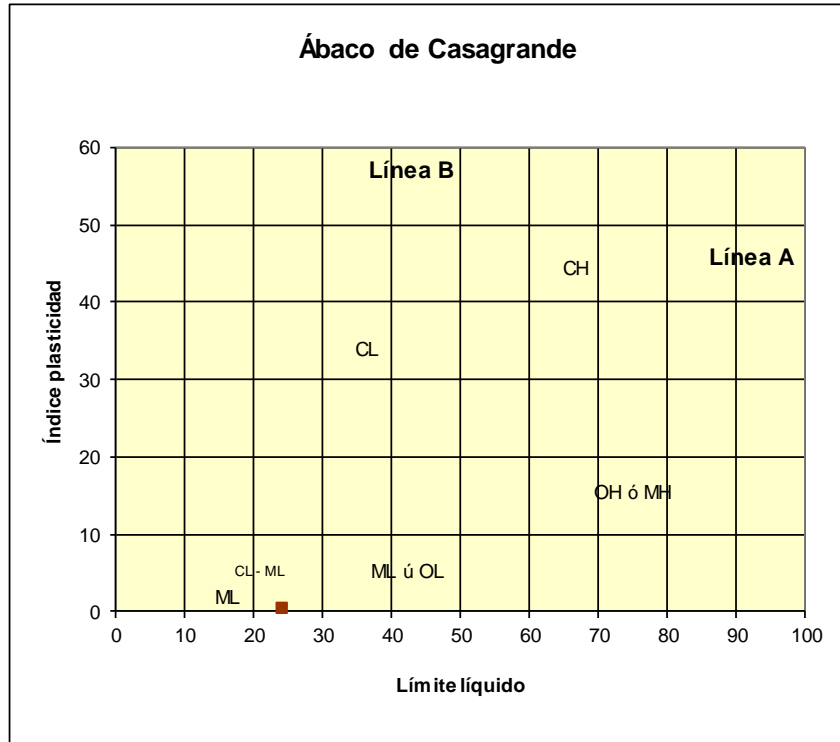


**Clasificación AAHSTO**



**Material granular**  
 Excelente a bueno como subgrado  
**A-1-a Fragmentos de roca, grava y arena**

**Valor del índice de grupo (IG):** 0

**Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)**

Suelo de partículas gruesas. Suelo limpio.

**Grava bien gradada con arena**

**Granulometría****INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO - ITM**

Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas

Departamento de Ciencias Ambientales y de la Construcción

**Laboratorio de Construcción****ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR  
TAMIZADO**

Granulometría finos							
Numero ASTM	apertura mm	Retenido en tamiz (gr)	% retenido	%retenido acumulado	% pasa	banda superior	banda inferior
3"	75,00		0,00	0,00	100,00	0	0
2"	50,80		0,00	0,00	100,00	0	0
1-1/2"	38,10		0,00	0,00	100,00	0	0
1"	25,40		0,00	0,00	100,00	0	0
3/4"	19,10		0,00	0,00	100,00	0	0
1/2"							
3/8"	9,51		0,00	0,00	100,00	0	0
4	4,76	5,85	0,66	0,66	99,34	0	0
8	2,00	136,45	15,30	15,96	84,04	0	0
16	0,85	141,15	15,83	31,79	68,21	0	0
30	0,425	182,85	20,51	52,29	47,71	0	0
50	0,250	222,30	24,93	77,22	22,78	0	0
100	0,106	147,85	16,58	93,80	6,20	0	0
200	0,08	34,20	3,84	97,64	2,36	0	0
fondo		21,05	2,36	100,00	0,00		
Total		891,70					

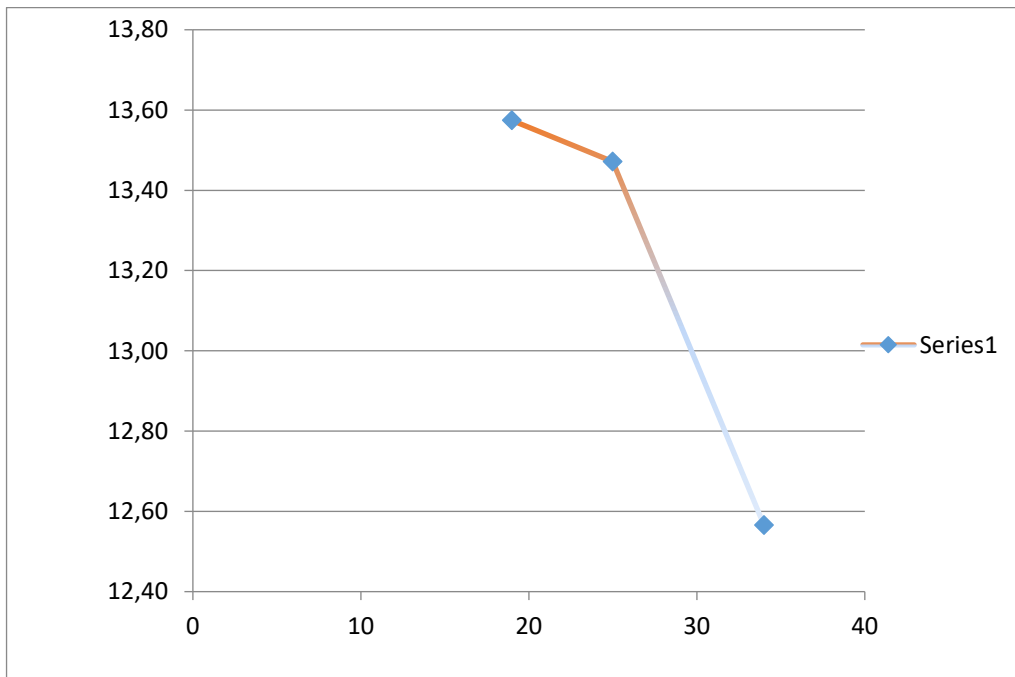
W seco inicial	891,92	
Error max 1%	0,0246658893	<b>OK</b>

Granulometría grueso							
Numero ASTM	apertura mm	Retenido en tamiz (gr)	% retenido	%retenido acumulado	% pasa	banda superior	banda inferior
3"	75,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0	0
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00	0	0
1-1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00	0	0
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00	0	0
3/4"	19,10	8,15	0,41	0,41	99,59	0	0
1/2"		398,10					
3/8"	9,51	480,05	24,02	24,43	75,57	0	0
4	4,76	960,60	48,07	72,51	27,49	0	0
10	2,00	126,90	6,35	78,86	21,14	0	0
20	0,85	14,60	0,73	79,59	20,41	0	0
40	0,425		0,00	79,59	20,41	0	0
60	0,250		0,00	79,59	20,41	0	0
140	0,106		0,00	79,59	20,41	0	0
200	0,08		0,00	79,59	20,41	0	0
fondo		9,80	0,49	80,08	19,92		
Total		1998,20					

W seco inicial	2000	
Error max 1%	0,09	<b>OK</b>

**Límite líquido**

<b>DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO</b>		<b>I.N.V.E - 125</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Ensayos</b>		
		<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
Número de Golpes	#	19	25	34
Número de recipiente	#	1,00	2,00	3,00
Peso recipiente	g	27,00	26,00	26,15
Recipiente + suelo húmedo	g	45,600	43,800	43,000
Recipiente + suelo seco	g	40,150	38,600	38,200
Contenido de humedad	%	13,57	13,47	12,57
LL	%			13,17



<b>DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO</b>		<b>I.N.V.E - 126</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Ensayos</b>	
		<b>a</b>	<b>b</b>
Número de recipiente	#	3L	5L
Peso recipiente	kg	14,85	11,06
Recipiente + suelo húmedo	kg	17,05	16,40
Recipiente + suelo seco	kg	15,320	14,650
Contenido de humedad	%	11,29	11,95
Lp	%	12	

## Diseño de Mezclas de Concreto

### *Método ACI*

Cantidad de mezcla	1 m3		
Datos			
<u>Cemento</u>			
Solicitud	Tipo I		
F'c	240 Kg/cm2		
Peso específico	3,15 g/cm3	3150 Kg/m3	
Slump (Asentamiento)	4 "		
Peso cemento en bolsa	42,5 Kg		
<u>Agua</u>			
Peso específico	1000 Kg/m3		

Agregados

Item	Unidades	Agregado	
		Fino	Grueso
Perfil	Sin		Angular
Peso unitario suelto	Kg/m <sup>3</sup>	1606	1457
Peso unitario compactado	Kg/m <sup>3</sup>	1694	1616
Peso específico	Kg/m <sup>3</sup>	2767,0	2697
Módulo de finura	Sin		
Tamaño Máximo Nominal	"	3/8"	3/4"
% Abs	%	1,2	1,0
% W	%	1	0,7

$3,15 \frac{g}{cm^3} = \frac{1000000}{1} \frac{cm^3}{m^3}$

**TABLA 05**

**RELACION AGUA/CEMENTO POR RESISTENCIA**

F'c (Kg/cm <sup>2</sup> )	Relación agua/cemento en peso	
	Concretos sin aire incorporado	Concretos con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	
450	0.38	

tabla confeccionada por el comité 211 del ACI.

	Húmedo	Seco	unidad
Peso Suelo Fino	900	891	g
peso tara		0	g
		891	g
	1		%

			unidad
Peso Suelo grueso	17898	17769,9	g
peso tara		0	g
		17769,9	g
	0,71572243		%

**1. Cálculo F'cr (Resistencia promedio requerida)**

F'c      240 Kg/cm<sup>2</sup>

Condición: No tenemos registro de resistencia de probetas correspondientes a ensayos anteriores

F'c	F'cr
Menos de 210	F'c + 70
210 - 350	F'c + 84
> 350	F'c + 98

$$F'cr = 240 + 84 = 324 \text{ Kg/cm}^2$$

## 2. Contenido de aire

Aire (vol) 2 %

**TABLA 02**

### CONTENIDO DE AIRE ATRAPADO

Tamaño Máximo Nominal del Agregado grueso.	Aire atrapado
3/8 "	3.0 %
1/2 "	2.5 %
3/4 "	2.0 %
1 "	1.5 %
1 1/2 "	1.0 %
2 "	0.5 %
3 "	0.3 %
4 "	0.2 %

## 3. Contenido de agua

Agua (l/m<sup>3</sup>) 205

**TABLA 01**

### VOLUMEN UNITARIO DE AGUA

Agua en l/m<sup>3</sup>, para los tamaños máx. nominales de agregado grueso y consistencia indicada.

Asentamiento	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	-----
Concreto con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154	-----

tabla confeccionada por el comité 211 del ACL.



#### 4. Relación a/c (por resistencia F'cr)

F'cr 324 Kg/cm<sup>2</sup>

Con este valor de resistencia se debe interpolar de la tabla

300	es a	0,55
324	es a	x
350	es a	0,48
$\frac{350-324}{0,48-x}$	es igual	$\frac{350-300}{0,48-0,55}$
$\frac{26}{0,48-x}$	es igual	$\frac{50}{-0,07}$
$\frac{26}{0,48-x}$	es igual	-714,285714
$\frac{26}{-714,2857143}$	es igual	0,48-x
-0,0364	es igual	0,48-x
x	es igual	0,5164

a/c	es igual	0,516
-----	----------	-------

#### 5. Contenido de cemento

$\frac{205}{c}$	es igual	0,516
-----------------	----------	-------

$$c = 396,979 \text{ Kg}$$

Factor cemento = 9,3 Bolsas  
por m<sup>3</sup> de mezcla

#### 6. Peso agregado grueso

$$\text{Peso a.g.} = b/b_o \times \text{p.u.s.c}$$

$$\text{Peso a.g.} = 0,74 \text{ m}^3 \times 1616 \text{ Kg/m}^3$$

Peso a.g. = 1195,77068 Kg

**TABLA 04**

**PESO DEL AGREGADO GRUESO POR UNIDAD  
DE VOLUMEN DEL CONCRETO**

Volumen de agregado grueso, seco y compactado,  
por unidad de volumen del concreto, para diversos  
módulos de finura del fino. ( b / b<sub>s</sub> )

Tamaño máximo nominal del agregado grueso.	2.40	2.60	2.80	3.00
3 / 8 "	0.50	0.48	0.46	0.44
1 / 2 "	0.59	0.57	0.55	0.53
3 / 4 "	0.66	0.64	0.62	0.60
1 "	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1 / 2 "	0.76	0.74	0.72	0.70
2 "	0.78	0.76	0.74	0.72
3 "	0.81	0.79	0.77	0.75
6 "	0.87	0.85	0.83	0.81

Tabla confeccionada por el comité 211 del ACI.

### 7. Cálculo de volumen agregado fino

Tenemos:

aire= 2%

agua = 205 l

cemento = 396,979 Kg

Peso a.grueso = 2697  
Kg

Volumen absoluto

$$\text{Cemento} = \frac{396,979 \text{ Kg}}{3150 \text{ Kg/m}^3}$$

$$\text{Cemento} = 0,126 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua} = 205 \text{ l}$$

$$\text{Agua} = 0,205 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = \frac{2}{100}$$

$$\text{Aire} = 0,02 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol agregado grueso} = \frac{1195,77068 \text{ Kg}}{2697 \text{ Kg/m}^3}$$

Vol agregado grueso = 0,443 m<sup>3</sup>

Volumen subtotal = 0,794 m<sup>3</sup>

Volumen agregado fino = 0,206 m<sup>3</sup>

### 8. Peso agregado fino

0,196 m<sup>3</sup> x 2767  
 Peso a.fino = Kg/m<sup>3</sup>  
 Peso a.fino = 568,907 Kg

1 m<sup>3</sup> 396,979 Cemento  
 0,00530144 X  
 2,104559854 Kg de cemento

### 9. Diseño estado seco

Cemento = 396,979 Kg  
 A. fino = 568,907 Kg  
 A. grueso = 1195,770677 Kg  
 Agua = 205 l

### 10. Corrección por humedad

C.H = Peso seco x ((%w/100)+1)

Agregado fino

C.H = 583,130 Kg

Agregado grueso

C.H = 1216,099 Kg

### 11. Aporte de agua a la mezcla

AAM = (%w - % abs) x Agregado seco/100

Agregado fino

AAM = -1,16 l

Agregado grueso

AAM = -3,31 l

Total aporte = -4,47 l

**12. Agua efectiva**

AE = 181 l - (-33,93 l)

AE = 209,47 l

**Proporción de mezcla para 1 m3**

Cemento [kg]	A. fino [kg]	A. Grueso [kg]	Agua [l]
396,98	583,13	1216,10	209,47
1	1,5	3,1	22

	Calamina [Kg]	Arena [Kg]	F'c
10,0%	58,31	524,82	?
30,0%	174,94	408,19	?
50,0%	291,56	291,56	?
70,0%	408,19	174,94	?
90,0%	524,82	58,31	

Blanco

Probetas

Norma probetas de concreto

cm

diámetro 15

Alto 30

Volumen 5301,437603 cm<sup>3</sup>0,005301438 m<sup>3</sup>Vol probetas 0,031808626 m<sup>3</sup>**Proporción de mezcla para 1 probeta**

	Cemento [g]	A. fino [g]	A. Grueso [g]	Agua [ml]
Blanco	2104,6	3091,4	6447,1	1110,5

Calamina [g] Arena [g]

10,0% 309,14 2782,28

30,0% 927,43 2164,00

50,0% 1545,71 1545,71

70,0% 2164,00 927,43

90,0% 2782,28 309,14

## B. Anexo: Diseño de mezcla de morteros

**Norma** - NTC 220 - Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado

### 10. PROCEDIMIENTO

#### 10.1 COMPOSICIÓN DE LOS MORTEROS

10.1.1 Las proporciones en masa para formar un mortero normal deben ser de una parte de cemento por 2,75 partes de arena gradada normalizada seca. Para todos los cementos Pórtland constituidos por clinker y yeso únicamente, debe emplearse una relación agua/cemento de 0,485 y de 0,460 para todos los cementos Pórtland con incorporadores de aire. Para los demás cementos la cantidad de agua de amasado debe ser la que produzca una fluidez de  $110 \pm 5$ , y debe expresarse como un porcentaje del peso del cemento determinado de acuerdo como se establece en la NTC 111 (ASTM C 230)

10.1.2 Las cantidad de los materiales anteriores que se mezclan a un mismo tiempo, para obtener seis o nueve cubos de ensayo, deben ser las siguientes:

Material	6 cubos	9 cubos
Cemento, g	500	740
Arena, g	1 375	2 035
Agua, ml		
- Pórtland (0,485)	242	359
- Pórtland con aire incorporado (0,460)	230	340
Otros (fluidez de $110 \pm 5$ )	-	-

Según esta norma encontramos que para fabricar tres cubos se requería lo siguiente:

Cemento	250 g
Arena	687,5

Y el agua requerida se realizará con la siguiente norma:

NTC111 - Método para determinar la Fluidez de morteros de cemento hidráulico

### 7. CÁLCULO

7.1 Para el calibrador de la Figura 4, se suman las cuatro lecturas para obtener la fluidez.

7.2 Para el calibrador tipo "Vernier" la fluidez es el aumento del diámetro promedio de la muestra, expresado como un porcentaje del diámetro de la base mayor del molde según la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Fluidez} = \frac{\text{Diámetro promedio} - A}{A} \times 100$$

Donde:

$A$  = diámetro real del molde, medido en el momento del ensayo, en mm

El diseño de mezcla por lo tanto quedo:

Cemento (g)	Arena (g)	Calamina (%)
250	687,5	0
250	618,75	10
250	481,21	30
250	343,75	50
250	206,25	70
250	68,75	90

Para realizar la mezcla y fabricación de los cubos se siguieron las indicaciones dadas en la NTC 112 “Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica”

#### 8. PROCEDIMIENTO PARA LA MEZCLA DE MORTEROS

8.1 Se colocan la paleta mezcladora y el recipiente de mezclado secos en la posición de trabajo y se procede en la siguiente forma:

8.1.1 Se vierte toda el agua de amasado en el recipiente.

8.1.2 Se agrega el cemento al agua y se mezcla durante 30 s a velocidad baja (140 r/min  $\pm$  5 r/min).

8.1.3 Se agrega lentamente la totalidad de la arena, en un periodo de 30 s, mientras se mezcla a velocidad baja.

8.1.4 Se detiene la mezcladora, se cambia a la velocidad rápida (285 r/min  $\pm$  10 r/min) y se mezcla durante 30 s.

8.1.5 Se detiene la mezcladora y se deja reposar el mortero durante 90 s. Durante los primeros 15 s se arrastra hacia el fondo, con el raspador, el mortero adherido a la pared del recipiente, durante el resto del intervalo del recipiente se tapa.

8.1.6 Se mezcla durante 60 s a velocidad rápida (285 r/min  $\pm$  10 r/min).

8.1.7 En caso de que el mortero requiera un nuevo periodo de mezclado, el material adherido a la pared del recipiente debe ser rápidamente arrastrado hacia el fondo con la espátula, antes de iniciar el mezclado adicional.

Se hicieron varios cubos de cada mezcla siguiendo estos pasos hasta encontrar el % de fluidez y por lo tanto el agua necesaria para cada mezcla.

Cemento (g)	Arena (g)	Calamina (%)	%Fluidez	Agua (ml)
250	687,5	0	107,5	205
250	618,75	10	108,5	207
250	481,21	30	112	209
250	343,75	50	109,25	190
250	206,25	70	110,25	180
250	68,75	90	105	185

## C. Anexo: Diseño de mezcla para BTC

### 5. DISEÑO DE MEZCLAS DE BTC'S

Preparación de muestras
Métodos de análisis granulométrico
Método de determinación del límite líquido y del límite plástico de una muestra de suelo. Índice de fluidez e índice de plasticidad
Clasificación de suelos, con propósitos ingenieriles
Ensayo proctor para obtener el máximo peso unitario seco - Porcentaje de humedad

Al elaborar bloques de tierra comprimida (BTC) con un suelo de características determinadas y materiales alternativos como cemento y calamina en diferentes proporciones, se obtendrá la resistencia a la compresión mínima exigida por la Norma Técnica colombiana NTC 5324.

Se emplean los tamices ASTM #10 (4,75 mm de apertura) y ASTM #40 (0,425 mm de apertura) de forma que se considera "Arena" (A) el material que pasa tamiz ASTM #10 y se retiene en el ASTM #40; igualmente se considera "Fino" (F) aquel material que pasa el tamiz ASTM #40.

Material Fino - muestras obtenidas en el corregimiento de San Cristóbal, de un talud del borde derecho de la carretera que conduce de Medellín a San Jerónimo, 500 metros antes del peaje existente.

Arena de revoque lavada según la granulometría mencionada anteriormente. Arena, cemento, suelo y agua se alternan en tres tipos de mezcla:

Mezclas de materiales analizadas en los BTC.

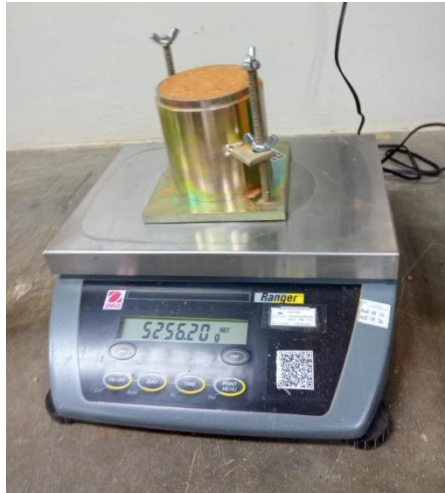
Material	Porcentajes			
	30%	40%	50%	60%
Arena (A)	30%	40%	50%	60%
Fino (F)	60%	50%	40%	30%
Cemento (C)	10%	10%	10%	10%
	100%	100%	100%	100%

Para la nomenclatura de las mezclas se emplea las letras de los materiales componentes y los respectivos porcentajes, sin símbolos, en el orden de mayor a menor de los tamaños de partícula. De esta forma, la mezcla que presenta un 50% de arena, 40% de finos y 10% de cemento se denomina A50 F40 C10.

Para la determinación del contenido óptimo de humedad en las diferentes mezclas empleadas en el proceso de elaboración de los BTC se realizan ensayos de Compactación Proctor Estándar (norma ASTM D-698 o INV E-141-07) en el cual se determina el contenido de humedad óptimo para la mezcla. Es preciso recalcar que el ensayo incluye únicamente la Arena (A) y el Fino (F) para no iniciar procesos de fraguado en el material y poderlo emplear en los bloques.

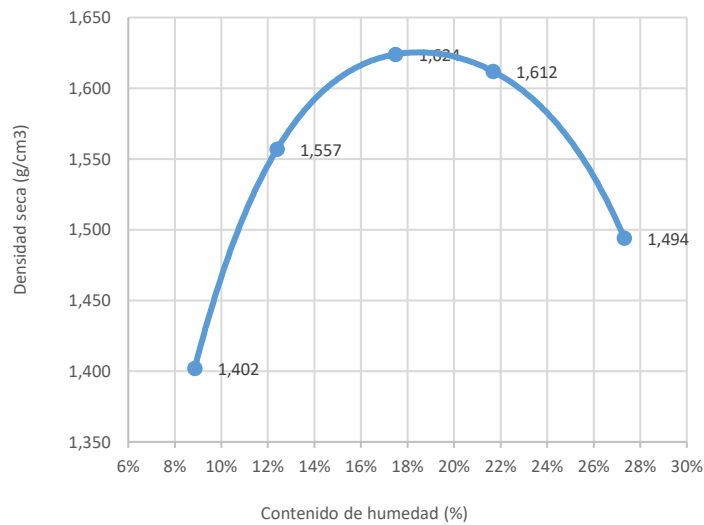
Se selecciona el ensayo Proctor Estándar y no el Proctor Modificado debido a que éste representa mejor las condiciones de compactación manual (no mecánica) de una masa de suelo como la empleada para la fabricación de los BTC.

#### Pesaje de la muestra en el ensayo Proctor



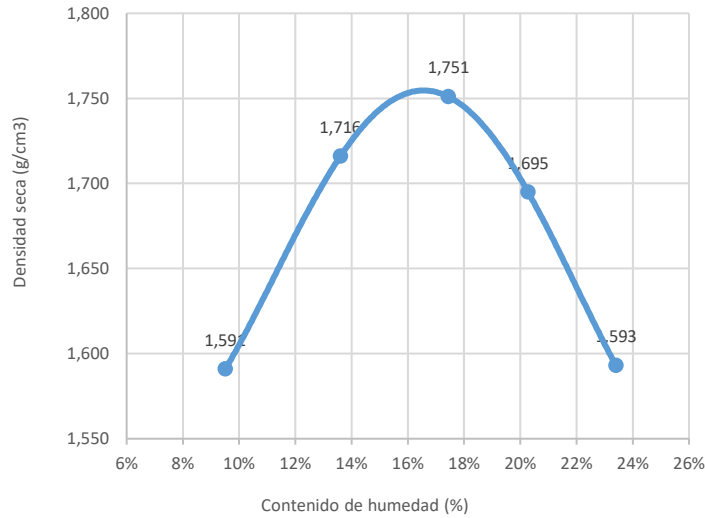
Los resultados de los ensayos de compactación de cada una de las mezclas empleadas, en ausencia de cemento.

#### Ensayo Proctor Estándar para mezcla A30 F60

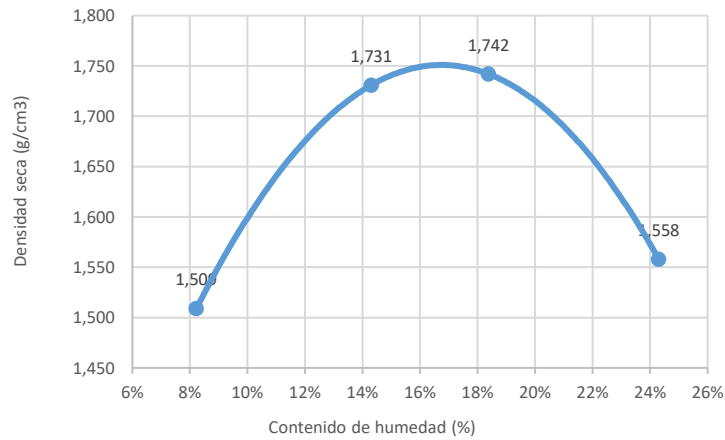




**Ensayo Proctor Estándar para mezcla A40 F50**



**Ensayo Proctor Estándar para mezcla A50 F40**



Humedad óptima entre el 17% y el 18%

Peso estimado por unidad de 8.000 gramos.

Los resultados de humedad óptima para el 40% y 50% de arena continuaron estables, se usa este mismo porcentaje para una mezcla que presentara el 60% de arena.

**Dosificación para una mezcla A30 F60 C10 – 8000g por unidad**

Material/ unidades	1	2	3	4	5
30% Arena	2.400 g	4.800 g	7.200 g	9.600 g	12.000 g
60% Pasa#40	4.800 g	9.600 g	14.400 g	19.200 g	24.000 g
10% Cemento	800 g	1.600 g	2.400 g	3.200 g	4.000 g
100%	8000 g	16.000 g	24.000 g	32.000 g	40.000 g
18,0% Agua	1.440 g	2.880 g	4.320 g	5.760 g	7.200 g
Total	9.440 g	18.880	28.320 g	37.760 g	47.200 g

## Dosificación para una mezcla A40 F50 C10 – 8000g por unidad

Material/ unidades	1	2	3	4	5
40% Arena	3.200 g	6.400 g	9.600 g	12.800 g	16.000 g
50% Pasa#40	4.000 g	8.000 g	12.000 g	16.000 g	20.000 g
10% Cemento	800 g	1.600 g	2.400 g	3.200 g	4.000 g
100%	8000 g	16.000 g	24.000 g	32.000 g	40.000 g
17,0% Agua	1.360 g	2.720 g	4.080 g	5.440 g	6.800 g
Total	9.360 g	18.720	28.080 g	37.440 g	46.800 g

## Dosificación para una mezcla A50 F40 C10 – 8000g por unidad

Material/ unidades	1	2	3	4	5
50% Arena	4.000 g	8.000 g	12.000 g	16.000 g	20.000 g
40% Pasa#40	3.200 g	6.400 g	9.600 g	12.800 g	16.000 g
10% Cemento	800 g	1.600 g	2.400 g	3.200 g	4.000 g
100%	8000 g	16.000 g	24.000 g	32.000 g	40.000 g
17,0% Agua	1.360 g	2.720 g	4.080 g	5.440 g	6.800 g
Total	9.360 g	18.720	28.080 g	37.440 g	46.800 g

## Dosificación para una mezcla A60 F30 C10 - - 8000g por unidad

Material/ unidades	1	2	3	4	5
60% Arena	4.800 g	9.600 g	14.400 g	19.200 g	24.000 g
30% Pasa#40	2.400 g	4.800 g	7.200 g	9.600 g	12.000 g
10% Cemento	800 g	1.600 g	2.400 g	3.200 g	4.000 g
100%	8000 g	16.000 g	24.000 g	32.000 g	40.000 g
17,0% Agua	1.360 g	2.720 g	4.080 g	5.440 g	6.800 g
Total	9.360 g	18.720	28.080 g	37.440 g	46.800 g

Una vez analizados los diferentes diseños de mezclas para los BTC, se decide no emplear una mezcla con el 30% de arena, debido a que requiere mucho material pasado por el tamiz ASTM #40, y se aprueban los porcentajes de las otras tres mezclas.

**Fabricación de los BTC**

Para la fabricación de las unidades se emplea la CINVA-Ram existente en el Laboratorio de Construcción del ITM, de marca GRACOMAQ.

Lista de chequeo de actividades para el proceso completo de fabricación de los BTC.

- Secar el material con anterioridad.
- Tamizar el suelo y la arena, si está muy gruesa.
- Determinar humedad óptima de la mezcla mediante Proctor Estándar.
- Pesar los materiales componentes para el número de unidades deseadas: arena, suelo y cemento (en gramos).
- Medir el agua (en mililitros).
- Mezclar los materiales hasta obtener masa homogénea.
- Adicionar el agua.
- Mezclar hasta obtener una mezcla completamente humectada.

- Lubricar la maquina CINVA-Ram.
- Vaciar la mezcla en la tolva de la máquina.
- Enganche el seguro del elevador a la palanca.
- Abrir la tapa con la ayuda de la palanca y asegurarse que el embolo está bien asentado sobre el tornillo que regula el rango de comprensión debajo de él.
- Teniendo la tolva cargada con la mezcla desplazar el cargador hacia el molde y llenarlo bien.
- Retornar el cargador a su posición, bajo la tolva.
- Tapar el molde con la ayuda de la palanca y retirar el seguro del elevador.
- Bajar el elevador para compactar el bloque.
- Subir nuevamente la palanca y enganchar el seguro a la palanca.
- Abrir la tapa con la ayuda de la palanca.
- Llevar la palanca hasta abajo para extraer el bloque.
- Retirar el bloque llevándolo con cuidado al sitio de almacenamiento.
- Dejar curar los bloques es un sitio libre.



#### Caracterización de los bloques elaborados para la mezcla A40 F50 C10 (11 unidades)

FECHA	No. BLOQUE	PROMEDIOS (CM)			VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
		ANCHO	LARGO	ALTURA			
22/12/2020	1	14,91	29,98	10,02	4,478	7,042	1,57
	2	14,80	29,98	10,00	4,435	7,027	1,58
	3	14,83	29,98	10,08	4.479	7,684	1,72
	4	14,83	29,98	9,98	4,437	6,247	1,41
	5	14,83	29,88	10,03	4,443	7,140	1,61
	6	14,86	29,98	10,11	4,505	7,647	1,70
	7	14,88	29,98	9,97	4,445	6,953	1,56
	8	14,88	29,98	9,99	4,455	6,825	1,53
	9	14,83	29,98	10,09	4,485	7,473	1,67
	10	14,83	29,98	10,02	4,455	7,274	1,63
	11	14,88	29,98	10,02	4,470	7,352	1,64
PROMEDIO					4,463	7,151	1,60

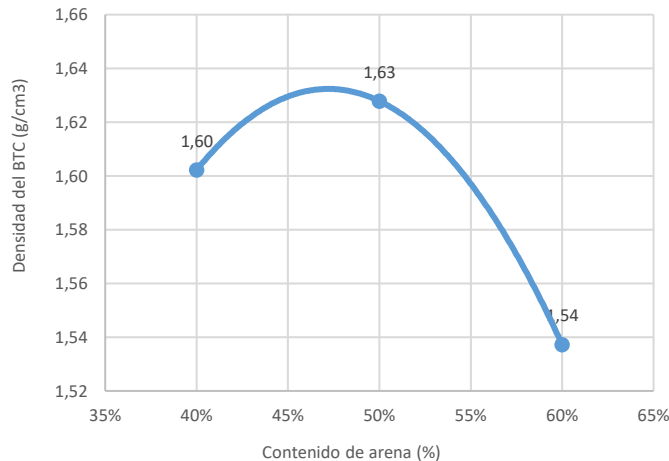
## Caracterización de los bloques elaborados para la mezcla A50 F40 C10 (10 unidades)

FECHA	No. BLOQUE	PROMEDIOS (CM)			VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
		ANCHO	LARGO	ALTURA			
21/12/2020	1	14,83	29,98	10,08	4,482	7,342	1,64
	2	15,01	29,98	10,04	4,517	7,249	1,60
	3	14,88	29,98	9,98	,,451	7,330	1,65
	4	14,83	29,98	9,93	4,414	7,171	1,62
	5	14,86	29,98	9,98	4,431	7,140	1,61
	6	14,88	29,98	10,01	4,464	6,967	1,56
	7	14,83	29,98	10,09	4,486	7,431	1,66
	8	14,83	29,98	10,03	4,460	7,373	1,63
	9	14,88	29,98	10,00	4,461	7,288	1,67
	10	14,83	29,98	10,02	4,456	7,347	1,63
PROMEDIO					4,462	7,264	1,63

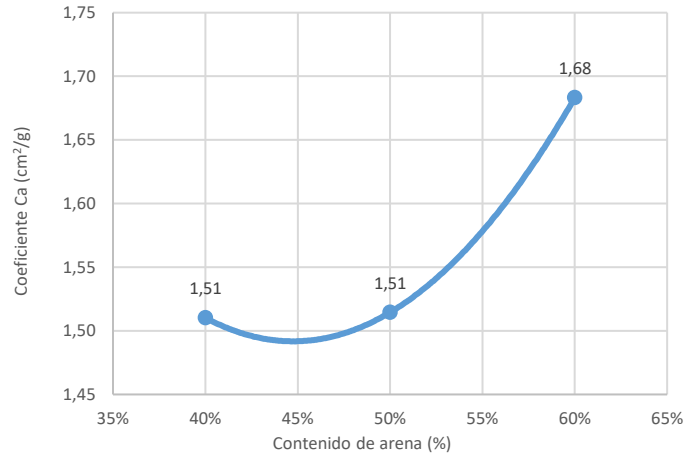
## Caracterización de los bloques elaborados para la mezcla A60 F30 C10 (12 unidades)

FECHA	No. BLOQUE	PROMEDIOS (CM)			VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
		ANCHO	LARGO	ALTURA			
22/12/2020	1	14,96	30,05	10,16	4,566	7,215	1,58
	2	14,88	30,03	10,12	4,524	6,952	1,54
	3	14,84	29,98	10,10	4,494	7,254	1,61
	4	14,88	29,98	9,98	4,450	6,998	1,57
	5	14,87	29,83	9,96	4,419	6,689	1,51
	6	14,90	29,90	9,99	4,447	6,920	1,56
	7	14,91	29,98	10,07	4,503	6,990	1,55
	8	14,87	29,98	10,06	4,485	7,186	1,60
	9	14,87	29,98	10,03	4,469	6,487	1,45
	10	14,88	29,83	9,98	4,431	6,768	1,53
	11	14,83	29,98	9,99	4,442	7,040	1,58
	12	14,93	29,98	9,92	4,441	6,018	1,36
PROMEDIO					4,473	6,876	1,54

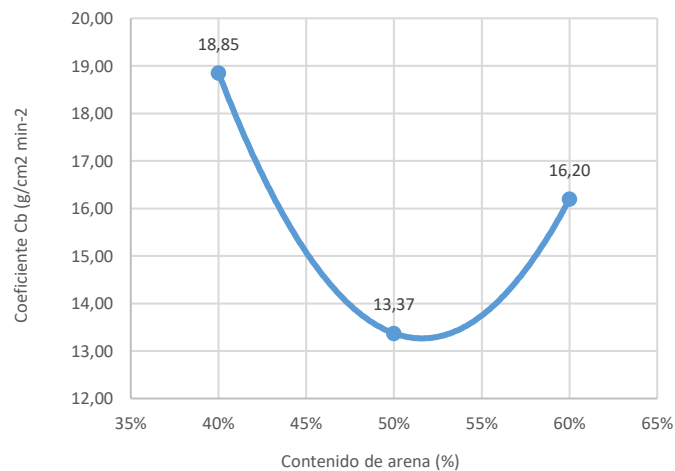
Variación de la Densidad con el porcentaje de arena: Los BTC con la mezcla A50 F40 C10 presentan una mayor densidad final.



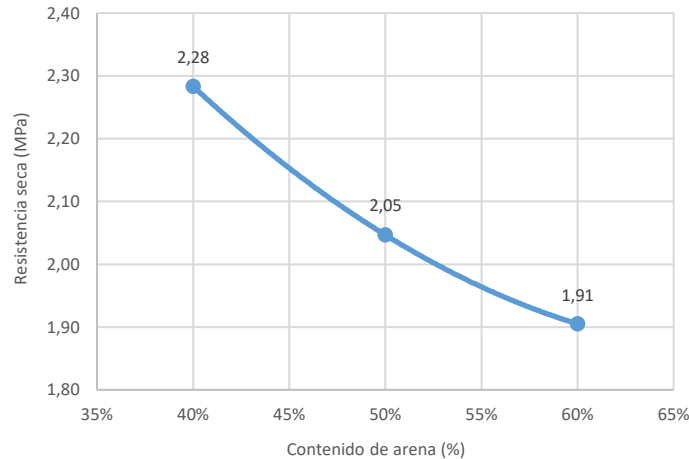
Variación del Coeficiente de Abrasión (Ca) con el porcentaje de arena Ensayo de abrasión Numeral 4.7 de la norma NTC 5324 - Se presenta un incremento en el valor del Coeficiente de Abrasión (Ca) para la mezcla que contiene un 60% de arena, no hay variación para porcentajes del 40% y 50% de arena en la mezcla.



Variación del Coeficiente de Capilaridad (Cb) con el porcentaje de arena Numeral 4.3 de la norma NTC 5324 (NTC 5324, 2005). La mezcla con el contenido de arena del 50% presenta una menor capacidad de absorción de agua por capilaridad, lo cual es favorable para la estrategia de construcción con tierra, ya que la absorción de agua es un problema cuando se construye con tierra.



Variación de la Resistencia a la Compresión Seca con el porcentaje de arena. Numeral 4.5 de la norma NTC 5324 - Parámetros del ensayo en la prensa del laboratorio se empleó una velocidad de 0,15 MPa/S y una sensibilidad de 5 kN en la medida. La mezcla con el 40% de arena presenta una mejor resistencia.



De estos diseños de mezcla se selecciona **A50 F40 C10** o sea 50% de arena 40% de fino y 10% de cemento, ya que a pesar de que la muestra con 40% de arena da una mayor resistencia tiene un mayor coeficiente de capilaridad, lo que no es conveniente para trabajo con tierra y en este factor es mejor la seleccionada y solo tiene un 10% de resistencia, la densidad es similar y el coeficiente de abrasión no varía.



## D. Anexo: Equipos utilizados

Equipo	Placa	Marca	Capacidad	Rango	Imagen del Equipo
Amasadora Planetaria	2001840	Marca: HOBART Modelo: N50 MIXER	N.A.	N.A.	
RO-TAP y juego de tamices	5000588	Marca: TYLER Modelo: RX-29 (55-30)	N.A.	N.A.	
Mesa de flujo motorizada	5000584	HUMBOLT M.F.G.CO	N.A.	N.A.	
Balanza EXPLORER Pro	5084489	OHAUS	32000 gr	0.1 g - 32000 g	

Equipo	Placa	Marca	Capacidad	Rango	Imagen del Equipo
BASCULA INDUSTRIAL 15 kg	5084490	OHAUS Modelo: RANGER V2 RD15LM	15000 gr	0,5-15000 gr	
PIE DE REY ANÁLOGO	5020404	MITUTOYO	300 mm	0 mm - 300 mm	
CONSOLA MODULO - E CONTROLS  MARCO DE CARGA DE 100 KN	5100445  5077388	Marca: CONTROLS  Marca: CONTROLS Modelo: CT-150/F	100kN	0.5kN - 100kN	
CONSOLA MODULO - E CONTROLS  MARCO DE CARGA DE 1500 KN	5100445  5077387	Marca: CONTROLS  Marca: DIRIMPEX	1500 kN	1kN - 1500kN	



Equipo	Placa	Marca	Capacidad	Rango	Imagen del Equipo
HORNO Heratherm OGS100	5084487	Thermo Scientific	250° C	50 °C a 250 °C	
HORNO Heratherm OGS100	5084488	Thermo Scientific	250° C	50 °C a 250 °C	
CONSOLA AUTOMÁTICA CONTROLS	5077386	Marca: CONTROLS Modelo: 50- C5054	150kN	0.5kN - 130kN	
CUARTEADOR UNIV ALTA CAPACIDAD	5091852	GILSON	N.A.	N.A.	

Equipo	Placa	Marca	Capacidad	Rango	Imagen del Equipo
PRENSA CIMVA - RAM	5100450	GRACOMAQ	N.A.	N.A.	
CÁMARA DE CLIMA CONSTANTE	5020404	MEMMERT	300 mm	0 – 35°C 0% -90% Humedad	

ANDI. (2016). *Asociación Nacional de Industriales. Obtenido del Comité Sector Cerámico.*  
Obtenido de [www.andi.com.co](http://www.andi.com.co)

ASTM. (1952). *Unified Soli Classification System ASTM D-2487.*

ASTM. (2003). *Norma Standard Test Methodo for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates Norma C-136-01.*

Barbieri, A. (2017). "La arena una emergencia medioambiental de la que nadie habla". *La Vanguardia.*

doi:<https://www.lavanguardia.com/natural/20170430/422038159271/arena-mergencia-medioambiental.html>

- Camacol. (2022). *Proyección sectorial: PIB edificador 2023*. Bogotá. doi:<https://camacol.co/descargable/proyeccion-sectorial-pib-edificador-2023>
- Doussoulin, J. P. (2022). How effective is the construction sector in promoting the circular economy in Brazil and France?: A waste input-output analysis. *Structural Change and Economic Dynamics*(60), 47-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.strueco.2021.10.009>
- Esguerra, A. y. (2009). EVALUACIÓN DE LA REDUCIBILIDAD DE LA CALAMINA PROVENIENTE DE UNA SIDERÚRGICA DE LA REGIÓN, POR REDUCCIÓN CON MONÓXIDO DE CARBONO. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 3, 1289-1294 .
- Gutiérrez, L. (2003). *El Concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- ICONTEC. (2000). *Especificaciones para los agregados de concretos NTC 174*. Bogotá.
- ICONTEC. (2000). *Unidades de Mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos NTC- 4205*. Bogotá.
- Laboratorio de Materiales de Construcción . (2010). Analisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso. *Universidad Centro Americana - Ingeniería Civil*.
- Ministerio de Trabajo. (2019). Sector de la construcción aporta el 7% de los ocupados del país. Obtenido de <https://www.mintrabajo.gov.co/prensa/comunicados/2019/agosto/sector-de-la-construccion-aporta-el-7-del-total-de-los-ocupados-del-pais-ministra-alicia-arango>
- NTC 5324. (2005). *Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega*. ICONTEC.
- ONU. (2014). *PNUMA, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. "Sand, rarer than one thinks" Arena, más de lo que uno piensa*.
- Sathiparan, N. (2018). The effects of using agricultural waste as partial substitute for sand incement blocks. *Journal of Building Engineering*, 19, 216 -227.
-

trabajo, M. d. (2019). *Sector de la construcción aporta el 7% del total de los ocupados del país.*

---