

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN MORTERO PARA
RECUBRIMIENTO MODIFICADO CON ADITAMENTO DE CAUCHO DE
NEUMÁTICO MOLIDO**

**JENNIFER TATIANA GÓMEZ GÓMEZ
ANDREA MARCELA SIERRA LIZARAZO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN MORTERO PARA
RECUBRIMIENTO MODIFICADO CON ADITAMENTO DE CAUCHO DE
NEUMÁTICO MOLIDO**

**JENNIFER TATIANA GÓMEZ GÓMEZ
ANDREA MARCELA SIERRA LIZARAZO**

Trabajo de grado para optar el título de
INGENIERO(A) CIVIL

Director
LUIS ALBERTO CAPACHO
M.Sc. en Ingeniería Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Dedico esta tesis principalmente a DIOS por estar presente no solo en esta etapa tan importante de mi vida, sino en todo momento buscando siempre lo mejor para mí.

A mis padres que me dieron la vida, educación, apoyo, amor y su gran ejemplo, que han sabido formarme con sentimientos, hábitos y valores. A mi padre Arnulfo Gómez Plata por creer siempre en mí y facilitarme todo lo que fuese necesario en mi proceso. A mi madre Claudia Patricia Gómez Mejía, por su paciencia y dedicación. A mi hermano Cristhian Arnulfo Gómez Gómez que siempre ha estado junto a mí brindándome su apoyo.

A toda mi familia, amigos y cercanos que estuvieron atentos y de una u otra manera aportaron en mi formación y por compartir con migo buenos y malos momentos.

Jennifer Tatiana Gómez Gómez

Mis logros y agradecimientos van dirigidos explícita y esencialmente a mis parientes más cercanos por la paciencia y la constancia durante este proceso de formación académica.

A mi madre Amparo Lizarazo, por su tolerancia y dedicación al momento de cuidar y formar mi integridad como persona y futura profesional, reflejado en sus múltiples consejos y atenciones durante todos estos años, sus palabras han sido un cálido impulso hacia una continua evolución.

A mi padre Alejandro Sierra por su entereza y su sabiduría en momentos difíciles, en los que necesite de un fundamento firme para conservar el enfoque y tomar las decisiones necesarias en este camino.

A mis hermanos quienes en forma indirecta ayudaron a generar un ambiente cálido e íntegro, y brindaron un aliento optimista, gracias a ellos por el apoyo emocional incondicional.

Finalmente, pero no menos importante a mi tía Nelly Lizarazo por estar ahí siempre que necesité de su colaboración, ha sido como una segunda madre para mí.

Andrea Marcela Sierra Lizarazo.

AGRADECIMIENTOS

Para todas las personas que participaron en la realización de este proyecto de investigación las autoras de manera conjunta queremos agradecer por su apoyo intelectual y material a:

- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
- REENCAUCHADORA BULL DOG, proveedora del material neumático molido con la cual se basó esta investigación por brindarnos la oportunidad de realizar el respectivo estudio.
- FELMAQ SAS y DAM Ltda. Talleres de mecánica industrial por fabricarnos los equipos necesarios para la manipulación del neumático molido.
- LUIS ALBERTO CAPACHO, ingeniero civil M.sc. Director de la investigación por su apoyo y colaboración en la realización de este proyecto y por sus grandes aportes intelectuales.
- JAIRO HERNÁNDEZ SALAZAR, Técnico del Laboratorio de Materiales por su asesoría y colaboración a lo largo de la investigación.
- A todas las personas que directa o indirectamente apoyaron o hicieron aportes para la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. MARCO CONCEPTUAL	23
2.1 MORTERO	23
2.1.1 Definición	23
2.1.2 Propiedades del Mortero en Estado Plástico	24
2.1.3 Propiedades del Mortero en Estado Endurecido	24
2.1.4 Clasificación de los Morteros	25
2.1.5 Normas NTC para Morteros de Construcción	27
2.2 CAUCHO DE NEUMÁTICO	27
2.2.1 Características del Caucho de Neumático	30
2.2.2 Contexto Ambiental	31
2.2.3 Reutilización del Caucho de Neumático	32
3. MODELO EXPERIMENTAL	34
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS	34
3.1.1 Caracterización del Cemento	34
3.1.2 Caracterización de la Arena	35
3.1.3 Caracterización del Caucho Molido	36
3.1.4 Caracterización del Agua	38
3.2 TRATAMIENTO QUÍMICO DEL ADITAMENTO (CAUCHO MOLIDO)	38
3.2.1 Tratamiento a Base de Peróxido de Hidrogeno	40

3.2.2 Tratamiento a Base de Ácido Nítrico	41
3.3 DISEÑO DE MEZCLA	44
3.3.1 Diseño de Mezcla Patrón	44
3.3.2 Diseño de Mezcla con Aditamento de Caucho Molido	47
3.4 ENSAYOS DE LABORATORIO	53
3.4.1 Ensayo de Fluidez	54
3.4.2 Ensayo a Compresión	55
3.4.3 Ensayo a Flexión	56
3.4.4 Ensayo a Tracción	57
3.4.4.1 Preparaciones de las Muestras	58
3.4.5 Ensayo de Acústica	59
3.4.5.1 Preparaciones de las Muestras para el Ensayo del Tubo de Impedancia	63
3.4.5.2 Estudio de las Propiedades Acústicas	64
3.4.5.2.1 Descripción del Equipo	64
3.4.5.2.2 Ensayo Acústico por el Método del Tubo de Impedancia	65
3.4.6 Ensayos de Durabilidad	69
3.4.6.1 Método de Prueba Estándar para Densidad, Porosidad y Absorción ASTM C642	69
3.4.6.2 Conductividad Térmica	72
3.4.6.2.1 Fabricación de Probetas	75
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	77
4.1 FLUIDEZ	77
4.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	78
4.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	82
4.4 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	84
4.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	86
4.6 IMPEDANCIA ACÚSTICA	88
4.7 DENSIDAD POROSIDAD Y ABSORCIÓN	91

5. CONCLUSIONES	95
6. RECOMENDACIONES	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura No 1. Composición química del caucho de llanta	31
Figura No 2. Prototipo adaptado por los autores	38
Figura No 3. Prototipo creado por los autores para mezclado	39
Figura No 4. Equipo convencional adaptado por los Autores	40
Figura No 5. Medidor de PH usado	43
Figura No 6. Tabla de fluidez según uso del mortero	45
Figura No 7. Ensayo para determinar la fluidez de la pasta de mortero	54
Figura No 8. Ensayo para determinar la resistencia a la Compresión	55
Figura No 9. Ensayo para determinar la fuerza a la Flexión	56
Figura No 10. Probeta de mortero para ensayo a tracción	57
Figura No 11. Marca de la máquina de tracción directa	59
Figura No 12. Máquina para ensayos a Tracción del mortero	59
Figura No 13. Representación de la máxima y mínima amplitud en un tubo de impedancia	62
Figura No 14. Probetas para ensayo de Acústica según su dosificación	64
Figura No 15. Tubo de impedancia, Ensayo de acústica.	65
Figura No 16. Esquema de tubo de Kundt (a) y perfil de la onda estacionaria formada en su interior (b)	66
Figura No 17. Osciloscopio Ensayo Acústica	67
Figura No 18. Generador de señal Ensayo Acústica	67
Figura No 19. (a-b).Desarrollo del ensayo acústico por el método del tubo de impedancia	68
Figura No 20. Probetas para Ensayo de densidad porosidad y absorción - ASTM C642 según su dosificación	69
Figura No 21. Esquema Grafico del Banco Conductividad Térmica	72
Figura No 22. Recipiente para Aislar - Ensayo Conductividad Térmica	73

Figura No 23. Rio - Ensayo Conductividad Térmica	73
Figura No 24. Termocuplas - Ensayo Conductividad Térmica	74
Figura No 25 .Fuente de Energía - Ensayo Conductividad Térmica	74
Figura No 26. Tarjeta de Arduino - Ensayo Conductividad Térmica	74
Figura No 27. Probetas para ensayo de Conductividad Térmica según su dosificación	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla No 1. Granulometría de la arena	35
Tabla No 2. Peso Específico de la arena	36
Tabla No 3. Granulometría del caucho entregado por la reencauchadora	37
Tabla No 4. Densidad y Absorción antes y después del tratamiento con peróxido de Hidrogeno	41
Tabla No 5. Densidad y Absorción antes y después del tratamiento con Ácido Nítrico	43
Tabla No 6. Contenido de materiales por metro cúbico Mezcla de 2500 Psi	46
Tabla No 7. Contenido de materiales por metro cúbico Mezcla de 3000 Psi	47
Tabla No 8. Granulometría para 1410 gramos de arena Fina	48
Tabla No 9. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 1%	49
Tabla No 10. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 2%	49
Tabla No 11. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 3%	50
Tabla No 12. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 4%	50
Tabla No 13. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 5%	50
Tabla No 14. Granulometría para 1410 gramos de arena	51
Tabla No 15. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 3000 Psi con caucho molido al 6%	52
Tabla No 16. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 3000 Psi con caucho molido al 8%	52

Tabla No 17. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 3000 Psi con caucho molido al 10%	52
Tabla No 18. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 3000 Psi con caucho molido al 12%	53
Tabla No 19. Ensayos Realizados	53
Tabla No 20. Resistencia a la compresión mortero 2500 Psi sin caucho	79
Tabla No 21. Resistencia a la compresión mortero 2500 Psi Con caucho	80
Tabla No 22. Resistencia a la compresión mortero 3000 Psi sin caucho	80
Tabla No 23. Resistencia a la compresión mortero 3000 Psi con caucho	81
Tabla No 24. Ensayo a Flexión probetas 2500 Psi	83
Tabla No 25. Ensayo a Flexión probetas 3000 Psi	83
Tabla No 26. Resultados de resistencia a tracción para probetas modificadas y sin modificar diseñadas para Resistir 2500 Psi en compresión	84
Tabla No 27. Resultados de resistencia a tracción para probetas modificadas y sin modificar diseñadas para Resistir 3000 Psi en compresión	85
Tabla No 28. Coeficiente de conductividad térmica mezcla de 2500 Psi	86
Tabla No 29. Coeficiente de conductividad térmica mezcla de 3000 Psi	87
Tabla No 30. Coeficientes de absorción acústica	89
Tabla No 31. Resultados ensayo de porosidad, densidad y absorción ASTM C642	91

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Grafica No 1. Fluidez promedio en función de la cantidad de caucho molido usada para mezcla de 2500 psi	77
Grafica No 2. Fluidez promedio en función de la cantidad de caucho usada para mezcla de 3000 psi	78
Gráfico No 3. Resistencia a la Compresión Diseño 2500 y 3000 Psi con y sin caucho	81
Gráfico No 4. Reducción de la resistencia a la flexión en relación a la cantidad de caucho molido y resistencia de diseño	84
Gráfico No 5. Reducción de la resistencia a la tracción en relación a la cantidad de caucho molido y resistencia de diseño.	85
Grafico No 6. Resistencia a la transferencia de calor en base a coeficiente de conductividad térmica	88
Grafico No 7. Coeficiente de Absorción acústica para cada diseño de mezcla y porcentaje de caucho	89
Grafico No 8. Comportamiento acústico de cada probeta expuesta a frecuencia de 500 Hz	90
Grafico No 9. Densidad seca para cada diseño de mezcla con su porcentaje de caucho respectivo	92
Grafico No 10. Espacio de poros permeables o volumen de vacíos para cada diseño de mezcla con su porcentaje de caucho respectivo	93
Grafico No 11. Porcentaje de absorción para cada diseño de mezcla con su porcentaje de caucho respectivo	94

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico	101
Anexo B. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino	105
Anexo C. Dosificación del mortero, Gráfica de contenido de cemento y Relación agua-cemento	114

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN MORTERO PARA RECUBRIMIENTO MODIFICADO CON ADITAMENTO DE CAUCHO DE NEUMÁTICO MOLIDO*

AUTORAS: JENNIFER TATIANA GÓMEZ GÓMEZ, ANDREA MARCELA SIERRA LIZARAZO**

PALABRAS CLAVE: Diseño de Mezcla, Mortero, Caucho, Caracterización, Falla, Resistencia, Viabilidad.

DESCRIPCIÓN:

El propósito del presente análisis al comportamiento de un material compuesto es estudiar la viabilidad de implementar un mortero modificado con caucho de llanta reciclado producto de residuo de una reencauchadora, en el área de la construcción bajo la premisa de encontrar utilidad a este subproducto residual y buscar un tamaño de caucho que pueda reemplazarse en la arena mediante diferentes cantidades de agregado alternativo (caucho molido), con el fin de obtener una resistencia de 2500 Psi a la compresión que es la correspondiente para morteros usados como recubrimiento. Adicionalmente se preparó un mortero con resistencia de 3000 Psi a la compresión, para determinar cuál sería la cantidad necesaria de caucho agregándole en un mayor porcentaje y lograr la resistencia especificada para morteros de recubrimiento; Con los porcentajes óptimos de caucho para cada diseño se realizaron ensayos de fluidez, compresión, flexión, tracción, durabilidad y acústica observando que cambios tenía en su comportamiento físico y comparándolo con un mortero sin modificar. Después de realizados los ensayos de laboratorio se encontró que a medida que aumenta el porcentaje de caucho disminuye la resistencia a compresión, flexión y tracción, pero mejora las condiciones de aislamiento térmico y acústico, beneficiando así su uso como mortero de recubrimiento.

* Trabajo de grado.

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director, Capacho, Luis Alberto, M.Sc. en Ingeniería Civil.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE MODIFIED COATING MORTAR WITH ADDED RUBBER TIRE*

AUTHORS: JENNIFER TATIANA GOMEZ GOMEZ, ANDREA MARCELA SIERRA LIZARAZO**

KEYWORDS: Composite material, rim rubber, acoustics, durability, porosity, thermal conductivity, acoustic impedance, cement mortar

DESCRIPTION:

The purpose of this analysis to the behavior of a composite material is to study the viability of implementing a mortar modified with recycled rubber tire in the construction field under the premise of finding utility for this residual by product and searching for a rubber size that can be replaced in the sand through different amounts of alternative aggregate (ground rubber) in order to obtain a 2500 Psi resistance, which is the aiming point for mortars used as coating. In addition, a mortar with 3000 Psi was made in order to determine the required quantity to get the specified resistance for coating mortars; fluidity, compression, flexion, traction, durability and acoustic tests were taken with the optimum rubber percentages for each design noting which changes had on their physical behavior and comparing it with an unmodified mortar made in the laboratory as a sample used as a complement to a comparative method. As a result, it was found that as the percentage of rubber rises, the compression, flexion and traction resistance decreases as well as the conditions of thermal and acoustic insulation improve benefiting thus, their use as coating mortar.

* Degree work.

** Industrial University of Santander. Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director, Capacho, Luis Alberto, M.Sc. in Civil Engineering

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo, el ser humano en su constante necesidad de evolucionar y con el fin de mejorar su calidad de vida, satisfacer sus necesidades y garantizar su seguridad, ha generado una serie de análisis y ensayos que permiten reconocer y optimizar propiedades de materiales usados en construcción, algunos de estos definidos como materiales compuestos.

El uso del mortero en la construcción ha sido muy diverso abarcando un amplio espectro de clasificaciones dentro de las que cabe renombrar el mortero a base de cemento portland; en Colombia se usa ampliamente como material de relleno y como material de pega en la mampostería, además existen otros morteros que no tienen función estructural y se destinan a recubrimiento como pañetes. Sin embargo, las situaciones adversas presentes en la cotidianidad de la naturaleza, ponen al límite las características de dicho material, realidad que induce a querer maximizar la calidad del mortero mejorando sus propiedades.

Tiempo atrás se ha venido mezclando el cemento con diferentes materiales buscando mejorar su rendimiento. Los neumáticos son un auténtico atentado contra el entorno, su material (caucho) y su masiva fabricación los convierten en un problema ambiental en todo el mundo, casi la mitad de esta enorme cantidad de desechos no está controlada; a menudo, para acabar con estos residuos se queman ocasionalmente en hornos industriales, pero es evidente que trasladar la contaminación a la atmósfera en forma de grandes cantidades de sustancias tóxicas es crear otro problema.

En vista a la gran contaminación y al mal manejo de estos residuos, el objetivo particular del proyecto es analizar el mortero normal y modificado con aditamento de caucho de neumático molido mediante ensayos de laboratorio y observando las diferencias en cuanto al comportamiento mecánico de los dos materiales y

finalmente basados en los resultados concretar una solución al interrogante correspondiente a la utilidad del mismo.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar y comparar el comportamiento mecánico de un mortero de recubrimiento normal y uno modificado con aditamento de caucho de neumático molido.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las cantidades específicas con las que se va a realizar un diseño de mezcla de 2500 [Psi] Utilizando caucho de neumático molido.
- Realizar ensayos de laboratorio que permitan caracterizar mecánicamente el mortero modificado sometiéndolo a ensayos de compresión tracción, flexión, Durabilidad y acústica.
- Determinar si es viable implementar el caucho de neumático molido en un mortero convencional para ser utilizado en recubrimientos.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 MORTERO

Es de suma importancia para esta investigación un amplio estudio de los morteros, debido a que a partir del conocimiento de las características esenciales de dichas mezclas podremos examinar las ventajas y desventajas logradas al añadir partículas de Caucho de llanta molido en diversos porcentajes y granulometrías, teniendo como punto de referencia los morteros tradicionales.

2.1.1 Definición. El mortero es una mezcla homogénea de una materia cementante (cemento), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos.

Dependiendo de su dosificación, produce una trabajabilidad y una resistencia apta para el respectivo uso que se le vaya a dar dentro de los siguientes usos existentes en la industria de la construcción:

- Recubrimiento de muros y pisos
- Relleno de mampostería estructural
- Pega de unidades de mampostería
- Para elementos estructurales (eventualmente)

Ahora bien, es de tener en cuenta que los morteros se clasifican según su endurecimiento y según los materiales que lo constituyan, además de su preparación. [1]

2.1.2 Propiedades del Mortero en Estado Plástico

Manejabilidad: Es una medida de la facilidad de manipulación de la mezcla, está relacionada con la consistencia de la mezcla en cuanto a blanda o seca, tal que como se encuentra en estado plástico.

Retención de agua: se conoce como la capacidad del mortero de mantener su plasticidad cuando queda en contacto con la superficie sobre la que va a ser colocado, influye en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final, pues un mortero que no retenga el agua no permite la hidratación del cemento.

Velocidad de endurecimiento: Se refiere a la tasa de evaporación del agua de la mezcla en el tiempo. Los tiempos de fraguado final e inicial de un mortero están entre 2 y 24 horas.

Dependen de:

- Tipo de curado
- Composición de la mezcla
- Condiciones ambientales como el clima y humedad. [1]

2.1.3 Propiedades del Mortero en Estado Endurecido

Retracción: Hace referencia al cambio de volumen de la mezcla debido a reacciones químicas que se dan en el momento de dilatación.

Es proporcional al espesor de la capa, a la riqueza en cemento de la mezcla y a la mayor absorción de la pared sobre la que se vaya a aplicar.

Adherencia: es la capacidad de absorber, tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero y una estructura, es decir la capacidad de responder monóticamente con las piezas que une ante solicitudes de carga.

Resistencia: Es la respuesta de estructuras a base de mortero al ser sometidas a diferentes requerimientos de carga como:

- Compresión
- Flexión
- Tracción

Durabilidad: Se define como la resistencia que presenta el mortero ante agentes externos como:

- Baja temperatura,
- Penetración de agua,
- Desgaste por abrasión y agentes corrosivos

Apariencia: La apariencia del mortero después de fraguado es la característica que le permite verse agradable a la vista; Para lograr una buena apariencia es necesario aplicar morteros de buena plasticidad. [1]

2.1.4 Clasificación de los Morteros

Tipos de endurecimiento: se basa en cómo se lleva a cabo el endurecimiento de la mezcla de mortero.

- Aéreos
- Hidráulicos o Acuáticos

Tipos de Composición: basado en clasificar los morteros según el material distintivo usado en su preparación:

- **Morteros calcáreos:** aquellos donde interviene la cal como material aglomerante, lo que le permite alta manejabilidad y en nuestro país se usa limitadamente.
- **Morteros de yeso:** se prepara con yeso hidratado con agua y en nuestro país se usa como estuco.
- **Morteros de cal y cemento:** En estos morteros se sustituye parte del cemento por cal logrando una buena resistencia y alta manejabilidad.
- **Morteros de cemento:** Se componen de arena y cemento portland, sus principales características son su alta resistencia y durabilidad y es el más usado en nuestro país.
- **Mortero celular:** Caracterizado por la incorporación de aire, espuma o cascarilla de arroz su principal propiedad es su bajo peso.
- **Mortero polimérico:** caracterizado por poseer propiedades plásticas.

Tipo de uso: basado en la función que cumplen

- Mortero de pega
- Mortero de relleno
- Mortero de recubrimiento
- Morteros para elementos estructurales

Tipo de preparación:

- Mortero pre mezclado
- Mortero preparado in-situ [2]

2.1.5 Normas NTC para Morteros de Construcción

- **NTC 2240** - Concretos - Agregados usados en morteros de mampostería.
- **NTC 3356** - Concretos - Mortero premezclado para mampostería.
- **NTC 3329** - Concretos - Especificaciones del mortero para unidades de mampostería.
- **NTC 4050** - Ingeniería Civil y Arquitectura - Cemento para mampostería.
- **NTC 112** - Ingeniería Civil y Arquitectura - Mezcla mecánica de pastas de cemento Hidráulico y morteros de consistencia plástica.
- **NTC 220** - Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado. [2]

2.2 CAUCHO DE NEUMÁTICO

Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Consiste en una cubierta principalmente de caucho que contiene aire el cual soporta al vehículo y su carga.

Su invención se debe al norteamericano Charles Goodyear quién descubrió, accidentalmente en 1880, el proceso de vulcanización, con el que se da al caucho la resistencia y solidez necesaria para fabricarlo. En la actualidad, la mayoría de los neumáticos de vehículos de pasajeros como los de camión son radiales, por lo que están compuestos de una banda de rodamiento elástica, una cintura prácticamente inextensible y una estructura de arcos radialmente orientada, sobre una membrana inflada y sobre unos aros también inextensibles que sirven de

enganche a otro elemento rígido, que es la llanta. También existe otro tipo de neumáticos llamados diagonales, utilizados principalmente en camiones. La complejidad de la forma y de las funciones que cada parte del neumático tiene que cumplir se traduce también en una complejidad de los materiales que lo componen.

El principal componente del neumático es el caucho: casi la mitad de su peso. La fabricación de neumáticos concentra un gran porcentaje de la industria del caucho constituyendo el 60 % de la producción anual del mismo. Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar según sea el tipo de esfuerzo al que son sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira.

El caucho natural se extrae a partir del árbol *Hevea Brasiliensis* que es un látex con partículas de caucho en suspensión. Después de un proceso de secado y de ahumado se utilizan diferentes productos. Hoy en día alcanza el 30 % del mercado de los cauchos, el resto lo ocupan los cauchos sintéticos, todos basados en hidrocarburos. Los tipos de caucho más empleados en la fabricación de los neumáticos son: Cauchos naturales (NR), Polibutadienos (BR), Estireno – Butadieno (SBR) y Polisoprenos sintéticos (IR).

La matriz de caucho más utilizada es el copolímero estireno-butadieno (SBR), en el que la proporción es de aproximadamente un 25 % en peso de estireno, o una mezcla de caucho natural y SBR. Todos los tipos de cauchos poseen diferentes propiedades, pero también con algo en común: todos, una vez vulcanizados, pueden ser muy duraderos, por lo que necesitarían una gran cantidad de tiempo para su degradación.

La combinación se realiza de modo que los cauchos naturales proporcionen elasticidad y los sintéticos, estabilidad térmica. Esta combinación de efectos

favorece la durabilidad y la capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias del tránsito.

Se agregan además, otros materiales al caucho para mejorar sus propiedades, tales como: suavizantes, que aumentan la trabajabilidad del caucho, antes de la vulcanización; óxido de Zinc y de Magnesio, comúnmente denominados activadores, pues son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias horas a pocos minutos; antioxidantes, para dar mayor vida al caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono; y finalmente negro de humo, especie de humo negro obtenido por combustión incompleta de gases naturales, que entrega mayor resistencia a la abrasión y a la tensión.

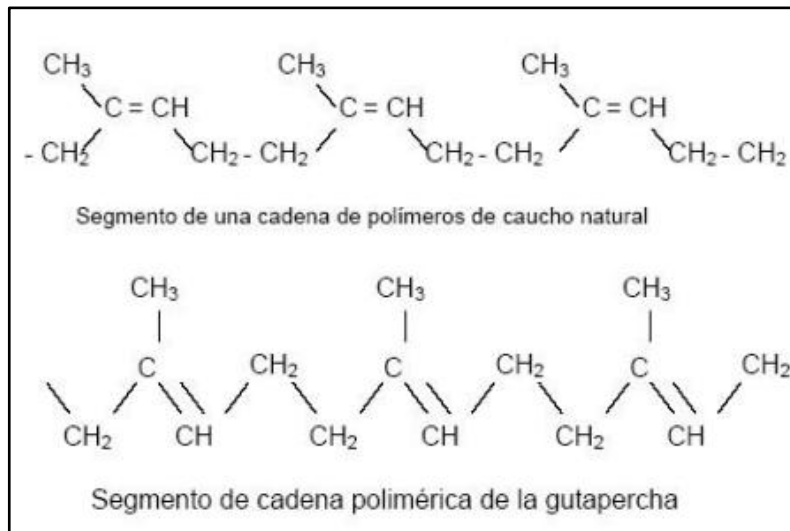
Además de caucho, los neumáticos están compuestos por:

- **Rellenos reforzantes:** el negro de humo, formado de partículas muy pequeñas de carbono, que aumenta la tenacidad y la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste.
- **Fibras reforzantes:** textiles y de acero, usualmente en forma de hilos, que aportan resistencia a los neumáticos: algodón, nylon y poliéster. La cantidad de acero y fibras sintéticas reforzantes en los neumáticos varía según el fabricante.
- **Plastificantes:** se adicionan para facilitar la preparación y elaboración de las mezclas, utilizándose para el control de la viscosidad. Reducen la fricción interna durante el procesado y mejoran la flexibilidad a bajas temperaturas del producto: aceites minerales (aromáticos, nafténicos y parafínicos) y de tipo éster.

- **Agentes vulcanizantes:** el azufre se usa para entrecruzar las cadenas de polímero en el caucho.
- **Acelerantes:** compuestos órgano - sulfurados, benzotiazol y derivados, óxido de zinc y ácido esteárico.
- **Retardantes:** N-nitroso difenil amina. - Otros componentes (antioxidantes o antiozonizantes, adhesivos).[3]

2.2.1 Características del Caucho de Neumático. Todos los tipos de cauchos poseen diferentes propiedades, pero también con algo en común: todos, una vez vulcanizados, pueden ser muy duraderos, por lo que necesitarían una gran cantidad de tiempo para su degradación. La combinación se realiza de modo que los cauchos naturales proporcionen elasticidad y los sintéticos, estabilidad térmica. Esta combinación de efectos favorece la durabilidad y la capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias del tránsito. La estructura de los cauchos naturales está formada por cis-1,4 polisopreno mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos y sales inorgánicas, entre otros. Se encuentra así un polímero de cadena larga y enredada en forma de espiral, de peso molecular medio, 5×10^5 g/mol, que a temperatura ambiente está en un estado de agitación continua. Este comportamiento general es debido en parte al impedimento estérico del grupo metilo y el átomo de hidrógeno, en el mismo lado del doble enlace carbono-carbono. Esta cadena se complementa con otro isómero estructural llamado gutapercha. [3]

Figura No 1. Composición química del caucho de llanta



2.2.2 Contexto Ambiental. Los automóviles contaminan durante su uso y también cuando sus piezas dejan de ser útiles. Los neumáticos se han convertido en los últimos años en uno de los focos contaminantes más extendidos sobre el planeta.

La masiva fabricación de ruedas es uno de los mayores problemas medioambientales de los últimos años, por su costoso proceso de fabricación y también por el alto coste que conlleva su desaparición.

En la combustión de los neumáticos se generan productos muy perjudiciales para la salud como son el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, óxidos de zinc, benceno, fenoles, óxidos de plomo o tolueno, que se dispersan en el aire.

La masiva fabricación de ruedas es uno de los mayores problemas medioambientales de los últimos años por su costoso proceso de fabricación y por el alto coste que conlleva su desaparición. Una sola rueda de camión necesita

para su fabricación medio barril de petróleo crudo, y su elaboración y posterior desaparición siempre genera emisiones de CO₂ (óxido de carbono) a la atmósfera

“Un neumático al aire libre va librando muy lentamente los contaminantes, como son los bifenilos policlorados (PCB), tóxicos muy peligrosos. Otro de los riesgos de los neumáticos tiene que ver con su forma. Debido al diseño de los neumáticos, cuando cae agua de lluvia reiteradamente es difícilísimo sacarla una vez que ha entrado en él y siempre quedará un fondo dentro de la cubierta. Ese agua es el caldo de cultivo ideal para que aniden ratas, insectos y otros animales dañinos que pueden resultar cuatro mil veces más peligrosos de los que se multiplican en una charca”, explica Baselga. [4]

2.2.3 Reutilización del Caucho de Neumático. Estos neumáticos es una de las fuentes más grandes de residuos debido al gran volumen producido y a su durabilidad. Pero, curiosamente, también es uno de los materiales de desechos más reutilizados, ya que la goma es muy resistente y se puede volver a utilizar para elaborar otros productos. [5]

Según la responsable de Residuos de "Ecologistas en Acción", “las grandes marcas de neumáticos han creado un sistema integral de gestión, por el cual ellos mismos los recogen de los talleres y los tratan. El primer paso es separar los que tienen posibilidades de ser recauchutados. Los que ya no tienen ningún uso se muelen y se separa el caucho del metal, del textil y de los demás componentes. Esa granza de caucho picado se utiliza para la creación de suelos de canchas de baloncesto, como aislantes de vehículos , en la fabricación de losetas de goma , nuevos productos de calzado, como parte de los componentes de las capas asfálticas que se usan en la construcción de carreteras además de representar una interesante salida para grandes cantidades de neumáticos usados su trituración para mezclarlos con el asfalto ayuda a mejorar sus características, al

tiempo que ahorra tener que usar un polímero que también resulta contaminante.[4]

Al margen de los beneficios ambientales, a nivel práctico el resultado es un asfalto más seguro, con mayores prestaciones, aunque también suele ser caro con respecto al convencional. En concreto, se logra un pavimento más viscoso y elástico, que se deforma menos, aguanta la intemperie, las temperaturas extremas y el agua. [6]

También gana en durabilidad y reduce de forma significativa la contaminación acústica, haciendo innecesarias las barreras de contaminación acústica, con lo que se evitan también sus inconvenientes. En este sentido, si se tienen en cuenta las prestaciones que se obtienen, incluyendo el gesto verde, su mayor precio acaba no siéndolo tanto. [6]

3. MODELO EXPERIMENTAL

Se inició con la caracterización de los materiales a usar para la realización de la mezcla, cemento (peso específico y tiempos de fraguado); Arena fina y caucho molido (contenido de materia orgánica, Densidad y Absorción, y granulometría) y agua del acueducto metropolitano de Bucaramanga.

Se seleccionó una resistencia bajo la cual trabajar de 2500 Psi y una dosificación del aditamento (caucho de llanta molido) enfocada hacia la funcionalidad a la compresión del material compuesto, que varía entre el 1% y el 12% del volumen de arena fina, y posteriormente se midieron algunas propiedades mecánicas.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Para el desarrollo del proceso de caracterización se aplicaron normas vigentes en Colombia (NTC) y a nivel internacional (ASTM).

3.1.1 Caracterización del Cemento. Se hizo uso de un cemento hidráulico, producido por “ARGOS”, documentado como portland Tipo I, en su presentación de 1 Kg, con las especificaciones descritas en su ficha técnica ARGOS, y se le hizo una rectificación de peso específico:

- Peso específico (NTC 221)

Nota: véase anexo A

Teniendo como consideración importante que este primer material es el primer conglomerante del compuesto y es quien aporta la mayor parte de la resistencia a la mezcla de mortero.

3.1.2 Caracterización de la Arena. Conformada por un conjunto de granos de diversa forma, composición química y tamaño que oscilan entre los 0,074 mm y los 4,76 mm, la arena usada en el presente proceso proviene de matanza Santander es Arna fina de Rio, dando como resultado de granulometría, densidad y absorción:

Tabla No 1. Granulometría de la arena

RESULTADOS				
Tamiz No.	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
---	gr	gr	%	%
4	25	2.5	2.5	97.5
8	30	3	5.5	94.5
16	57	5.7	11.2	88.8
30	83	8.3	19.5	80.5
50	484	48.4	67.9	32.1
100	241	24.1	92	8
Fondo	71	7.1	99.1	0.9
Total				Modulo Finura
991		Peso Muestr 1000		1.986

Tabla No 2. Peso Específico de la arena

ARENA FINA	
A	624
B	500
C	929
D	487

Gravedad especifica real	2.6758
Gravedad especifica Aparente	2.4974
Gravedad especifica aparente S.S.S	2.5641

% Absorción	1.3994
-------------	--------

Su caracterización se efectuó siguiendo los lineamientos dictados por los siguientes ensayos y sus respectivas normas:

- Tamizado de materiales granulados (NTC 77)
- Método para determinar el contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros u hormigones (NTC 127)
- Método para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos (NTC 237)

Nota: véase anexo B

3.1.3 Caracterización del Caucho Molido. Este material proviene de las llantas de camión usadas y que posteriormente han pasado por un proceso de reencauche donde se le realiza un raspado a la superficie gastada; Este material ha sido tomado de los residuos de la reencauchadora “Bulldog” ubicada en la zona industrial del barrio Girardot en el área metropolitana de Bucaramanga.

Realizando un tamizado del bulto de caucho triturado que entrega la reencauchadora, se determina que el material se encuentra en un grano grande, el mayor porcentaje de caucho que se retiene se encuentra en el tamiz no 16, descartando que este material sea fino como la arena.

Tabla No 3. Granulometría del caucho entregado por la reencauchadora

RESULTADOS				
Tamiz No.	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
---	gr		%	%
4	2144.2	11.2	11.2	88.8
8	3930.4	20.5	31.6	68.4
16	8161.1	42.5	74.2	25.8
30	2911.0	15.2	89.3	10.7
50	1388.9	7.2	96.6	3.4
100	514.5	2.7	99.2	0.8
200	122.0	0.6	99.9	0.1
Fondo	17.8	0.1	100.0	0.0
Total	19189.9	99.97	Peso Muestra	19196

Como se reemplazó arena fina retenida del tamiz No 50 , se hacía necesario un tratamiento de molienda del caucho para asegurar que el caucho usado fuese del mismo tamaño que la arena a sustituir , el caucho de neumático fue transportado desde la reencauchadora hasta un taller de mecánica industrial en el cual se cuenta con un molino convencional adaptado por los autores (figura no 2) por el que se pasó el residuo con el fin de obtener granos que pudiesen pasar por el Tamiz N° 30 y retenerse en el Tamiz N° 50.

Figura No 2. Prototipo adaptado por los autores



Los ensayos realizados a este material fueron:

- Tamizado de materiales granulados (NTC 77)
- Método para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos (NTC 237)

Nota: véase anexo B

3.1.4 Caracterización del Agua. El agua usada para el proceso proviene del acueducto Metropolitano de Bucaramanga, por lo cual fue necesario realizar análisis químicos debido a su reconocida calidad; esta agua es usada en diferentes obras de construcción con el fin de preparar morteros y/o concretos dentro del área metropolitana.

3.2 TRATAMIENTO QUÍMICO DEL ADITAMENTO (CAUCHO MOLIDO)

Con el fin de eliminar material graso encontrado en la superficie del caucho y mejorar algunas propiedades químicas del mismo como son la densidad y la

absorción, facilitando así el proceso de mezclado ,se ejecutó un lavado con dos agentes químicos fuertemente oxidantes, como lo son el Peróxido de Hidrogeno y Ácido Nítrico por separado. Además, se realizó una verificación de la efectividad de los agentes en dos intervalos de tiempos diferente, sumergiendo el material en los agentes durante 2 horas y 6 horas.

Se fabricó una máquina que fuera capaz de mezclar este material sin afectar la reacción química que debía tener cuando el caucho y el agente oxidante entraran en contacto, primero se fabricó un prototipo (figura no 3) que asegurara que todas las partículas de caucho se sumergieran en el agente y se mezclaran, el material escogido fue polietileno de alta ya que este no generaba ninguna reacción secundaria.

Figura No 3. Prototipo creado por los autores para mezclado



Se adaptó este prototipo a una roscadora, ya que es una máquina que puede funcionar más de 2 y 6 horas continuamente sin que presente inconvenientes en el proceso de mezclado (figura no 4).

Figura No 4. Equipo convencional adaptado por los Autores



La metodología de tratamiento fue igual para los dos agentes, consistía en introducir 500 gr de caucho molido en una solución de 500 ml del agente a concentraciones del 50% durante 2 y 6 horas respectivamente cada uno por separado , y luego realizando un proceso de lavado con agua directa a presión.

3.2.1 Tratamiento a Base de Peróxido de Hidrogeno. El peróxido de hidrógeno (H_2O_2), también conocido como agua oxigenada, es un compuesto químico con características de un líquido altamente polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno tal como el agua, pero que en general se presenta como un líquido ligeramente más viscoso que ésta. Es conocido por ser un poderoso oxidante.

A temperatura ambiente es un líquido incoloro con olor penetrante e incluso desagradable. Pequeñas cantidades de peróxido de hidrógeno gaseoso se encuentran naturalmente en el aire. El peróxido de hidrógeno es muy inestable y se descompone lentamente en oxígeno y agua con liberación de gran cantidad de calor. Su velocidad de descomposición puede aumentar mucho en presencia de catalizadores. Aunque no es inflamable, es un agente oxidante potente que puede

causar combustión espontánea cuando entra en contacto con materia orgánica o algunos metales, como el cobre, la plata o el bronce.

El peróxido de hidrogeno es un agente oxidante fuerte que posee una gran reactividad con los dobles enlaces C=C presentes en la superficie del caucho, lo que incrementa la polaridad de la misma y consecuentemente la mojabilidad del material. [7].

Para el proceso de mezclado a intervalo de 2 y 6 Hr de tiempo en el peróxido se observó que los resultados no cambiaban y la cantidad de horas que se hiciera el proceso de mezclado no afectaba el procedimiento. Después de tratado, el caucho presentó un aumento en el peso específico y la absorción, presentados en la Tabla no 4, estos ensayos fueron verificados a través de ensayos estructurados por la Norma Técnica Colombiana.

Tabla No 4. Densidad y Absorción antes y después del tratamiento con peróxido de Hidrogeno

TRATAMIENTO	DENSIDAD [$Kg\ dm^3$]	ABSORCIÓN [%]
Caucho sin tratar	1,031	0
Caucho + Peróxido de Hidrogeno	1,30	1,5

3.2.2 Tratamiento a Base de Ácido Nítrico. El compuesto químico ácido nítrico (HNO_3) es un líquido viscoso y corrosivo.

Es utilizado comúnmente como un reactivo de laboratorio. Se utiliza para fabricar explosivos como la nitroglicerina y trinitrotolueno (TNT).

Tiene usos adicionales en metalurgia y en refinado, ya que reacciona con la mayoría de los metales y en la síntesis química. Cuando se mezcla con el ácido

clorhídrico forma el agua regia, un raro reactivo capaz de disolver el oro y el platino.

El ácido nítrico se obtiene mezclando pentóxido de dinitrógeno (N_2O_5) y agua. Sintetizar ácido nítrico puro impone habitualmente la destilación con ácido sulfúrico, ya que el ácido nítrico forma un azeótropo con el agua en una composición del 68 % de ácido nítrico y 32 % de agua. Las soluciones comerciales incluyen entre un 52 % y un 68 % de ácido nítrico. Si la solución incluye más de un 86 % de ácido nítrico se nombra como ácido nítrico fumante y viene en dos variedades, blanco y rojo. El ácido nítrico blanco fumante también se llama 100 % ya que casi no tiene agua (menos de un 1 %) según el proceso.

A nivel industrial, se fabrica mediante la síntesis del amoníaco y oxígeno. Ambos elementos se combinan en un reactor de grandes proporciones ante la presencia de un catalizador metálico. Debido a las altas temperaturas que se soportan (700-900 grados Celsius), se utilizan metales que mantengan sus características físicas a estas temperaturas, siendo el más apropiado el platino, en combinación con rodio (5-10%) que le aporta más rigidez.

El ácido nítrico es un agente oxidante fuerte que produce un endurecimiento de la superficie del caucho generando fisuras en el mismo y provocando una ligera oxidación de la superficie, mejorándose el mojado e incrementándose la fortaleza de unión adhesiva [8].

Para el proceso de mezclado del caucho de neumático sumergido en el Ácido nítrico a diferentes intervalos de tiempo se obtuvieron mejores resultados en el mezclado sometido a 6 horas. Tabla no 5, estos ensayos fueron verificadas a través de ensayos estructurados por la Norma Técnica Colombiana.

Tabla No 5. Densidad y Absorción antes y después del tratamiento con Ácido Nítrico

TRATAMIENTO	DENSIDAD [$Kg\ dm^3$]	ABSORCIÓN [%]
Caucho sin tratar	1,031	0
Caucho + Ácido Nítrico	1,29	2,8

Al tratar el caucho con ácido nítrico se observó un resultado más satisfactorio que en el proceso con peróxido de hidrogeno, el porcentaje de absorción del material aumento de 0% a 3% mientras que en con el peróxido aumentó de 0% a 1,5%, lo cual demuestra que la mojabilidad es mejor y consecuentemente la compenetración con la pasta de cemento. Por esta razón se escogió el ácido nítrico como el agente oxidante usado para tratar el caucho de neumático molido a usar en los diseños de mezcla.

Se realizaron ensayos de PH a el caucho tratado con ácido nítrico después de un lavado con agua a presión y se observó que este seguía teniendo un PH acido de 3 que afectaría el diseño de la mezcla de mortero

Figura No 5. Medidor de PH usado



Debido a esto toco realizar lavados más efectivos, 4 lavados con agua a presión durante 5 minutos aproximadamente dejando el caucho tratado en agua por unos intervalos de 4 horas, garantizando que en el momento de realizar la mezcla el caucho con el agua a usar presentara un pH de 7.

3.3 DISEÑO DE MEZCLA

Para el desarrollo del presente estudio se hizo necesario el diseño de un compuesto proporcionalmente equivalente al usado en la industria de la construcción como mortero de recubrimiento normal y uno modificado con caucho de llanta molido, por lo cual se formularon diseños de mezcla correspondientes.

Además, debe tenerse en cuenta que para dicho fin se quiso diseñar 2 mezclas que a la hora de ser falladas a compresión cumpliesen con los 2500 Psi mencionados en el objetivo, para lo cual se implementó una muestra diseñada a 2500 y otra a 3000 Psi, que permitiera fluctuar en un mayor rango el contenido de aditamento sin afectar la resistencia a la compresión.

3.3.1 Diseño de Mezcla Patrón. El diseño de mezcla patrón se realizó con el fin de implementar un método comparativo para el desarrollo del objetivo del presente proyecto.

Ahora bien, con esto se quiso recrear un mortero de recubrimiento, distinción de la que se partió para comenzar a diseñar.

- **Paso 1:** Determinación de la fluidez

Figura No 6. Tabla de fluidez según uso del mortero

CONSISTENCIA	FLUIDEZ %	CONDICIÓN DE COLOCACIÓN	EJEMPLO DE TIPOS DE ESTRUCTURA	EJEMPLO DE SISTEMA DE COLOCACIÓN
Dura (seca)	80 – 100	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos	Proyección neumática, con vibradores de formaleta
Media (plástica)	100 – 120	Sin vibración	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos	Manual con palas y palustres
Fluida (húmeda)	120 – 150	Sin vibración	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos	Manual, bombeo, inyección

- Para la muestra diseñada en este trabajo se requiere una consistencia media y consecuentemente una fluidez de entre 100 y 120 por ciento (%).

- **Paso 2:** Contenido de cemento

Se hizo uso del módulo de finura del agregado previamente calculado con ayuda del ensayo para granulometría, además de una gráfica ubicado en el anexo C con el fin de determinar las siguientes cantidades de cemento:

- **Mezcla de 2500 Psi:** 540 Kg/m³
- **Mezcla de 3000 Psi:** 570 Kg/m³

- **Paso 3:** Contenido de agua

Por medio del mismo documento del anexo C se calculó la relación Agua/Cemento (A/C) en base a la resistencia requerida a los 28 días, se obtuvieron las siguientes relaciones y contenidos de agua:

- **Mezcla de 2500 Psi:** (A/C) = 0,5 **Cant. Agua**= 0,5*540= 270 Kg/m³
- **Mezcla de 3000 Psi:** (A/C) = 0,47 **Cant. Agua**= 0,47*570= 269,6 Kg/m³

● **Paso 4:** Contenido de Arena

Para hallar el contenido de arena, primero se halló el volumen de la misma con la siguiente formula:

$$V_{arena} = 1 - V_{cemento} + V_{agua}$$

$$V = \frac{masa}{densidad}$$

Lo cual arroja como resultado las siguientes cantidades de arena:

- **Mezcla de 2500 Psi:** Vol.: 550 dm³ Masa: 1410 Kg/m³
- **Mezcla de 3000 Psi:** Vol.: 540,4 dm³ Masa: 1386 Kg/m³

Tabla No 6. Contenido de materiales por metro cúbico Mezcla de 2500 Psi

Material	Peso [kg]	Densidad [Kg dm ³]	Volumen [Lt]
Cemento	540	3	180
Agua	270	1	270
Arena	1410,2	2,56	550
PESO TOTAL	2220,2		1000

Tabla No 7. Contenido de materiales por metro cúbico Mezcla de 3000 Psi

Material	Peso [Kg]	Densidad [$Kg\ dm^3$]	Volumen [Lt]
Cemento	570	3	190
Agua	269,6	1	269,7
Arena	1385,5	2,56	540,3
PESO TOTAL	2225,1		1000

3.3.2 Diseño de Mezcla con Aditamento de Caucho Molido. Para el diseño de mezcla con aditamento de caucho de llanta molido se hace uso del diseño de mezcla patrón, al cual se le realizará una variación volumétrica del agregado fino según la resistencia para la cual haya sido diseñada, debido a que a mayor cantidad de caucho agregado más se reducirá la resistencia a la compresión a los 28 días.

Por ello se dividirá de la siguiente forma:

- **Mezcla para lograr una resistencia a la compresión de 2500 Psi:** 1%, 2%, 3%, 4%, 5% de caucho de llanta molido.

Es importante tener en cuenta la granulometría del agregado fino, ya que el grano a reemplazar para el desarrollo de este proyecto es aquel que queda retenido en el tamiz N° 50.

Debido a esto se muestra a continuación la granulometría para la arena correspondiente a la mezcla patrón diseñada para resistir 2500 Psi a compresión:

Tabla No 8. Granulometría para 1410 gramos de arena Fina

Tamiz N°	Masa Retenida [g]
4	35,58
8	42,69
16	81,11
30	118,11
50	688,76
100	342,96
200	75,42
Bandeja	25,62

- Para este diseño se tienen **688,76 gramos** de arena retenidos en el tamiz **N° 50**, lo cual nos permite por medio de conversión volumétrica calcular la cantidad de caucho necesario para el respectivo porcentaje como se muestra a continuación:
- **1% de caucho de llanta molido:**

Debe tenerse presente los valores de densidad obtenidos en el momento de realizar la caracterización de los materiales:

- ✓ **Densidad arena tamiz 50 S.S.S:** 2,6 [$Kg\ dm^3$]
- ✓ **Densidad arena total S.S.S:** 2,56 [$Kg\ dm^3$]
- ✓ **Densidad caucho tratado:** 1,3 [$Kg\ dm^3$]
- ✓ **Densidad del Cemento:** 3 [$Kg\ dm^3$]

Con los cuales se realiza la conversión volumétrica previamente documentada en la “*Tabla 6. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi*” y

posteriormente el cálculo de la cantidad de arena del tamiz N° 50 a reemplazar por caucho de llanta molido de la siguiente forma:

- ✓ Arena retenida en tamiz N°50: 688,76 [Kg]
- ✓ Arena a extraer de tamiz N°50: 688,76 x 1%: 6,887[Kg]
- ✓ Volumen de Arena a extraer: 6,887/2,6: 2,648
- ✓ Volumen de caucho a agregar: 2,648 Lt
- ✓ Kg de caucho a agregar: 2,648 x 1,3: 3,44 [Kg]

Tabla No 9. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 1%

Material	Peso [Kg]	Densidad [<i>Kg dm³</i>]	Volumen [Lt]
Cemento	540	3	180
Agua	270	1	270
Arena total	1410,2	2,56	550
Arena a extraer	6,887	2,6	2,648
Caucho	3,44	1,3	2,648

Tabla No 10. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 2%

Material	Peso [Kg]	Densidad [<i>Kg dm³</i>]	Volumen [Lt]
Cemento	540	3	180
Agua	270	1	270
Arena total	1410,2	2,56	550
Arena a extraer	13,77	2,6	5,29
Caucho	6,886	1,3	5,29

Tabla No 11. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 3%

Material	Peso [Kg]	Densidad [<i>Kg dm³</i>]	Volumen [Lt]
Cemento	540	3	180
Agua	270	1	270
Arena total	1410,2	2,56	550
Arena a extraer	20,66	2,6	7,945
Caucho	10,329	1,3	7,945

Tabla No 12. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 4%

Material	Peso [Kg]	Densidad [<i>Kg dm³</i>]	Volumen [Lt]
Cemento	540	3	180
Agua	270	1	270
Arena total	1410,2	2,56	550
Arena a extraer	27,54	2,6	10,594
Caucho	13,772	1,3	10,594

Tabla No 13. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 2500 Psi con caucho molido al 5%

Material	Peso [Kg]	Densidad [<i>Kg dm³</i>]	Volumen [Lt]
Cemento	540	3	180
Agua	270	1	270
Arena total	1410,2	2,56	550
Arena a extraer	34,432	2,6	13,243
Caucho	17,216	1,3	13,243

- **Mezcla de 3000 Psi:** 6%, 8%, 10%, 12% de caucho de llanta molido.

El propósito fundamental para la realización de un diseño de mezcla patrón de 3000 Psi es el de producir un mortero con cantidades sustituidas más grandes que el 5% de caucho molido y que este siga cumpliendo con la resistencia a la compresión de 2500 Psi objetivo del presente trabajo de grado, debido a que el caucho por su consistencia blanda resta resistencia a la mezcla de mortero seca.

Para esta mezcla debe tenerse en cuenta igualmente la granulometría que varía de acuerdo a la cantidad de arena y esta última a su vez cambia con respecto a la resistencia que se quiere obtener:

- Para 3000 Psi la cantidad de arena es de *1385,5 Kg por metro cubico*; menor a la de la mezcla de 2500 Psi

Tabla No 14. Granulometría para 1410 gramos de arena

Tamiz N°	Masa Retenida [gr]
4	34,95
8	41,94
16	79,69
30	116,04
50	676,67
100	336,94
200	74,09
Bandeja	25,16

- El procedimiento a seguir para la dosificación del contenido de materiales de la mezcla diseñada para 3000 Psi es exactamente el mismo usado para la mezcla diseñada a 2500 Psi.

Tabla No 15. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 3000 Psi con caucho molido al 6%

Material	Peso [Kg]	Densidad [<i>Kg dm³</i>]	Volumen [Lt]
Cemento	570	3	190
Agua	269,6	1	269,6
Arena total	1385,5	2,56	540,345
Arena a extraer	40,60	2,6	15,615
Caucho	20,30	1,3	15,615

Tabla No 16. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 3000 Psi con caucho molido al 8%

Material	Peso [Kg]	Densidad [<i>Kg dm³</i>]	Volumen [Lt]
Cemento	570	3	190
Agua	269,6	1	269,6
Arena total	1385,5	2,56	540,345
Arena a extraer	54,133	2,6	20,82
Caucho	27,06	1,3	20,82

Tabla No 17. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 3000 Psi con caucho molido al 10%

Material	Peso [Kg]	Densidad [<i>Kg dm³</i>]	Volumen [Lt]
Cemento	570	3	190
Agua	269,6	1	269,6
Arena total	1385,5	2,56	540,345
Arena a extraer	67,66	2,6	26,025
Caucho	33,83	1,3	26,025

Tabla No 18. Contenido de materiales por metro cubico mezcla de 3000 Psi con caucho molido al 12%

Material	Peso [Kg]	Densidad [$Kg\ dm^3$]	Volumen [Lt]
Cemento	570	3	190
Agua	269,6	1	269,6
Arena total	1385,5	2,56	540,345
Arena a extraer	81,20	2,6	31,23
Caucho	40,60	1,3	31,23

3.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

El desarrollo de la fase experimental de este proceso investigativo presenta varios ensayos de laboratorio enumerados en la “*Tabla No 19. Ensayos realizados*” con el fin de caracterizar el mortero adicionado con caucho de llanta molido con respecto a su comportamiento físico mecánico.

Tabla No 19. Ensayos Realizados

ENSAYOS DE LABORATORIO
Fluidez
Compresión
Flexión
Tracción
Durabilidad
Acústica

3.4.1 Ensayo de Fluidiez

Figura No 7. Ensayo para determinar la fluidez de la pasta de mortero



Se ejecutó ensayo de Fluidiez para morteros de cemento hidráulico según la NTC 5784, a todos los diseños de mezcla realizados para el análisis en cuestión.

El objetivo de realizar este ensayo fue netamente verificación de cumplimiento del rango escogido según el uso que se le daría a el mortero diseñado para la muestra patrón y la muestra modificada, teniendo en cuenta los diámetros tomados a la muestra después de haber sido sometida a una serie de golpes dictaminados por la respectiva norma como se muestra en la Figura 7. Finalmente se tomó un promedio entre 4 diámetros medidos en la práctica y ese fue el porcentaje de fluidez de cada una de las muestras.

3.4.2 Ensayo a Compresión

Figura No 8. Ensayo para determinar la resistencia a la Compresión



El ensayo a compresión mide el comportamiento del mortero de cemento hidráulico sometido a cargas de compresión en estado endurecido; para este procedimiento se hizo uso de probetas en forma cubica de 50 mm de lado fundidas bajo las especificaciones dictadas en la Norma Técnica Colombiana NTC 220 Para el proceso de mezclado, preparación y almacenamiento de probetas se siguieron rigurosamente los requerimientos de la norma.

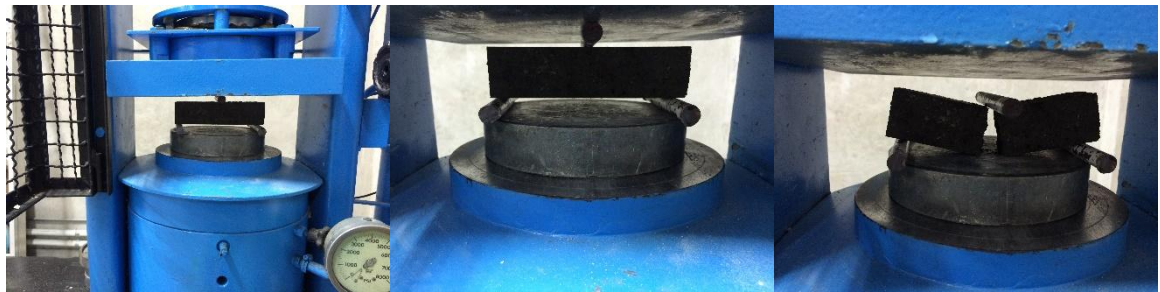
Para el desarrollo del sometimiento a compresión de probetas se hizo necesaria la ayuda de la maquina universal de ensayo, dentro de los rangos de carga y velocidad permitidos.

Ahora bien, para calcular la resistencia a la compresión se fabrican moldes cúbicos con las dimensiones establecidas previamente que fueron sometidos a carga axial de compresión como lo muestra la Figura 7, hasta lograr la fractura de la muestra. Se tuvo en cuenta que las dimensiones de los lados de las probetas

fuera simétricas para lo cual se usó un calibrador pie de rey con precisión de 0,01 mm obteniendo dimensiones exactas de cada uno de los lados de los especímenes; además se examinó cuidadosamente que las caras de los cubos estuviesen lisas, lijando las irregularidades para que la carga aplicada se distribuyera uniformemente sobre la cara más prolija. Finalmente, para obtener el esfuerzo a compresión se dividió la carga máxima entre el área transversal de la probeta. Este procedimiento se llevó a cabo de la misma forma para todos y cada uno de los especímenes.

3.4.3 Ensayo a Flexión

Figura No 9. Ensayo para determinar la fuerza a la Flexión



El ensayo de flexión se llevó a cabo en la misma maquina universal de ensayo usada para la prueba de compresión simple, pero siguiendo los lineamientos expuestos por la NTC 120, requerida para el desarrollo del procedimiento.

Para calcular la resistencia a la flexión se fabricaron viguetas con las dimensiones expuestas en la NTC, de 4 [cm] por 16 [cm] de Área transversal que se sometieron a carga puntual en el centro de la luz como lo muestra la Figura 9, hasta lograr la fractura de la muestra. Se tuvo en cuenta que la carga estuviese aplicada a la misma distancia desde los apoyos para todas y cada una de las probetas.

3.4.4 Ensayo a Tracción. Los ensayos a tracción directa consisten en la rotura a tracción de una probeta de hormigón cuando se la somete a cargas de tracción.

Figura No 10. Probeta de mortero para ensayo a tracción



Ensayo con muestras en forma de “hueso de perro”

El objetivo de este ensayo es evitar la rotura que a menudo se produce en las zonas de sujeción de la muestra debido a concentraciones de tensiones en esa zona. Para ello se adopta una probeta de sección transversal reducida en la zona central.

De este modo, la geometría de la probeta permite restringir la figuración a la región central de la misma y facilitar la medida de las deformaciones en dicha zona.

Además, la configuración en “hueso de perro” permite el control estable del ensayo siempre que la rotura no sea demasiado frágil y la figuración esté distribuida.

Todo esto basado en la NTC 119

3.4.4.1 Preparaciones de las Muestras. Se prepararon para cada ensayo tres briquetas.

La cantidad de agua que se usó en la mezcla, dependió del porcentaje de agua requerida para producir una pasta de cemento de consistencia normal.

Las superficies interiores de los moldes en que se fundieron las briquetas se cubrieron con una pequeña cantidad de ACPM tras lo cual los moldes fueron colocados sobre una placa de metal.

El material en los moldes debió ser compactado por medio de los pulgares, ejerciendo una fuerza aproximada de 15 a 20 libras por 12 veces y luego se emparejo con el palustre. Se colocó sobre los moldes una placa de cristal y se voltearon los moldes de modo que la parte superior quede como fondo y viceversa. Se compacto nuevamente la mezcla con los pulgares y se enraso con el palustre de la misma manera explicada anteriormente.

Los moldes fueron dejados por un periodo de 24 horas, procurando que las superficies superiores de las briquetas no quedaran expuestas a la humedad y tratando de evitar que les cayeran gotas de agua.

El método de curado, consistió en sumergir completamente las briquetas en agua.

Antes de ensayar las briquetas se les saco la humedad exterior y se limpiaron los granos de arena sueltos y las incrustaciones. Las briquetas se centraron cuidadosamente con relación a los sujetadores y se aplicó luego la carga a una velocidad uniforme.

Se utilizó la maquina universal de ensayos TREBEL para medir la resistencia a tracción de las probetas de mortero ubicado en el segundo piso del edificio Álvaro Beltrán Pinzón Ubicado en la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Figura No 11. Marca de la máquina de tracción directa



Figura No 12. Máquina para ensayos a Tracción del mortero



3.4.5 Ensayo de Acústica. En este ensayo se determinó las propiedades acústicas del mortero modificado con neumático de llanta molido, para familiarizarnos con el tema definiremos los siguientes conceptos [9]

Sonido: Sensación o impresión producida en el oído por un conjunto de vibraciones que se propagan por un medio elástico, como el aire.

Frecuencia: Numero de ciclos realizados dentro de una onda sonora. Debido a que las partículas de aire siguen el mismo movimiento que el cuerpo vibratorio, tendrán las mismas frecuencias que él. Por ejemplo, si una fuente de vibración vibra 100 veces por cada segundo, la frecuencia del sonido será 100 ciclos por segundo [Hz]

Amplitud: es una medida de la variación máxima del desplazamiento que varía periódica o cuasi-periódicamente en el tiempo. Es la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio.

Absorción del sonido: Habilidad que tiene un material para absorber la energía de las ondas sonoras que llegan a su superficie, en tal forma que la energía reflejada sea la menor posible.

Coefficiente de absorción del sonido e índice de reducción de ruido

Cuando la energía acústica choca contra una pared, una parte es reflejada, otra parte es absorbida por la pared, y la otra es transmitida al espacio a través de la pared, así los fragmentos de energía se pueden representar mediante

- Coeficiente de reflexión $|r|^2$
- El coeficiente de absorción α
- El coeficiente de transmisión de energía $|t|^2$ y aplicando la ley de la conservación de energía se tiene :

$$|r|^2 + \alpha + |t|^2 = 1 \quad (1)$$

Si una onda plana con movimiento armónico choca contra una superficie , en dirección perpendicular , será reflejada con una intensidad disminuida debido a la absorción del material , si la presión de ella onda del sonido incidente y reflejada se denomina P_i y P_r respectivamente, y el coeficiente de reflexión r a un punto es definido como :

$$r = \frac{P_r}{P_i} \quad (2)$$

Si la fracción de energía que traspasa la muestra es muy pequeña comparada con la absorbida se desprecia, y el coeficiente de transmisión es cero, por lo que el coeficiente de absorción se convierte en

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (3)$$

El índice de absorción del sonido es el valor que indica que tanto sonido absorbe determinado material. Se define como el valor medio de los coeficientes de absorción del material a las frecuencias de 250, 500, 1000, 2000 Hz. Aunque también puede ser calculado mediante la obtención de datos de bandas de tercio de octava entre estas frecuencias; 630-800-1000-1250-1600 Hz

$$NCR = \frac{\alpha}{n} \quad (4)$$

Fundamentos del tubo de impedancia

El tubo de impedancia tiene distintas aplicaciones, entre las más importantes, comprobar la velocidad del sonido y medir las propiedades acústicas de los materiales. Por medio de muestras ubicadas a un extremo del tubo cerrado es posible determinar el coeficiente de absorción. Este es un método sencillo y tiene una precisión admisible (95% [9]). El tubo está provisto de un parlante que se

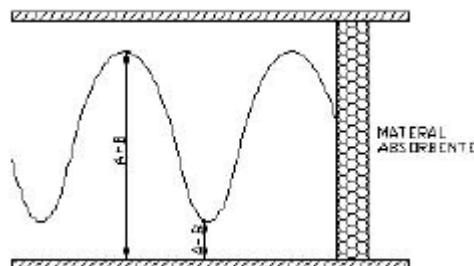
encuentra en el extremo opuesto a la muestra, el cual produce ondas acústicas, las cuales viajan dentro del tubo y son reflejadas por el material. La onda incidente y la onda reflejada se presentan por medio de la formación de un patrón de ondas estacionarias dentro del tubo. Cuando la totalidad de la onda incidente es reflejada, la onda incidente y la onda reflejada tienen la misma amplitud; los nodos en el tubo tienen presión cero y los antinodos el doble de presión.

Cuando una parte de la energía incidente es absorbida por la muestra, la onda incidente y la onda reflejada tienen diferente amplitud. En este caso los nodos no son muy largos y cuentan con una presión nula. La magnitud de la presión en los nodos y antinodos es medida con un micrófono de prueba, el cual se desliza dentro del tubo. La relación entre la presión máxima (antinodo) y la presión mínima (nodo) es llamada Standing Wave Ratio (SWR), esta relación es mayor o igual a uno y se usa para determinar el coeficiente de amplitud reflejada $|r|^2$ de la muestra y el coeficiente de absorción del material α .

La amplitud en un antinodo de presión (máxima presión) es:

$$P_{m\acute{a}x} = A + B \quad (5)$$

Figura No 13. Representación de la máxima y mínima amplitud en un tubo de impedancia



La amplitud en un antinodo de presión (mínima presión) es:

$$P_{m\acute{a}x} = A - B \cos wt \quad (6)$$

No es posible medir A o B directamente pero se puede medir (A+B) y (A-B), los cuales son valores de amplitud medida en unidades de voltaje. La medición se logra al resonar la onda en el tubo, formándose de esta manera ondas estacionarias. Se puede definir la relación de presión máxima a presión mínima como SWR (standing wave ratio), mediante la siguiente ecuación:

$$SWR = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{i}n}} \quad (7), \text{ así que: } SWR = \frac{A+B}{A-B} \quad (8)$$

La ecuación de conservación de la energía, puede ser manipulada para determinar el coeficiente de reflexión del sonido:

$$r = \frac{B}{A} = \frac{SWR-1}{SWR+1} \quad (9)$$

Como se ha definido previamente en la ecuación, la energía absorbida es proporcional al cuadrado de las relaciones de amplitud de las ondas:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (10)$$

3.4.5.1 Preparaciones de las Muestras para el Ensayo del Tubo de Impedancia. Para estas muestras (3 de cada porcentaje de sustitución de arena por caucho de neumático molido) se realizó el mismo procedimiento de mezclado y dosificación de cada porcentaje.

La diferencia consistió en las dimensiones de las muestras. Se utilizaron moldes de PVC, en forma de disco de 4 pulgadas de diámetro (según el diámetro del tubo de impedancia) y 2 cm de espesor. Se debe tener en cuenta que no todos los tubos de PVC tienen el mismo diámetro interno, éste deriva del tipo de aplicación y fabricante. Así, que se elige un molde del mismo diámetro interno del tubo de impedancia para no tener inconvenientes al momento de realizar la prueba. El proceso de fraguado, desmolde, curado y secado fue el mismo utilizado en todas probetas de los diferentes ensayos.

Figura No 14. Probetas para ensayo de Acústica según su dosificación



3.4.5.2 Estudio de las Propiedades Acústicas. Se determinaron el coeficiente de absorción del sonido y el índice de reducción de ruido del mortero de caucho de neumático molido por medio del ensayo del tubo de impedancia efectuado a las muestras.

3.4.5.2.1 Descripción del Equipo. Se efectuó la readecuación del equipo para la realización del ensayo, el cual consiste en un tubo cerrado de PVC de 4 pulgadas de diámetro, con sección transversal circular uniforme de extremo a extremo. Está provisto de un parlante de 3 pulgadas que se encuentra en el extremo opuesto a la muestra, un sistema de micrófono móvil interno como es el caso del tubo de impedancia utilizado. El micrófono es unidireccional y tiene 18 mm de diámetro.

Figura No 15. Tubo de impedancia, Ensayo de acústica.



El sistema de micrófono móvil consiste en una varilla de acero inoxidable de longitud 1.3 m soldada a una platina de hierro con ruedas de caucho para el desplazamiento del sistema. El micrófono se ubica sobre el sistema móvil de manera que se coincida con el centro de la sección transversal del tubo. El cable del micrófono cuenta con un conector BNC en su otro extremo.

3.4.5.2.2 Ensayo Acústico por el Método del Tubo de Impedancia. El ensayo tiene como fundamento físico la teoría de ondas estacionarias en un tubo cerrado, descrita por el numeral anterior. El límite superior de frecuencias que se usó en el ensayo y el diámetro del tubo están relacionados por la siguiente desigualdad, según la norma ASTM C 384:

$$f < 0.586 \frac{v_s}{d} \quad (11)$$

Siendo f la frecuencia máxima permitida en el ensayo (Hz), v_s la velocidad del sonido (m/s), d el diámetro del tubo (m). Con esta expresión se definió f

Asumiendo y entonces:

$$v_s = 343 \frac{m}{s} \text{ Y } d = 0.107 \text{ m entonces } f < 1878.5 \text{ Hz}$$

Frecuencias usadas en el ensayo [Hz]:

250, 500, 750 y 1000 Hz < 1878.5 Hz

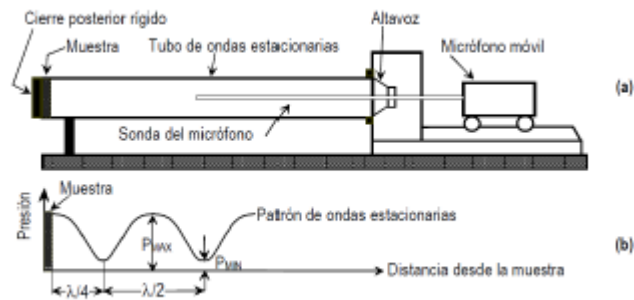
Sabiendo esto, $\lambda \geq 0.1826$ m

La longitud del tubo también se restringe a la siguiente desigualdad que la relaciona con la longitud de onda y diámetro:

$$3 \frac{\lambda}{4} < L - d \quad \text{es decir} \quad L > 0.24m$$

Donde L es la longitud del tubo (m) y λ es la longitud de onda (m). L = 1.2 m. Se comprueba la viabilidad del ensayo.

Figura No 16. Esquema de tubo de Kundt (a) y perfil de la onda estacionaria formada en su interior (b)



El ensayo se realizó en los laboratorios de Ondas en el edificio de Laboratorios Livianos de la Universidad Industrial de Santander, con los parámetros que propone la norma ASTM C 384, utilizando el equipo descrito en el numeral 3.4.6.2.1 , un osciloscopio marca Tektronic de referencia TDS 200 2B y un

generador de señales marca PROTEK de referencia 9205A. Tanto el osciloscopio, como el generador de señales, pertenecen a la Escuela de Física de la UIS.

Figura No 17. Osciloscopio Ensayo Acústica

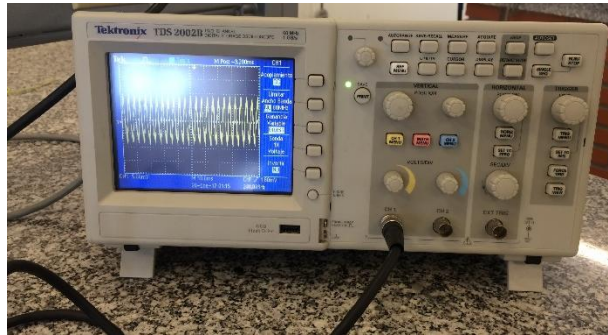


Figura No 18. Generador de señal Ensayo Acústica



Se colocó la primera muestra de mortero no modificado en un extremo del tubo de impedancia, el parlante con su soporte en el otro extremo y el micrófono desplazándose a lo largo del tubo por medio del sistema de varilla móvil. Se ubicó un apoyo en cada extremo del tubo (uno atrás del parlante y el otro después de la muestra) con el propósito de evitar la alteración de las mediciones. Se conectó el cable del micrófono directamente a la entrada del osciloscopio por medio de un conector BNC y el cable del parlante al generador de señales por medio de conectores tipo “banana”.

Figura No 19. (a-b).Desarrollo del ensayo acústico por el método del tubo de impedancia



Se generó una señal de 250 Hz. La magnitud de la presión en los nodos y antinodos fue medida con el micrófono de prueba. Se observó el osciloscopio para registrar los valores de amplitud, máximos (A+B) y mínimos (A-B) en milivoltios, a una distancia d igual a cero, es decir, con el micrófono a 1 mm de la muestra. Se desplazó el sistema móvil para ubicar el micrófono a una nueva distancia d , la cual registró el valor del nodo o antinodo adyacente al cero.

Se repitió el procedimiento buscando todos los valores máximos y mínimos de amplitud a diferentes distancias, con la ayuda de una cinta métrica hasta llegar al otro extremo del tubo. Al concluir con la medición en los 250 Hz, se aumentó la frecuencia hasta 500 Hz, y se repitió el procedimiento de medición. Así mismo para todas las frecuencias hasta alcanzar los 1000 Hz.

Finalizando la medición de amplitudes en todas las frecuencias se cambió la muestra de mortero y se recomenzó con la toma de datos a 250 Hz. Este procedimiento aplicó para las 12 muestras utilizadas. [10]

3.4.6 Ensayos de Durabilidad

3.4.6.1 Método de Prueba Estándar para Densidad, Porosidad y Absorción ASTM C642

Método de ensayo. Determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido.

Este método de ensayo cubre las determinaciones de la densidad, el porcentaje de absorción de agua y el porcentaje de vacíos en el concreto endurecido.

Las muestras que utilizamos para este ensayo fueron diseñadas, fabricadas, en moldadas, desmontadas y curadas igual que para todos los ensayos anteriores, solo cambio su tamaño, Fueron probetas de diámetro 4 "y espesor 5 cm, cada probeta debió estar libre de grietas o fisuras visibles, o de bordes rotos.

Figura No 20. Probetas para Ensayo de densidad porosidad y absorción - ASTM C642 según su dosificación



Siguiendo la norma lo que primero se realizó fue medir la “Masa seca al horno” “Se determinó la masa de las probetas y se secaron en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ por 24 h. Después se removieron los especímenes del horno, se secaron al aire y se les determinó su masa. Como el espécimen no estaba comparativamente seco, cuando su primera masa fue determinada, y la segunda masa no concordaba con muy poca variación respecto a la primera, se le colocó nuevamente a un segundo tratamiento de secado por 24 h y se determinó su masa nuevamente. Ahora sí se pudo considerar seco el espécimen. Este último valor de la masa seca al horno se designó como: A

Luego se realizó lo que la norma llama “Masa saturada después de inmersión en agua” “Después que se secó, se enfrió y se determinó la masa, los especímenes se sumergieron en agua a temperatura de aproximadamente 21°C por un período no menor de 48 h hasta que dos valores sucesivos de masa de la muestra saturada de superficie seca a intervalos de 24 h, indique un incremento de la masa de menos de 0.5% del valor mayor comparado. Con una toalla se removió la humedad superficial de los especímenes para dejarlos en condición de saturados de superficie seca y se les determinó su masa. El último valor obtenido de masa saturada de superficie seca después de su inmersión en agua, se designa como: B.

Luego hicimos la fase llamada “Masa saturada después de ebullición en agua” El espécimen procesado como se describe anteriormente, se colocó en un recipiente adecuado, cubierto con agua potable, y se hirvió por un período de 5 h. Luego se le dejó enfriar al aire por pérdida natural de calor, por un período no menor de 14 h, hasta que su temperatura final fue de 20 a 25°C . Se le removió la humedad superficial con una toalla y se determinó la masa del espécimen. La masa saturada de superficie seca después de ebullición, se designa como: C.

Por ultimo “Masa sumergida aparente” Después de su inmersión en agua y ebullición, los especímenes se suspendieron dentro del agua con un alambre y se determinó su masa sumergida aparente, que se designa como: D

Luego usando todos los valores de masa calculados, se hizo la ejecución de cálculos.

$$\text{Absorción después de inmersión \%} = [B - A / A] \times 100 \quad (12)$$

$$\text{Absorción después de inmersión y ebullición \%} = [C - A / A] \times 100 \quad (13)$$

$$\text{Densidad seca global (o bruta)} = \frac{A}{C-D} \cdot \rho = g \quad (14)$$

$$\text{Densidad seca global (o bruta) después de inmersión} = \frac{B}{C-D} \cdot \rho = g \quad (15)$$

Densidad seca global (o bruta) después de inmersión y ebullición

$$= \frac{C}{C-D} \cdot \rho = g \quad (16)$$

$$\text{Densidad aparente} = \frac{A}{A-D} \cdot \rho = g_2 \quad (17)$$

$$\text{Volumen de vacíos (espacios de poros permeables) \%} = \frac{g_2 - g_1}{g_2} \cdot 100 \quad (18)$$

$$\text{O bien } \frac{C-A}{C-D} \cdot 100 \quad (19)$$

Dónde:

A = Masa de muestra seca al horno, al aire, g

B = Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión, g

C = Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión y ebullición, g

D = Masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición, g

g1 = Densidad global (bruta) seca, Mg/m³

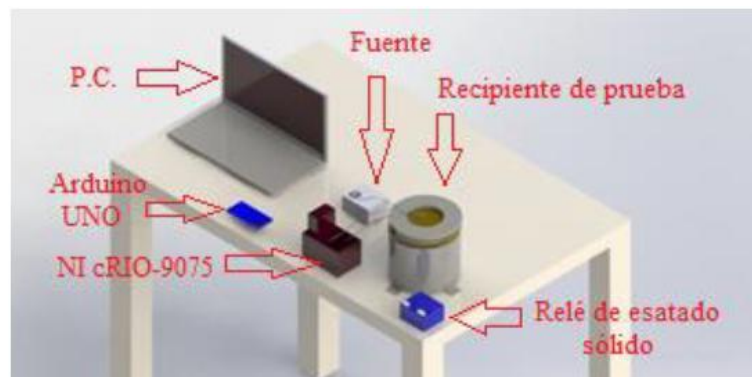
g2 = Densidad aparente, Mg/m³

ρ = Densidad del agua = 1Mg/m³ = 1g/cm³

3.4.6.2 Conductividad Térmica. La conducción térmica de un material varía con la temperatura.

Sin embargo, esta variación es moderada para muchos materiales en un rango de interés práctico y se puede descartar; En estos casos se puede usar un valor promedio conocido como el coeficiente de conductividad térmica y considerarlo constante.

Figura No 21. Esquema Grafico del Banco Conductividad Térmica



Para la realización de este ensayo fue necesario el préstamo del banco de conductividad térmica en estado estable ubicado en la Escuela de Ingeniería Mecánica en los laboratorios de sistemas térmicos construido por estudiantes , el cual analiza la forma en la que un material conduce el calor, el banco consta de un tambor o cilindro térmicamente aislado , cuya función es sostener la muestra mientras se le trasfiere calor por medio de resistencias y aislándolas del medio (figura 22), Una NIcRIO-9075 encargada de trasferir al computador la información de las temperaturas tomadas por medio de las Termocuplas (sensores Figura 4) ,también una fuente de alimentación cuya función es proporcionar energía eléctrica a todo el sistema (Figura 25) y por ultimo un Relé en estado sólido el cual tiene como función controlar la temperatura de la resistencia por medio de una tarjeta de Arduino que tiene la finalidad de controlar un relé de estado sólido, el

cual está encargado de disponer el paso de corriente eléctrica a medida que cierta cantidad de voltaje es aplicada a alguno de sus terminales de control, dicha señal Esta entre 0-255 Figura 26).

Figura No 22. Recipiente para Aislar - Ensayo Conductividad Térmica



Figura No 23. Rio - Ensayo Conductividad Térmica



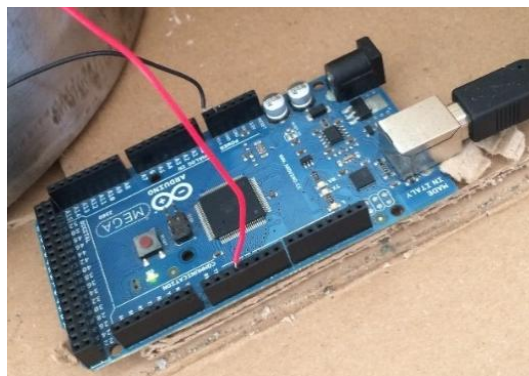
Figura No 24. Termocuplas - Ensayo Conductividad Térmica



Figura No 25 .Fuente de Energía - Ensayo Conductividad Térmica



Figura No 26. Tarjeta de Arduino - Ensayo Conductividad Térmica



3.4.6.2.1 Fabricación de Probetas. Para la realización de este ensayo se fabricaron probetas de mortero de diámetro 16,7 [cm] y una altura de 1,5 [cm] de manera que estas tuvieran el tamaño necesario para el Banco de laboratorios térmicos, se fabricaron doce (12) probetas, para obtener resultados más seguros, se realizó el mismo procedimiento de mezclado dosificación, fabricación, desmote y curado de probeta para cada uno de los porcentaje.

Figura No 27. Probetas para ensayo de Conductividad Térmica según su dosificación



Se energizo el banco, posteriormente se conectó el relé de estado sólido, el cual controla las resistencias del banco conectadas a la tarjeta de Arduino y a la respectiva fuente.

Se conectó el módulo NI CRIO-9075 al computador por medio de un cable de Ethernet, se debió ejecutar el software LABVIEW de donde tomamos datos de las

cinco Termocuplas ubicadas en la parte superior de la carcasa y dos a los lados de la misma.

A cada probeta de la suministro un calor por la cara inferior y laterales utilizando la resistencia eléctrica sometida a un calor de 2W , todo esto dispuesto dentro del cilindro térmicamente aislado para reducir las pérdidas de calor , se supone un flujo constante e unidimensional a través de toda la probeta .

Utilizando las Termocuplas (Figura 24) y un programa llamado NI LabVIEW 2014 se midió la temperatura de la probeta cuando esta alcanzaba su estado estable de transferencia de calor, es decir cuando la temperatura que medio el programa daban valores cercanos, Para cada muestra se toman 5 datos de temperatura en la cara superior de la probeta y 2 en la inferior, siendo estas promediadas por 10 valores de temperaturas tomadas a través del tiempo.

Con estas medidas se calculó la temperatura promedio en la cara superior mediante la Ecuación (20) Y utilizando posterior mente la ecuación de Fourier adaptada Ecuación (21), se logró finalmente obtener un coeficiente de conductividad térmica.

$$T_{prom} = T_1 - \frac{(T_2 - T_3)^2 + (T_4 - T_5)^2}{4 * (T_2 + T_3 + T_4 + T_5 - 4 * T_1)}$$

Ecuación (20) Temperaturas Promedio

$$k_{experimental} = -\frac{\dot{Q}_{cond} * \Delta x}{A * \Delta T} = -\frac{\dot{Q}_{cte} * t}{A_{efectiva} * \Delta T} \quad \Delta T = T_{prom} - T_{R1}$$

Ecuación (21) Fourier

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

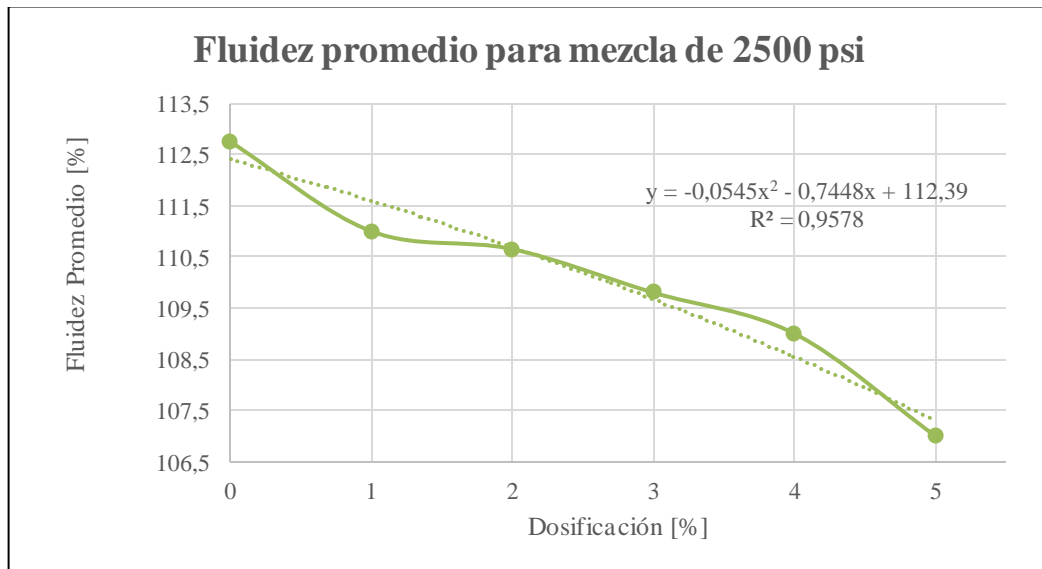
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos por medio de los ensayos realizados a las probetas y el análisis de los datos obtenidos.

4.1 FLUIDEZ

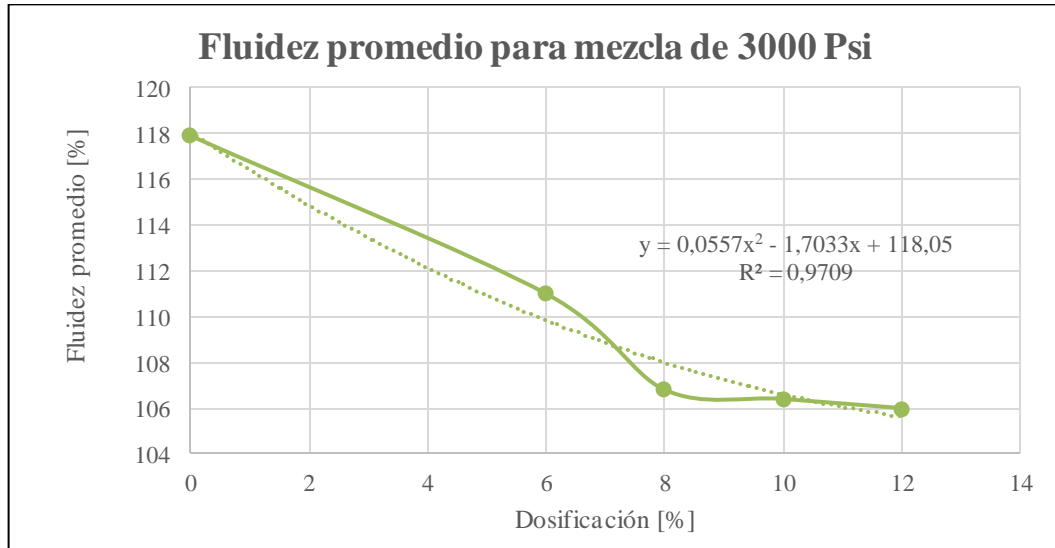
Al incrementar el porcentaje de caucho a intercambiar por arena la fluidez de la pasta de mortero disminuyo, esto debido a que después del tratamiento químico realizada al caucho, su absorción aumento siendo esta el doble que el de la arena, por eso se observan los resultados de la gráfica No 1.

Las gráficas 1 y 2. Expone los respectivos valores resultantes del ensayo de fluidez para todas las dosificaciones de caucho molido teniendo en cuenta los dos diseños realizados.

Gráfica No 1. Fluidez promedio en función de la cantidad de caucho molido usada para mezcla de 2500 psi



Grafica No 2. Fluidez promedio en función de la cantidad de caucho usada para mezcla de 3000 psi



Con base en los datos obtenidos con el ensayo de fluidez se puede apreciar que al aumentar la cantidad de caucho molido en la mezcla conservando una misma relación agua/cemento, la fluidez disminuye gradualmente con respecto a la muestra patrón (0% de caucho); sin embargo, se mantiene el rango establecido como parámetro para diseño (100 a 120%) fluidez media avalando que el mortero pueda seguir siendo usado para recubrimiento.

4.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Como requisito indispensable para el desarrollo del estudio, se tiene que la resistencia de las probetas a analizar deben responder a una resistencia a la compresión de 2500 psi, razón por la cual se realizaron dos diseños de mezcla en base a dos resistencias (2500 y 3000 psi) para poder aumentar el rango de cantidad de caucho, sabiendo que a medida que se aumenta la cantidad del agregado alternativo la resistencia a la compresión se reducirá, además de que los

porcentajes óptimos para conservar la resistencia en una muestra de mortero se encuentran en un rango entre el 0% y 5% .

Se realizó entonces, el ensayo de compresión simple analizando cuidadosamente la resistencia de tres muestras para cada dosificación, resultando como dato final un promedio de las tres probetas expuestas en las Tablas 10 y 11. Para los respectivos diseños.

Tabla No 20. Resistencia a la compresión mortero 2500 Psi sin caucho

Resistencia a la Compresión- Diseño 2500 Psi - 28 días				
Probetas	Fuerza [KN]	Resistencia [psi]	Desviación	Cumple?
Prob No .1	47.0	2737.68	101.4411466	Cumple
Prob No .2	45.9	2673.57		Cumple
Prob No .3	43.6	2538.93		Cumple
Promedio	45.467	2650.06		Cumple

Tabla No 21. Resistencia a la compresión mortero 2500 Psi Con caucho

Resistencia la compresión -Diseño 2500 Psi Caucho- 28 días					
Probetas	Fuerza [Kn]	Resistencia [Psi]	Promedio	Desviación	Cumple?
1% Caucho	46.6	2713.20	2634	81.385	Cumple
	43.8	2550.58			
	45.3	2638.01			
2% Caucho	45.2	2635.10	2607	98.371	Cumple
	42.9	2497.54			
	46.1	2688.14			
3% Caucho	43.1	2510.37	2547	112.700	Cumple
	45.9	2673.57			
	42.2	2457.33			
4% Caucho	37.9	2210.19	2049	141.398	NO Cumple
	33.4	1946.16			
	34.2	1990.46			
5% Caucho	33.3	1940.91	1818	150.527	NO Cumple
	28.3	1650.07			
	32.0	1862.81			

Tabla No 22. Resistencia a la compresión mortero 3000 Psi sin caucho

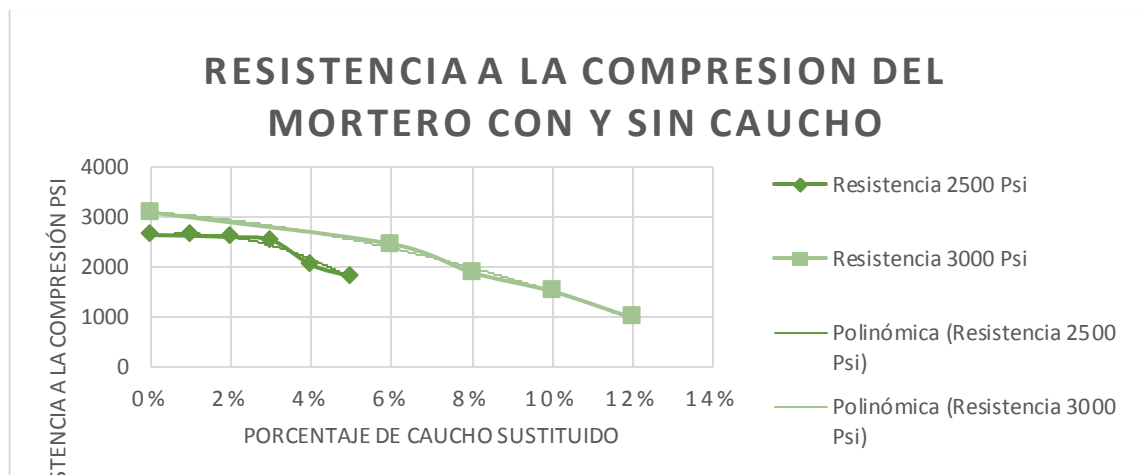
Resistencia a la Compresión- Diseño 3000 Psi - 28 días				
Probetas	Fuerza [KN]	Resistencia [psi]	Desviación	Cumple?
Prob No .3	51.3	2988.891429	135.7338805	No cumple
Prob No .4	53.0	3087.977143		Cumple
Prob No .5	56.5	3294.308571		Cumple
Prob No .6	52.0	3029.108571		Cumple
Promedio	53.188	3100.07		Cumple

Tabla No 23. Resistencia a la compresión mortero 3000 Psi con caucho

Resistencia la compresión -Diseño 3000 Psi Caucho- 28 días					
Probetas	Fuerza [Kn]	Resistencia [Psi]	Promedio	Desviación	Cumple?
6% Caucho	44.8	2612.37	2470	124.066	NO Cumple
	40.9	2382.14			
	41.5	2417.11			
8% Caucho	32.2	1878.55	1900	79.535	NO Cumple
	34.1	1988.71			
	31.5	1834.25			
10% Caucho	28.0	1629.67	1526	105.254	NO Cumple
	24.4	1419.26			
	26.3	1530.00			
12% Caucho	19.6	1144.15	994	135.806	NO Cumple
	16.5	958.80			
	15.1	879.53			

Para resumir los datos obtenidos en laboratorio se generaron unas graficas en donde se apreciaba el comportamiento de la resistencia a la compresión a medida que aumentaba el porcentaje de caucho en el mortero.

Gráfico No 3. Resistencia a la Compresión Diseño 2500 y 3000 Psi con y sin caucho



Cuando se diseña para una resistencia a la compresión de 2500 Psi con aditamento de caucho se observa que el porcentaje óptimo para garantizar que el mortero a los 28 días tenga una resistencia a la compresión de 2500 Psi es con el 3% de caucho sustituido por Arena retenida en el tamiz 50 dando como resultado una resistencia a la compresión de 2547 Psi, se observó que para porcentajes mayores que el 3% la curva presenta una variación considerable.

Para el Diseño de 3000 Psi, el porcentaje aconsejado es 6% o menos, para fines de este trabajo de investigación se tomó como valor optimo el 6% de caucho sustituido por arena dando como resultado una resistencia a la compresión de 2470 Psi teniendo una variación solo del 1 % en cuanto a la resistencia de 2500 Psi y de esta manera observar que otras propiedades cambiaban considerablemente favoreciendo el uso de este mortero para recubrimiento.

A partir de los resultados se tiene que para efectuar el resto de ensayos solo se requirieron dos dosificaciones optimas, correspondientes al 3% y 6% para los diseños de mezcla de 2500 psi y 3000 psi respectivamente, dado que cumplieron con la resistencia objetivo de 2500 psi.

4.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Teniendo dos dosificaciones optimas, se efectuó el ensayo de resistencia a la flexión cuyos resultados fueron satisfactorios con respecto a las muestras patrón, pues la diferencia de carga máxima resistida no difiere en gran proporción. En la Tabla 24 y 25. Se expone los resultados en $Kg\ cm^2$. Y en el grafico no 4. Se muestra la relación resistencia a la flexión con respecto a la cantidad de caucho usada para 2500 Psi y 3000 Psi, con el fin de comparar las dos mezclas.

Tabla No 24. Ensayo a Flexión probetas 2500 Psi

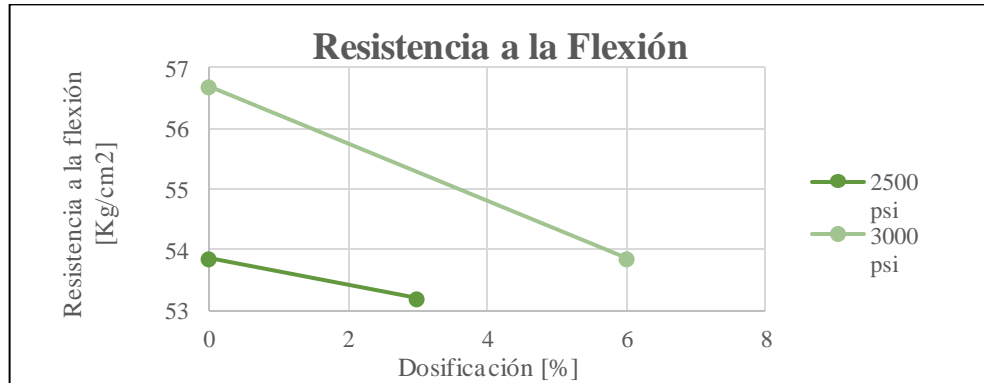
Resistencia a la Flexion Diseño 2500 Psi						
28 Días	Probetas	Fuerza [KN]	Fuerza [Kg]	Esfuerzo [Kg/Cm2]	Promedio [Kg/cm2]	Variación [Kg/cm2]
	0% Caucho	1.9	193.743	53.860554	53.860554	2.834766
		1.8	183.546	51.025788		
		2	203.94	56.69532		
	3% Caucho	1.9	193.743	53.860554	53.1991086	3.869568079
		2	203.94	56.69532		
1.7		176.4081	49.0414518			

Tabla No 25. Ensayo a Flexión probetas 3000 Psi

Resistencia a la Flexion Diseño 3000 Psi						
28 Días	Probetas	Fuerza [KN]	Fuerza [Kg]	Esfuerzo [Kg/Cm2]	Promedio [Kg/cm2]	Variación [Kg/cm2]
	0% Caucho	2	203.94	56.69532	56.69532	2.834766
		1.9	193.743	53.860554		
		2.1	214.137	59.530086		
	6% Caucho	1.9	193.743	53.860554	53.860554	2.834766
		1.8	183.546	51.025788		
2		203.94	56.69532			

En el grafico No 4 Se pudo evidenciar que la reducción en la resistencia la flexión es menor para la mezcla de 2500 psi con una variación del 1%, que para la de 3000 psi con una variación del 5%, esto debido a la cantidad de caucho adicionado a la mezcla que para la mezcla de 2500 psi es más pequeña. Además, se puede deducir que la mezcla con caucho al 3% o 6% es óptima para ser usada en la práctica bajo esfuerzos de flexión gracias a que la disminución de la resistencia es mínima.

Gráfico No 4. Reducción de la resistencia a la flexión en relación a la cantidad de caucho molido y resistencia de diseño



4.4 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

La resistencia a la tensión para las muestras de mortero fabricadas se midió en libras con ayuda de la maquina universal de ensayo y posteriormente se calcularon los resultados dividiendo los datos arrojados por la maquina entre la sección transversal de las probetas que corresponde al valor de $6,25 \text{ cm}^2$. La Tabla 26 y 27. Y el grafico no 5. Muestra el producto de las muestras diseñadas a 2500 psi con y sin caucho, y de igual forma las diseñadas a 3000 psi.

Tabla No 26. Resultados de resistencia a tracción para probetas modificadas y sin modificar diseñadas para Resistir 2500 Psi en compresión

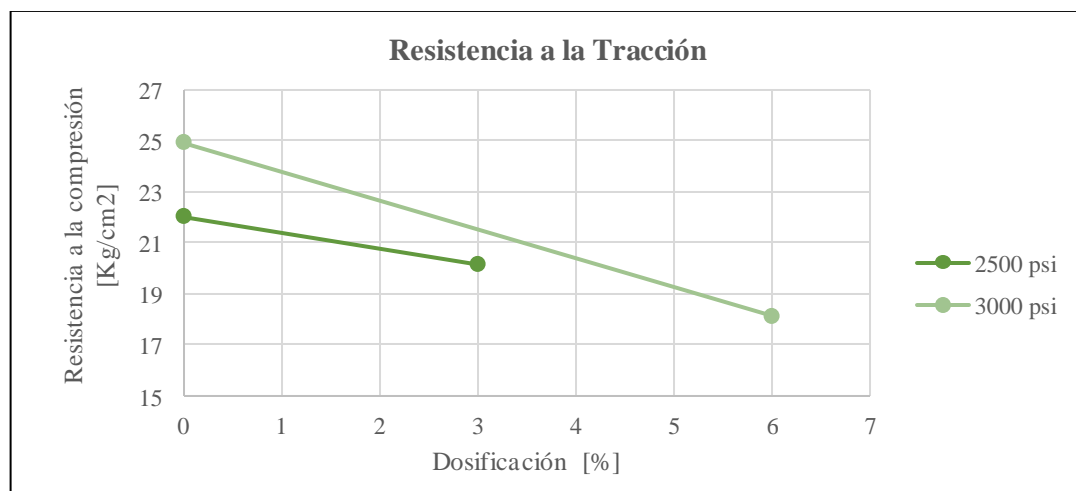
Resistencia a la Tracción 2500 Psi Caucho					
	Probetas	Fuerza [Lb]	Resistencia [Kg/cm ²]	Promedio [Kg/cm ²]	Variación [Kg/cm ²]
28 Dias	0%	340	24.6754048	22.01433173	2.933072389
		310	22.4981632		
		260	18.8694272		
	3% Caucho	270	19.5951744	20.15158059	1.091841579
		295	21.4095424		
		268	19.45002496		

Tabla No 27. Resultados de resistencia a tracción para probetas modificadas y sin modificar diseñadas para Resistir 3000 Psi en compresión

Resistencia a la Tracción 3000 Psi Caucho					
	Probetas	Fuerza [Lb]	Resistencia [Kg/m2]	Promedio[Kg/cm2]	Variación[Kg/cm2]
28 Días	0% Caucho	370	26.8526464	24.91732053	1.714873729
		325	23.586784		
		335	24.3125312		
	6% Caucho	275	19.958048	18.14368	2.020394698
		220	15.9664384		
		255	18.5065536		

Se pudo evidenciar que la reducción en la resistencia a la tracción, similarmente a los resultados de la prueba de flexión, es menor para la mezcla de 2500 psi que para la de 3000 psi, esto debido a la cantidad de caucho adicionado a la mezcla que para la mezcla de 2500 psi es más pequeña, pero en este caso no se puede deducir que es óptima para el uso en la práctica bajo esfuerzos de tracción ya que la diferencia no es la mínima.

Gráfico No 5. Reducción de la resistencia a la tracción en relación a la cantidad de caucho molido y resistencia de diseño.



La variación de resistencia para el diseño de 2500 psi estándar y con caucho es del 8%, mientras que para el diseño de 300 psi es del 27%, si se compara el diseño estándar de 2500 psi (sin caucho) con el de 3000 Psi con caucho (6%) su variación en cuanto a resistencia sería del 17% evidenciando una disminución considerable en cuanto a resistencia a la tracción.

4.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Después de realizado el ensayo y haciendo uso de las ecuaciones formuladas en el numeral de ensayos se calculó el coeficiente de conductividad térmica promedio para las dos dosificaciones escogidas además de las muestras patrón de 2500 psi y 3000 psi de resistencia a la compresión, representado los resultados en la en la Tabla No 28 y 29 .

Tabla No 28. Coeficiente de conductividad térmica mezcla de 2500 Psi

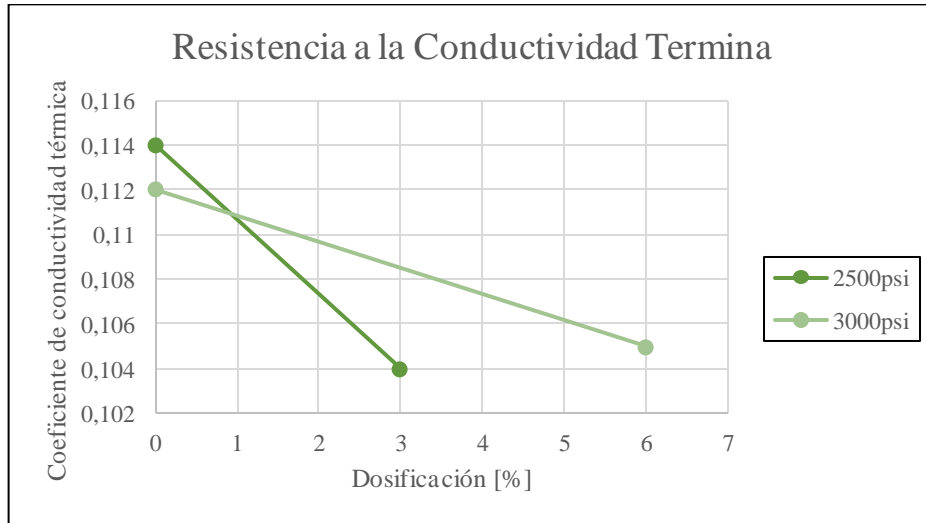
Conductividad térmica 2500 Psi				
	Probeta	K [W/m*k]	Promedio[W/m*k]	Variación[W/m*k]
0% caucho	1	0,10977923	0,114	0,004
	2	0,1153442		
	3	0,11746872		
3% Caucho	1	0,0663696	0,104	0,032
	2	0,12234854		
	3	0,12234854		

Tabla No 29. Coeficiente de conductividad térmica mezcla de 3000 Psi

Conductividad térmica 3000 Psi				
	Probeta	K [W/m*k]	Promedio[W/m*k]	Variación[W/m*k]
0% caucho	1	0,12032467	0,112	0,007640526
	2	0,10700336		
	3	0,10718019		
6% Caucho	1	0,06907831	0,105	0,030685755
	2	0,12232721		
	3	0,12212742		

Teniendo los valores correspondientes a coeficiente de conductividad térmica de las muestras patrón (0% de caucho) y de las muestras modificadas (3% y 6% de caucho) se realizó una comparación práctica con el fin de evidenciar como cambia la conductividad adicionando caucho de llanta molido a un mortero de 2500 psi. Y de tal forma analizar y concluir si es o no óptimo dicho compuesto para ser usado en la industria y de ser posible cual es el más recomendable entre los dos diseños estudiados en este análisis.

Grafico No 6. Resistencia a la transferencia de calor en base a coeficiente de conductividad térmica



Se tiene que para ambos diseños de mezcla en dosificaciones de 3% y 6% respectivamente disminuye el coeficiente de conductividad térmica, lo que evidencia que el material modificado mejora la propiedad de resistencia a transferencia de calor.

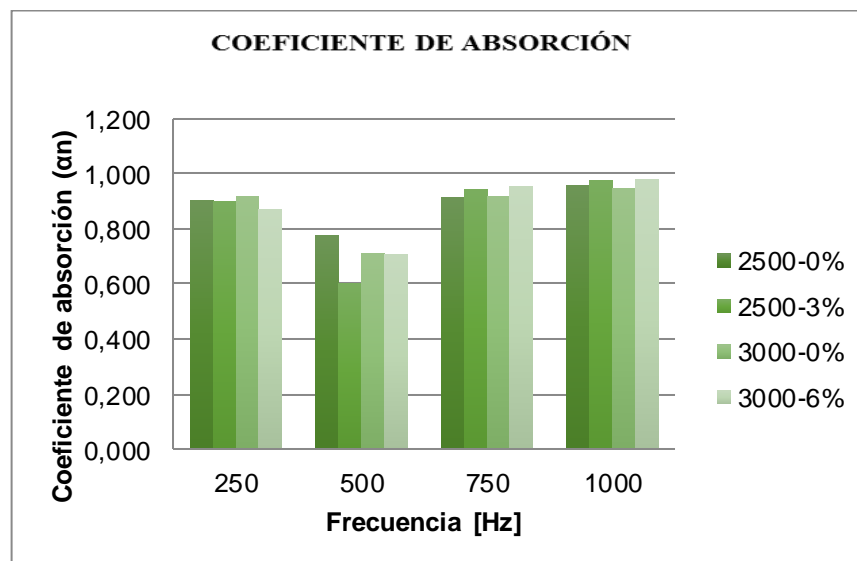
4.6 IMPEDANCIA ACÚSTICA

En base a los datos de amplitud resultados del ensayo de impedancia acústica en condiciones ambientales, se halló el coeficiente de absorción para cuatro frecuencias dentro del rango de audición y los parámetros tolerados por la dimensión del tubo, el calor de (α) varía para cada frecuencia lo cual impide calcular un valor único para cada material. En la tabla no 30. Y Grafico 7. Se encuentran los datos calculados.

Tabla No 30. Coeficientes de absorción acústica

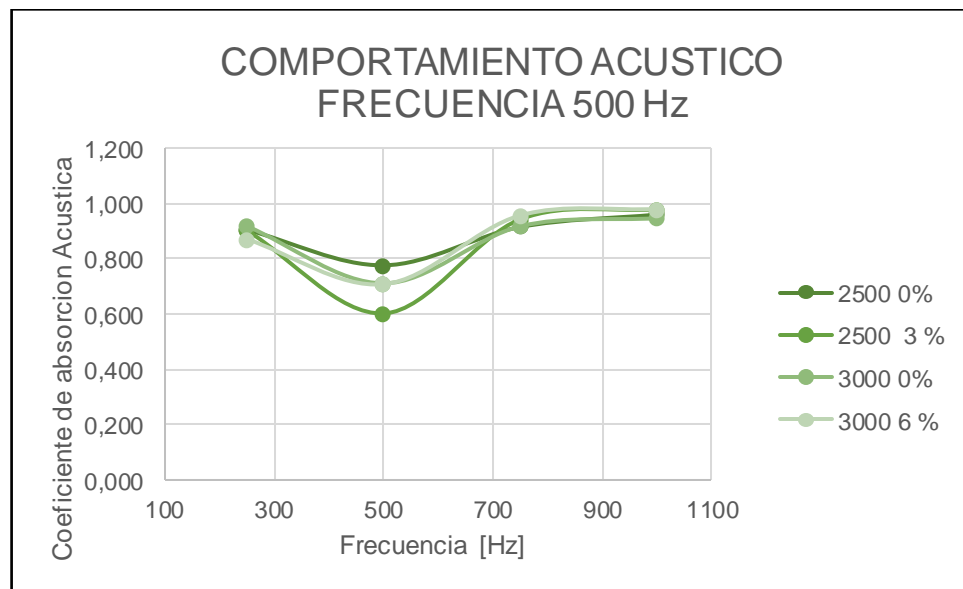
Frecuencia (Hz)	Dosificación (%)	Coeficiente de absorción (α_n)				
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio	Desviación
250	2500 Psi -0%	0.996	0.750	0.969	0.905	0.135
	2500 Psi -3 %	0.922	0.816	0.969	0.902	0.078
	3000 Psi -0%	0.852	0.951	0.951	0.918	0.057
	3000 Psi -6%	0.988	0.926	0.699	0.871	0.152
500	2500 Psi -0%	0.750	0.776	0.802	0.776	0.026
	2500 Psi -3 %	0.462	0.802	0.541	0.602	0.178
	3000 Psi -0%	0.750	0.691	0.691	0.711	0.034
	3000 Psi -6%	0.604	0.699	0.820	0.708	0.109
750	2500 Psi -0%	0.918	0.938	0.889	0.915	0.024
	2500 Psi -3 %	0.960	0.931	0.938	0.943	0.015
	3000 Psi -0%	0.938	0.907	0.907	0.917	0.017
	3000 Psi -6%	0.951	0.960	0.960	0.957	0.005
1000	2500 Psi -0%	0.972	0.947	0.960	0.960	0.013
	2500 Psi -3 %	0.980	0.988	0.969	0.979	0.009
	3000 Psi -0%	0.945	0.948	0.947	0.947	0.002
	3000 Psi -6%	0.976	0.984	0.980	0.980	0.004

Grafico No 7. Coeficiente de Absorción acústica para cada diseño de mezcla y porcentaje de caucho



Comparando los valores obtenidos de coeficiente de absorción acústica se evidencia que el mortero es un material poroso que absorben más sonido a medida que aumenta la frecuencia, se conoce que las mezclas cementantes son material porosos los cuales están formados por partículas en contacto que dejan volúmenes interconectados de aire entre ellas ; así cuando la onda acústica atraviesa el material y entra en contacto con estos huecos el aire en su interior es obligado a moverse , haciendo de la porosidad una característica importante para la absorción acústica , también se observó que la diferencia entre las probetas estándar y las modificadas con caucho de neumático molido son de menos del 5%, unas mayores para frecuencias altas y otras menores para bajas frecuencias para estas últimas. En el grafico No 8 se observó que la frecuencia de 500 Hz no es absorbida de la misma forma para las probetas, esto pudo darse debido a la composición del material en función del porcentaje de agregado sustituido por caucho.

Grafico No 8. Comportamiento acústico de cada probeta expuesta a frecuencia de 500 Hz



4.7 DENSIDAD POROSIDAD Y ABSORCIÓN

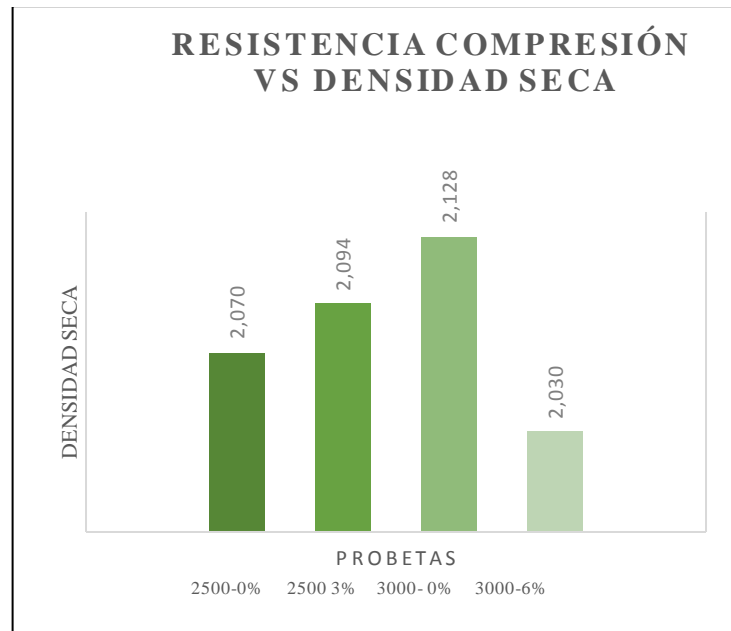
Según la metodología explicada anteriormente se registró valores de pesos correspondientes para las probetas para después calcular su densidad porosidad y absorción.

Tabla No 31. Resultados ensayo de porosidad, densidad y absorción ASTM C642

Resistencia a la Compresión 2500 Psi										
Probetas	Peso [gr]				Densidad Seca Ds		Volumen de Vacíos %		Absorción después de inmersión %	
	A	B	C	D						
Sin caucho	871	960.2	964.2	454	2.089	Promedio	18.267	Promedio	8.955	Promedio
	867	945.9	952.6	448	2.069	2.070	16.964	17.455	9.274	9.108
	847	926.4	932.4	434	2.051	Desviación 0.019	17.135	Desviación 0.708	9.096	Desviación 0.160
3% Caucho	842	917.4	939.5	444	2.116	Promedio	19.677	Promedio	10.241	Promedio
	826	902.6	923	428	2.075	2.094	19.596	19.542	9.100	9.572
	874	953.5	974.3	456	2.091	Desviación 0.020	19.352	Desviación 0.169	9.374	Desviación 0.596
Resistencia a la Compresión 3000 Psi										
Probetas	Peso [gr]				Densidad Seca Ds		Volumen de Vacíos %		Absorción después de inmersión %	
	A	B	C	D						
Sin caucho	849	932.4	945.4	452	2.139	Promedio	19.538	Promedio	9.823	Promedio
	858	938.5	947.8	454	2.124	2.128	18.186	18.461	9.382	9.429
	893	974.1	983.3	472	2.121	Desviación 0.009	17.661	Desviación 0.968	9.082	Desviación 0.373
6% Caucho	804	902.6	913.7	408	2.030	Promedio	21.693	Promedio	12.264	Promedio
	790	887.4	897.9	400	2.026	2.030	21.671	21.616	12.329	12.420
	787	886.7	892.9	400	2.034	Desviación 0.004	21.485	Desviación 0.114	12.668	Desviación 0.217

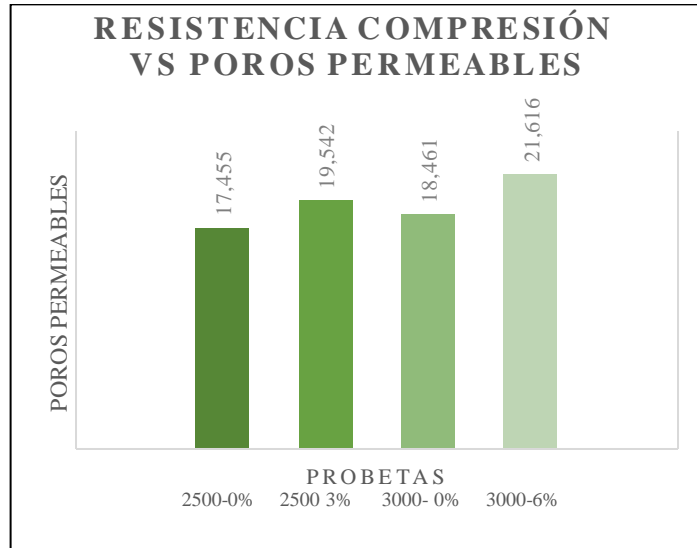
A partir del procedimiento planteado en la metodología, se logró obtener la densidad seca del mortero para las dosificaciones correspondientes a cada diseño de mezcla, que se muestra en el grafico no 9.

Grafico No 9. Densidad seca para cada diseño de mezcla con su porcentaje de caucho respectivo



Adicionalmente se obtuvo el porcentaje de poros permeables promedio para cada diseño de mezcla escogido para el análisis como se puede observar en el grafico No 10.

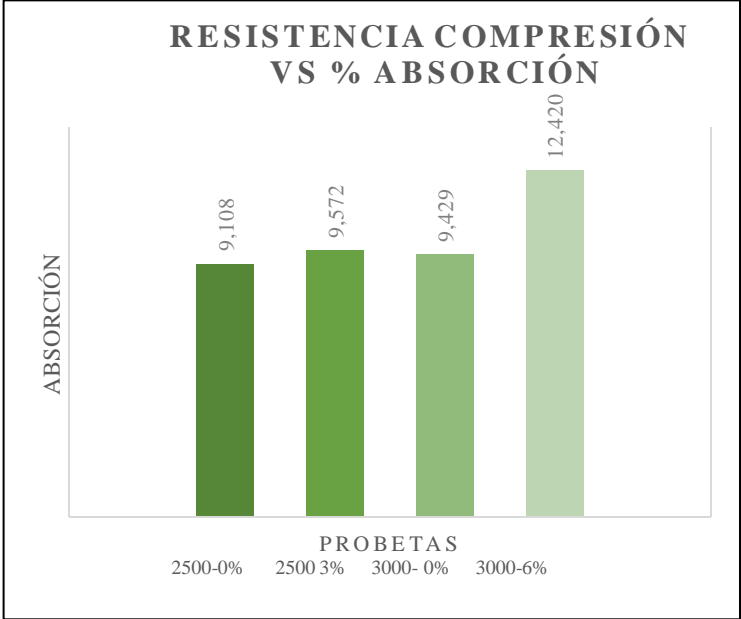
Grafico No 10. Espacio de poros permeables o volumen de vacíos para cada diseño de mezcla con su porcentaje de caucho respectivo



Es evidenciable que como consecuencia del aumento en el porcentaje de caucho, el porcentaje de poros permeables aumenta y disminuye la densidad seca en el diseño de mezcla de 3000 Psi que es el que tiene más porcentaje de caucho, para la de diseño de 2500 su variación es de menos del 1% lo que hace que sea prácticamente la misma densidad con y sin caucho. El aumento en la cantidad de vacíos y la disminución de la densidad seca, se debe a la baja densidad del caucho molido en combinación con las propiedades elásticas del mismo.

En el grafico No 11. Se muestran los resultados del porcentaje de Absorción, evidenciando que entre más porcentaje de caucho tenga más absorción presenta, el aumento en la porosidad y en la absorción del mortero indican que el agua es absorbida y distribuida entre los poros presentes en la matriz del mortero, la absorción aumenta ya que el caucho tuvo un tratamiento químico en donde su porcentaje de absorción era del doble con respecto a la arena , haciendo de esto un aumento en la absorción para mortero modificado.

Grafico No 11. Porcentaje de absorción para cada diseño de mezcla con su porcentaje de caucho respectivo



5. CONCLUSIONES

El mortero modificado con aditamento al 3y 6% de caucho de llanta molido para un diseño de mezcla de 2500 Psi no presenta una variación en su resistencia a la compresión, lo cual permite su uso seguro si se requiere que tenga una resistencia determinada.

Al tratar el caucho molido con ácido nítrico se observó que debilidades del material como la densidad y mojabilidad mejoran en función del aumento de la absorción, lo que facilitó la mezcla de la pasta de cemento con el agregado alternativo.

La fluidez de un mortero define la trabajabilidad del mismo, en algunos casos se forman morteros excesivamente secos no trabajables o, muy fluidos con tendencia a la segregación; El mortero modificado con caucho presenta una disminución en la fluidez, pero sigue estando en el rango de una mezcla fluida lo que sigue garantizando su trabajabilidad.

El mortero modificado con caucho puede someterse a esfuerzos de flexión pero no de tracción ya que presenta una disminución en su resistencia.

El material compuesto con 3 o 6% de caucho molido mejora el aislamiento térmico, igualmente la condición a la absorción acústica.

El mortero modificado con caucho de neumático molido puede utilizarse en la construcción, como un material de recubrimiento y con un porcentaje de sustitución del 3% de arena tamiz No 50. Si se utilizara en la construcción de una casa convencional de 77 [m^2], se estaría usando entre un 90 % y 95% de residuo generado al día por la re-rencauchadora.

6. RECOMENDACIONES

El caucho como residuo de proceso de reencauche se encuentra en diversos tamaños que oscilan entre tiras de 2 cm de largo y polvo de 0,15 mm de diámetro, es por esto que se hace necesario proponer un equipo de máquinas aptas para moler, tratar y lavar el caucho a nivel industrial.

Como el caucho de neumático molido tiene un tratamiento químico, es recomendable implementar una adecuada evacuación de los gases que emite esta mezcla y del agua que se desecha para el lavado del caucho.

Para futuros trabajos se recomienda el estudio de un concreto modificado con aditamento de caucho de neumático molido , ya que el comportamiento del mortero fue positivo y como futuros Ingenieros Civiles y la relación que se tiene con el medio ambiente es necesario mitigar el daño al mismo .

También se recomienda un estudio estadístico en cuanto a la viabilidad de usar el mortero modificado con caucho para la construcción de obras de gran envergadura pudiendo soportar su uso con datos reales.

Como en obra seria tedioso el hecho de sacar porcentaje de arena para subseguirlo por caucho de neumático molido se recomienda la estructuración de una entidad que venda el material granular previamente dosificado y listo para mezclar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Libia Gutiérrez de López, “El concreto y otros materiales para la construcción”, capítulo 3 “morteros”, universidad nacional, Manizales 2003

- [2] Omar Humberto Zabala Pérez y Oscar Javier Sánchez Neira, “Análisis de las propiedades físico-mecánicas de un mortero modificado con PET reciclado”, trabajo de grado de la escuela de ingeniería Química, universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2006.

- [3] Ingeniero Guillermo Castro, “Materiales y compuestos para la industria del neumático”, Departamento de ingeniería mecánica, F.I.U.B.A, Buenos Aires, Argentina, 2008.

- [4] “Las imparables ruedas de la contaminación”, Portafolio noticias de economía y negocios en Colombia y el mundo, 2010. Visitado en noviembre de 2016 [en línea] Disponible: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/imparables-ruedas-contaminacion-437016>

- [5] “Los contaminantes que pueden liberar los neumáticos usados en aire libre”, laestrella.com.pa, 2010. Visitado en noviembre de 2016[en línea] Disponible: <http://laestrella.com.pa/vida-de-hoy/planeta/contaminantes-pueden-liberar-neumaticos-usados-aire-libre/23714325>

- [6] “Los neumáticos grandes contaminantes”, ecologiaverde.com, 2015. Visitado en noviembre de 2016 [en línea]. Disponible: <http://www.ecologiaverde.com/neumaticos-grandes-contaminantes/>

- [7] “Surface modification of crub rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete”. *Construction and Building Materials* 120 (2016) 403–407 (international journal dedicated to the investigation and innovative use of materials in construction and Repair).[En línea], Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816307462>
- [8] Pastor Blas, María Mercedes, “Adhesión de cauchos tratados superficialmente mediante halogenacion”, Tesis doctoral, Departamento de Química inorgánica, Universidad de Alicante, Aliante, España, 1995.
- [9] Carlos PICO, “Propuesta de concreto con agregado fino de escoria de cubilote como aporte al estudio de la durabilidad y propiedades acústicas,” Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2012.

BIBLIOGRAFÍA

BLAS, Pastor, MERCEDES, María, “Adhesión de cauchos tratados superficialmente mediante halogenación”, Tesis doctoral, Departamento de Química inorgánica, Universidad de Alicante, Alicante, España, 1995.

BUENO CHACÓN, Erika Zamara, PINILLA MORENO, Jersson Marco, “utilización de residuos de caucho en morteros y su aplicación en la construcción”, Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2003.

PICO, Carlos, “Propuesta de concreto con agregado fino de escoria de cubilote como aporte al estudio de la durabilidad y propiedades acústicas,” Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2012.

GUTIÉRREZ De LÓPEZ, Libia, “El concreto y otros materiales para la construcción”, capítulo 3 “morteros”, universidad nacional, Manizales 2003
Ingeniero Guillermo Castro, “Materiales y compuestos para la industria del neumático”, Departamento de ingeniería mecánica, F.I.U.B.A, Buenos Aires, Argentina, 2008.

“Los neumáticos grandes contaminantes”, ecologiaverde.com, 2015. Visitado en noviembre de 2016 [en línea]. Disponible:

<http://www.ecologiaverde.com/neumaticos-grandes-contaminantes/>

“Las imparable ruedas de la contaminación”, Portafolio noticias de economía y negocios en Colombia y el mundo, 2010. Visitado en noviembre de 2016 [en línea] Disponible: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/imparables-ruedas-contaminacion-437016>

Construction and Building Materials (international journal dedicated to the investigation and innovative use of materials in construction and Repair), Liang He, Yu Ma, Quantao Liu, Yuanhua, "Surface modification of crub rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete", 2016, [En línea] Disponible:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816307462>

"Los contaminantes que pueden liberar los neumáticos usados en aire libre", laestrella.com.pa, 2010. Visitado en noviembre de 2016[en línea] Disponible: <http://laestrella.com.pa/vida-de-hoy/planeta/contaminantes-pueden-liberar-neumaticos-usados-aire-libre/23714325>

ZABALA PÉREZ, Omar Humberto y SÁNCHEZ NEIRA, Oscar Javier, "Análisis de las propiedades físico-mecánicas de un mortero modificado con PET reciclado", trabajo de grado de la escuela de ingeniería Química, universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2006.

ANEXOS

Anexo A. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico

MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO

PROCEDIMIENTO

Para la determinación de la densidad del cemento portland, seguimos los métodos establecidos por las normas técnicas Colombianas con el fin de obtener un resultado estandarizado.

- 5.1 Vertimos el Queroseno en el frasco de Le Chatelier hasta una medida entre 0 y 1 ml utilizando un primer embudo y un vaso precipitado, con el fin de no mojar las paredes de frasco y agregar el líquido con una mayor exactitud.
- 5.2 Se sumerge el frasco en un baño de agua por periodos de tres minutos para estabilizar la temperatura, luego se toma lectura del nivel del líquido colocando el frasco en una superficie horizontal, este proceso se repite hasta que obtengamos dos lecturas iguales, el cual va ser nuestra lectura inicial.
- 5.3 Procedemos a pesar 64 gramos de cemento tipo I en la balanza digital, para luego vestirlo en el frasco de Le Chatelier haciendo uso de un segundo embudo que permitirá agregar todo el cemento en pequeñas cantidades y sin ensuciar las paredes del frasco; Después de agregar todo el cemento hacemos girar el frasco en círculos horizontales, con el fin de sacar todo el aire que se encuentra en el cemento y lo dejamos de girar, cuando ya no veamos ascender burbujas a la superficie del líquido.
- 5.4 Nuevamente se sumerge repetidas veces el frasco en un baño de agua por periodos de 3 minutos para estabilizar la temperatura, y tomar la medida final

del nivel del líquido, este proceso de lectura se tiene que hacer sobre una superficie horizontal, en donde la lectura final es la que se ha repetido dos veces consecutivamente.

5.5 Tenemos como resultado una lectura final y una inicial, el cual la diferencia entre estas nos representa el volumen desplazado por el cemento.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para hallar experimentalmente la densidad del cemento Portland en la práctica, es necesario tener claro el principio de Arquímedes, el cual plantea que el volumen de un fluido desplazado por un sólido es igual al volumen del sólido sumergido, así pues al agregar cemento a un volumen determinado de kerosene se puede calcular el volumen del cemento hallando la diferencia de las medidas en el frasco de Le Chatelier.

Masa del cemento= 64 g.

Primera toma:

Lectura del keroseno(V1)

- Primera lectura =0,4 ml
- Segunda lectura= 0,3 ml
- Tercera lectura= 0,3 ml

Se toma como primera lectura 0,3 ml

Segunda toma:

Lectura del keroseno con cemento (V2)

- Primera lectura =22,2 ml
- Segunda lectura= 22 ml
- Tercera lectura= 22 ml
- Cuarta lectura= 21,9 ml

- Quinta lectura= 21,9 ml

Se toma como segunda lectura 21,9 ml

$$V(\text{cemento}) = V1 - V2$$

$$V(\text{cemento}) = 21.9 - 0.3 = 21,6 \text{ [ml]}$$

$$\text{Densidad del cemento: } \rho = \frac{\text{Masa del cemento}}{\text{Volumen del cemento}}$$

$$\rho = \frac{64}{21,6} = 2,963 \text{ [g/ml]}$$

Se realiza el promedio de las densidades obtenidas en los tres grupos de laboratorio.

Primer grupo

Lectura inicial = 0,3 ml

Lectura final = 21.9 ml

Cantidad de cemento = 64 g

Densidad cemento= 2,963 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Segundo grupo

Lectura inicial = 0,3 ml

Lectura final = 22,5 ml

Cantidad de cemento = 60 g

Densidad cemento= 2,88 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Tercer grupo

Lectura inicial = 0,3 ml

Lectura final = 22 ml

Cantidad de cemento = 64 g

Densidad cemento= 2,9493 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

$$Densidad_{promedió} = \frac{Densidad1 + Densidad2 + Densidad3}{3}$$

$$Densidad_{promedió} = \frac{2,963 + 2,88 + 2,9493}{3} = 2,9307 \frac{g}{ml^3}$$

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Encontramos una densidad para el cemento de 2.93 gr/ml Aproximadamente 3 gr/ml que es lo que debe tener un cemento ARGOS.

MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO

PROCEDIMIENTO

Se toma una muestra representativa de agregado fino la cual se sumerge durante 24 horas. Al día siguiente se expande la muestra sobre la superficie de un recipiente o bandeja la cual no es absorbente. Con el secador se le inyecta una corriente de aire hasta conseguir un secado uniforme, la operación es terminada cuando los granos del agregado están sueltos. Luego se introduce la muestra en un molde cónico, se apisona unas 25 veces dejando caer el pisón desde una altura aproximada de 1 cm, posteriormente se nivela y si al quitar el molde la muestra se deja caer es porque no existe humedad libre, si es lo contrario se sigue secando y se repite el proceso hasta que cumpla con la condición. Cuando se cae el agregado al quitar el molde cónico es porque se ha alcanzado una condición saturada con superficie seca.



Se procede a tomar una muestra de 500 gramos del agregado para envasarla en el picnómetro llenándolo con agua a 20°C hasta más o menos 250 cms³, luego se hace girar el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire posibles. Se procede a cuantificar el peso del picnómetro en la balanza anotando su respectivo valor.



Al término de este paso, se embaza la muestra en tazas para ser dejadas en el horno por espacio de 24 horas. Y por último, al día siguiente se llevaron las muestras a la balanza y se cuantificó su valor. Se tomaron apuntes.

DATOS Y RESULTADOS

B Peso de la muestra en condición S.S.S. en el aire = 500 gr

A peso del frasco más agua hasta la marca = 624 gr

C Peso de la muestra más frasco más agua = 929 gr

D Peso de la muestra secada al horno = 487 gr

$$D_{\text{aparente}} = D / [A + B - C]$$

$$D_{\text{aparente}} = 487 \text{ gr} / [624 \text{ gr} + 500 \text{ gr} - 929 \text{ gr}]$$

$$D_{\text{aparente}} = 2.4974$$

$$D_{\text{sss}} = B / [A + B - C]$$

$$D_{\text{sss}} = 500 \text{ gr} / [624 \text{ gr} + 500 \text{ gr} - 929 \text{ gr}]$$

$$D_{\text{sss}} = 2.5641$$

$$D_{\text{nominal}} = D / [A + D - C]$$

$$D_{\text{nominal}} = 487 \text{ gr} / [624 \text{ gr} - 929 \text{ gr} + 487 \text{ gr}]$$

$$D_{\text{nominal}} = 2.6758$$

$$\text{Absorción (\%)} = ([B - D] / C) * 100$$

$$\text{Absorción (\%)} = ([500 \text{ gr} - 487 \text{ gr}] / 929 \text{ gr}) * 100$$

$$\text{Absorción (\%)} = 1.399\%$$

Gravedades Especificas

ARENA FINA	
A	624
B	500
C	929
D	487

Gravedad especifica real	2.67582418
Gravedad espesifica Aparente	2.4974359
Gravdad especifica aparente S.S.S	2.56410256

% Absorcion	1.39935414
-------------	------------

USAREMOS LA MISMA NTC PARA CALCULAR LA DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE LA ARENA QUE SE RETIENE EN EL TAMIZ No 50.

Gravedades Especificas

ARENA TAMIZ 50	
A	624
B	500
C	932
D	490

Gravedad especifica real	2.69230769
Gravedad espesifica Aparente	2.55208333
Gravdad especifica aparente S.S.S	2.60416667

% Absorcion	1.07296137
-------------	------------

USAREMOS LA MISMA NTC PARA CALCULAR LA DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL CAUCHO DE NEUMÁTICO MOLIDO.

Se toma una muestra representativa de agregado fino la cual se sumerge durante 24 horas.



En el caso del Caucho de neumático molido se dejó la muestra durante tres días, ya que las partículas con el paso del tiempo absorbían más agua y bajaban al fondo del recipiente.

Se somete la muestra al aire directo del ventilador para que los granos se suelten entre ellos y no esté tan húmeda.



Se procede a tomar una muestra de 100 gramos del agregado para envasarla en el picnómetro llenándolo con agua a 20°C hasta más o menos 250 cms³, luego se hace girar el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire posibles.



Se procede a cuantificar el peso del picnómetro en la balanza anotando su respectivo valor. El picnómetro junto con el caucho se dejó durante varios días ya que entre más días más bajaba el caucho y más agua podía agregarse , cuando dos valores al ser tomados después de 24 Horas fueron idénticos de anoto .



Al término de este paso, se embaza la muestra en un tarro para ser dejada en el horno a una temperatura de 60 grados centígrados ya que con más temperatura podría fundirse el caucho durante de 24 horas. Y por último, al día siguiente se llevaron las muestras a la balanza y se cuantificó su valor. Se tomaron apuntes.

DATOS Y RESULTADOS

B Peso de la muestra en condición S.S.S. en el aire = 100 gr

A peso del frasco más agua hasta la marca = 659 gr

C Peso de la muestra más frasco más agua = 664 gr

D Peso de la muestra secada al horno = 98.6 gr

$$D_{\text{aparente}} = D / [A + B - C]$$

$$D_{\text{aparente}} = 100 \text{ gr} / [659 \text{ gr} + 100 \text{ gr} - 664 \text{ gr}]$$

$$D_{\text{aparente}} = 1.034$$

$$D_{\text{sss}} = B / [A + B - C]$$

$$D_{\text{sss}} = 100 \text{ gr} / [659 \text{ gr} + 100 \text{ gr} - 664 \text{ gr}]$$

$$D_{\text{sss}} = 1.048$$

$$D_{\text{nominal}} = D / [A + D - C]$$

$$D_{\text{nominal}} = 98.6 \text{ gr} / [659 \text{ gr} + 98.6 \text{ gr} - 664 \text{ gr}]$$

$$D_{\text{nominal}} = 1.049$$

$$\text{Absorción (\%)} = ([B - D] / C) * 100$$

$$\text{Absorción (\%)} = ([100 \text{ gr} - 98.6 \text{ gr}] / 664 \text{ gr}) * 100$$

$$\text{Absorción (\%)} = 0.211\%$$

Caucho

Caucho normal	
A	654
B	100
C	657
D	100
Gravedad especifica real	1.031
Gravedad espesifica Aparente	1.031
Gravdad especifica aparente S.S.S	1.031
% Absorcion	0.000

USAREMOS LA MISMA NTC PARA CALCULAR LA DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL CAUCHO SOMETIDO A LOS TRATAMIENTOS QUÍMICOS

Caucho tratado con Peróxido

Caucho peroxido 2 H	
A	652.22
B	100
C	654.9
D	96.25

Gravedad especifica real	1.029
Gravedad espesifica Aparente	0.989
Gravdad especifica aparente S.S.S	1.028

% Absorcion	0.573
Humedad	1.129

Caucho peroxido 6 H	
A	652.2
B	90.62
C	662.4
D	90.27

Gravedad especifica real	1.127
Gravedad espesifica Aparente	1.122
Gravdad especifica aparente S.S.S	1.127

% Absorcion	0.053
Humedad	0.653

Caucho tratado con Ácido Nítrico

Caucho HNO3 2 H	
A	622.4
B	100
C	645.9
D	90.5

Gravedad especifica real	1.351
Gravedad espesifica Aparente	1.183
Gravdad especifica aparente S.S.S	1.307

% Absorcion	1.471
Humedad	3.494

Caucho HNO3 6 H	
A	653.5
B	100
C	675.3
D	78.4

Gravedad especifica real	1.385
Gravedad espesifica Aparente	1.003
Gravdad especifica aparente S.S.S	1.279

% Absorcion	3.199
Humedad	1.129

NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 127

MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN AGREGADO FINO PARA CONCRETO

MUESTRA DE ENSAYO

La muestra de ensayo debe tener una masa de aproximadamente 450 g y se debe tomar de una muestra mayor, de acuerdo con el método establecido en la NTC 3674 (ASTM C 702).

DETERMINACIÓN DEL VALOR DEL COLOR

Para definir con más precisión el color del líquido de la muestra de ensayo, se deben utilizar cinco vidrios de colores estándar, como se describe en la Tabla

Tabla 1. Escala colorimétrica de Gardner

Color Gardner estándar N°.	Placa orgánica N°.
5 1	
8 2	
11 3 (estándar)	
14 4	
16 5	



INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

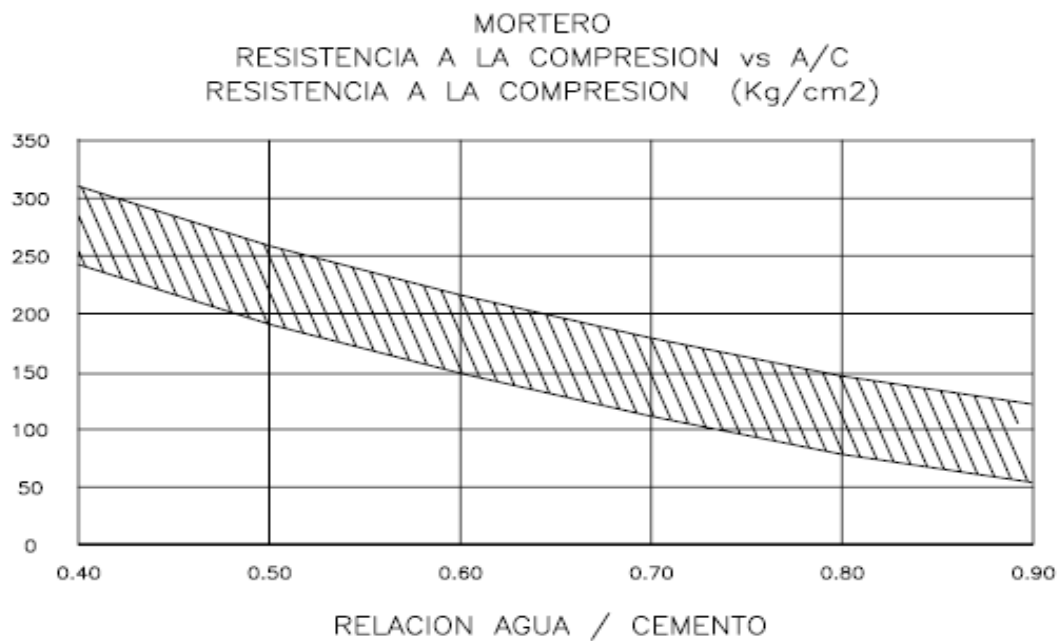
Si el color del líquido sobrenadante es más oscuro que el de la solución de color estándar o del vidrio de color estándar de la placa orgánica No. 3 (Color Gardner estándar No. 11), se debe considerar que el agregado fino sometido a ensayo, posiblemente contiene compuestos orgánicos perjudiciales, entonces se deben realizar otros ensayos antes de aprobar la arena para su uso en el mortero.

Al comparar nuestra muestra con la tabla de colores podemos observar que el contenido de materia orgánica no un bajo medio ya que corresponde al segundo color de la escala.

Anexo C. Dosificación del mortero, Gráfica de contenido de cemento y Relación agua-cemento

DOSIFICACIÓN DEL MORTERO, GRAFICA DE CONTENIDO DE CEMENTO Y RELACIÓN AGUA-CEMENTO

Resistencia a la compresión vs relación agua cemento



Contenido de cemento

