
TUBOS DE CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS CON PROCESO DE PRETRATAMIENTO

CRISTIAN CAMILO SALAS ESCOBAR
NATALIA MEJÍA GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
SEDE CALI
AGOSTO 2021

TUBOS DE CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS CON PROCESO DE PRETRATAMIENTO

CRISTIAN CAMILO SALAS ESCOBAR
NATALIA MEJÍA GONZÁLEZ

Proyecto de grado para optar para el título de Ingeniero Civil

Director
Ms. c. Harold Cárdenas
Profesor Escuela Ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA INGENIERIA CIVIL
SEDE CALI
AGOSTO 2021

TABLA DE CONTENIDO

| | Página |
|--|-----------|
| LISTADO DE TABLAS | iv |
| LISTADO DE FIGURAS | vi |
| LISTADO DE GRÁFICAS | vii |
| RESUMEN..... | 8 |
| 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 9 |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 9 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 9 |
| 1.3. OBJETIVOS..... | 9 |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL | 9 |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 10 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN..... | 10 |
| 2. MARCO DE REFERENCIA..... | 11 |
| 2.1. ANTECEDENTES..... | 11 |
| 2.2. ESTADO DEL ARTE..... | 15 |
| 2.2.1. TUBERÍA DE CONCRETO..... | 15 |
| 2.2.2. CONCRETO..... | 16 |
| 2.2.3. CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO..... | 21 |
| 2.2.4. PRETRATAMIENTO DE AGREGADOS RECICLADOS | 22 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 25 |
| 3.1. RECOLECCIÓN DEL MATERIAL..... | 25 |
| 3.2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS..... | 25 |
| 3.2.1. GRANULOMETRÍA..... | 25 |
| 3.2.2. DENSIDAD Y ABSORCIÓN | 25 |
| 3.2.3. IMPUREZAS ORGÁNICAS..... | 26 |
| 3.3. SELECCIÓN DE PRETRATAMIENTOS..... | 26 |
| 3.4. DISEÑO DE MEZCLA..... | 29 |
| 3.4.1. PESOS UNITARIOS..... | 29 |
| 3.4.2. ESPACIOS LIBRES..... | 30 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3.4.3. | DOSIFICACIÓN..... | 30 |
| 3.5. | CALIDAD DEL CONCRETO..... | 31 |
| 3.5.1. | ASENTAMIENTO..... | 32 |
| 3.5.2. | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN | 32 |
| 3.5.3. | ABSORCIÓN..... | 32 |
| 3.5.4. | DURABILIDAD..... | 33 |
| 3.6. | TUBOS DE CONCRETO | 35 |
| 3.7. | ANÁLISIS DE COSTOS | 37 |
| 4. | RESULTADOS | 38 |
| 4.1. | CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS..... | 38 |
| 4.1.1. | GRANULOMETRÍA:..... | 38 |
| 4.1.2. | DENSIDAD Y ABSORCIÓN | 39 |
| 4.1.3. | IMPUREZAS ORGÁNICAS..... | 40 |
| 4.1.4. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 40 |
| 4.2. | SELECCIÓN PRETRATAMIENTOS | 42 |
| 4.2.1. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 42 |
| 4.3. | DISEÑO DE MEZCLA..... | 43 |
| 4.3.1. | PESOS UNITARIOS..... | 43 |
| 4.3.2. | ESPACIOS LIBRES..... | 43 |
| 4.3.3. | DOSIFICACIÓN..... | 44 |
| 4.3.4. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 45 |
| 4.4. | CALIDAD DEL CONCRETO..... | 46 |
| 4.4.1. | ASENTAMIENTO..... | 46 |
| 4.4.2. | RESISTENCIA A COMPRESIÓN | 46 |
| 4.4.3. | ABSORCIÓN..... | 49 |
| 4.4.4. | DURABILIDAD..... | 49 |
| 4.5.5. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 52 |
| 4.7. | TUBOS DE CONCRETO..... | 53 |
| 4.4.5. | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN | 53 |
| 4.4.6. | ABSORCIÓN..... | 54 |
| 4.4.7. | RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO | 55 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4.8. PERMEABILIDAD | 57 |
| 4.5.4. CALIDAD TUBOS FABRICADOS POR ALJIBES | 57 |
| 4.5.5. ANALISIS DE RESULTADOS | 58 |
| 4.7. ANALISIS DE COSTOS | 61 |
| 4.7.1. DAÑOS QUE SE PRESENTAN EN LOS TUBOS DE CONCRETO | 61 |
| 4.6.2. EVALUACIÓN DE LOS COSTOS ACTUALES | 61 |
| 4.6.3. INVERSIÓN INICIAL..... | 66 |
| 4.6.4. ANALISIS DE RESULTADOS | 67 |
| 5. CONCLUSIONES | 69 |
| 6. FUTUROS TRABAJOS..... | 71 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 72 |

LISTADO DE TABLAS

| | PAG. |
|---|------|
| TABLA 1. POLÍMEROS USADOS PARA EL ESTUDIO | 13 |
| TABLA 2. LISTADO DE LA NORMATIVA NTC..... | 15 |
| TABLA 3. DATOS DE ÍNDICE DE MORTERO ADHERIDO. (HANSEN, 1985) | 22 |
| TABLA 4. RESISTENCIA DE CONCRETO Y RELACIÓN AGUA-CEMENTO FUENTE (ACI211.2-98) | 31 |
| TABLA 5. RELACIÓN A/C RECOMENDADA PARA DIFERENTES TIPOS DE EXPOSICIONES. FUENTE (ACI211.2-98) | 31 |
| TABLA 6. REQUISITOS PARA CONCRETOS EXPUESTO A CONDICIONES ESPECIALES. | 34 |
| TABLA 7. REQUISITOS PARA CONCRETOS EXPUESTO A SOLUCIONES QUE CONTIENEN SULFATOS. | 34 |
| TABLA 8. VALORES MÁXIMOS DE RELACIÓN A/C PARA DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURAS Y GRADOS DE EXPOSICIÓN. | 35 |
| TABLA 9. REQUISITOS FÍSICOS Y DIMENSIONALES DE LOS TUBOS DE CONCRETO SIN REFUERZO | 35 |
| TABLA 10. GRANULOMETRÍA DE AGREGADO NATURAL | 38 |
| TABLA 11. GRANULOMETRÍA DE AGREGADO RECICLADO | 38 |
| TABLA 12. GRANULOMETRÍA DE AGREGADO CON 30 % DE REEMPLAZO | 39 |
| TABLA 13. DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS..... | 39 |
| TABLA 14. REQUERIMIENTO DE GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO PARA CONCRETO. | 41 |
| TABLA 15. ABSORCIÓN DE AGREGADO RECICLADO CON PROCESO DE PRETRATAMIENTO. 42 | 42 |
| TABLA 16. PESOS UNITARIOS DE AGREGADOS..... | 43 |
| TABLA 17. ESPACIOS LIBRES DEL AGREGADO CON EL 30 % DE REEMPLAZO Y EL AGREGADO FINO..... | 43 |
| TABLA 18. DOSIFICACIONES PARA CADA DISEÑO DE MEZCLA POR METRO CUBICO M ³ | 45 |
| TABLA 19. ASENTAMIENTO DE CONCRETOS..... | 46 |
| TABLA 20. RESISTENCIA DE LOS TIPOS DE MEZCLA..... | 47 |
| TABLA 21. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE MEZCLA M2. | 50 |
| TABLA 22. RESISTENCIA AL DESGASTE DE AGREGADO GRUESO RECICLADO..... | 51 |
| TABLA 23. RESISTENCIA A LOS SULFATOS AGREGADO GRUESO RECICLADO..... | 51 |
| TABLA 24. RESISTENCIA A LOS SULFATOS FRACCIÓN FINA DEL AGREGADO RECICLADO. | 52 |
| TABLA 25. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CONCRETO DE TUBOS. | 54 |
| TABLA 26. <i>ABSORCIÓN DE TUBOS CON MEZCLA DE LA MUESTRA M2</i> | 54 |
| TABLA 27. RESULTADOS DE APLASTAMIENTO DE TUBOS DE CON LA MEZCLA M2. | 56 |
| TABLA 28. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y ABSORCIÓN DE TUBOS FABRICADOS POR ALJIBES..... | 57 |
| TABLA 29. FACTOR DE SEGURIDAD | 59 |

| | |
|--|----|
| TABLA 30. FACTOR DE SEGURIDAD ANTECEDENTE | 59 |
| TABLA 31. COSTO HERRAMIENTA MENOR..... | 62 |
| TABLA 32. COSTO ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL | 62 |
| TABLA 33. COSTO DE MATERIALES | 63 |
| TABLA 34. COSTO DE MANO DE OBRA..... | 63 |
| TABLA 35. COSTO DE TUBERÍA NO REPARABLE. | 64 |
| TABLA 36. COSTO DE TUBERÍA REPARABLE. | 64 |
| TABLA 37. ÁREA OCUPADA POR TUBOS A REPARAR..... | 65 |
| TABLA 38. ÁREA OCUPADA POR TUBOS A DESECHAR..... | 65 |

LISTADO DE FIGURAS

| | PAG. |
|---|------|
| <i>FIGURA 1. ESQUEMA TÍPICO DE LA ESTRUCTURA DEL CONCRETO ENDURECIDO.....</i> | 17 |
| <i>FIGURA 2. CURVA CARGA VS DEFORMACIÓN PARA DIFERENTES RELACIONES A/C.....</i> | 19 |
| FIGURA 3. CLASIFICACIÓN DE PRE-TRATAMIENTOS DE AGREGADOS RECICLADOS (ARC). ... | 23 |
| <i>FIGURA 4. ETIQUETA DEL POLIVINILO DE ALCOHOL.</i> | 27 |
| FIGURA 5. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE PVA | 27 |
| FIGURA 6. SILICATO DE SODIO. | 28 |
| <i>FIGURA 7. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE SILICATO DE SODIO.</i> | 28 |
| <i>FIGURA 8. IMPREGNACIÓN DEL AR.</i> | 28 |
| <i>FIGURA 9. ACRONAL.....</i> | 28 |
| <i>FIGURA 10. PRESATURACIÓN DEL AR.....</i> | 29 |
| FIGURA 11. IMPUREZAS ORGÁNICAS DE AGREGADO FINO | 40 |
| FIGURA 12. ASENTAMIENTO DE CONCRETO CON AGREGADOS CON PRETRATAMIENTO | 46 |
| FIGURA 13. ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO CON AGREGADOS CON PRETRATAMIENTO..... | 47 |
| FIGURA 14. TUBOS DE CONCRETO (SUP) CONCRETO FRESCO, (INF) CONCRETO ENDURECIDO | 53 |
| FIGURA 15. SOPORTE SUPERIOR, VIGA IPE80 | 55 |
| FIGURA 16. MONTAJE DEL ENSAYO DE APLASTAMIENTO | 55 |
| FIGURA 17. FALLA SÚBITA EN TUBERÍA DE CONCRETO. | 56 |
| FIGURA 18. MONTAJE (IZQ) E INSPECCIÓN (CENTRO Y DER) DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD DE TUBOS DE CONCRETO. | 57 |

LISTADO DE GRÁFICAS

| | PAG. |
|---|------|
| GRÁFICA 1. CURVA GRANULOMÉTRICA AGREGADO NATURAL | 39 |
| GRÁFICA 2. CURVA GRANULOMÉTRICA AGREGADO RECICLADO | 39 |
| GRÁFICA 3. CURVA GRANULOMÉTRICA AGREGADO CON 30 % DE REEMPLAZO..... | 39 |
| GRÁFICA 4. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO FINO..... | 41 |
| GRÁFICA 5. ESPACIOS LIBRES..... | 44 |
| GRÁFICA 6. PESO COMPACTO DE LA PASTA..... | 44 |
| GRÁFICA 7. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN VS EDAD DE CURADO MEZCLA M1. | 48 |
| GRÁFICA 8. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN VS EDAD DE CURADO MEZCLA M2. | 48 |
| GRÁFICA 9. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN VS EDAD DE CURADO MEZCLA M2. | 48 |
| GRÁFICA 10. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN VS EDAD DE CURADO MEZCLA M2. | 49 |
| GRÁFICA 11. ABSORCIÓN DEL TIPO DE MEZCLAS. | 49 |
| GRÁFICA 12. PERMEABILIDAD VOLUMEN VS TIEMPO | 50 |
| GRÁFICA 13. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN VS EDAD DE CURADO MEZCLA DE TUBOS. .. | 54 |
| GRÁFICA 14. RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE TUBOS. | 56 |
| GRÁFICA 15. RESULTADOS COMPARATIVOS TUBOS ALJIBES Y TUBOS DE CONCRETO RECICLADO. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN | 58 |
| GRÁFICA 16. RESULTADOS COMPARATIVOS TUBOS ALJIBES Y TUBOS DE CONCRETO RECICLADO. ABSORCIÓN..... | 58 |

RESUMEN

Este documento presenta la investigación que se ha llevado a cabo como parte de un trabajo de grado y consiste en abordar la temática de concreto con agregados reciclados, el cual tiene como objetivo el mejoramiento de un diseño de concreto con agregados reciclados para tubería de transporte de aguas pluviales y residuales, que por su uso requiere de características especiales de diseño, estas deben ser cumplidas siguiendo los lineamientos de las Normas Técnicas Colombianas. El reciclaje de los escombros se realizará en la ciudad de Cali, más específicamente en la Escuela de Materiales de la Universidad del Valle, con escombros clasificados de concreto.

Palabras clave: *Pretratamiento de agregados reciclados, absorción de concreto, tubería de concreto.*

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el mundo las diferentes actividades civiles para la modernización han contribuido a acumular gran cantidad de escombros (cientos y miles de toneladas anuales), cantidad que va en aumento; generando problemas de índole ambiental, social, estético y otros. Por otro lado, no en todos los países existe la tecnología adecuada, ni las políticas establecidas para el manejo de escombros, por lo cual su manejo no ha resultado eficiente.

El sector de la construcción es el principal generador de escombros, tales como concretos, agregados, metales, ladrillos, madera, plástico, etc.; produciendo un gran impacto ambiental por su inadecuada disposición final. En Cali, según la Revista ambiental Catorce (Corporación BIOPARQUE, 2017), se generan alrededor de 2 mil toneladas de escombros por día. Debido a este problema es que se hace necesario buscar soluciones alternativas para la utilización de escombros de construcción como agregados para la elaboración de concretos reciclados, que pueden ser utilizados en vías, andenes peatonales y perimetrales, sardineles, tubería prefabricada para urbanismo, bordillos prefabricados, etc.

Una aplicación es la elaboración de tuberías para el transporte de aguas residuales y pluviales. Sin embargo, el concreto con agregados reciclados presenta un aumento en la absorción, directamente relacionada con la porosidad de los agregados. La absorción es el incremento de peso en los agregados debido a la acumulación de agua en los poros de estos (superficie seca saturada). Se considera que un agregado es de buena calidad cuando su absorción es menor al 3% para agregado grueso, y menor al 5% para agregado fino (Zapata, 2016). En la literatura se encuentra que la absorción de agregados reciclados llega a tener incrementos hasta del 200%. Este incremento en la absorción se da por la gran porosidad de los agregados, generada por el mortero adherido (cemento, agua y arena) que tiene la mezcla triturada de concreto como agregado. Una alternativa para solucionar estas condiciones del concreto con agregado reciclado consiste en la realización de pretratamientos a los agregados y /o mejorar con algún producto la mezcla directa del concreto.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo disminuir la absorción en tubería de concreto con agregado reciclado para transporte de aguas residuales y pluviales?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar un proceso para disminuir la absorción de un diseño de concreto con agregado reciclado para tubería de transporte de aguas residuales y pluviales.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un pre tratamiento de los agregados reciclados para el mejoramiento de su calidad.
- Construir tubería de concreto con agregados reciclados a partir del proceso que se propone.
- Comparar las propiedades físico-mecánicas entre un diseño de concreto elaborado con agregados reciclados con proceso para disminuir la absorción y un diseño sin dicho proceso.
- Evaluar la afectación de la durabilidad debido al proceso para disminuir la absorción.
- Verificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas para tubería de concreto.
- Analizar los costos del proceso propuesto para tubería de concreto con agregados reciclados.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se dirige a la línea de investigación de concreto con agregados reciclados, específicamente, en la elaboración de tubos de concreto para transporte de aguas pluviales y residuales. Previamente en un proyecto realizado por Burbano & Ortiz (2017), en el cual se diseñó y mezcló un concreto de forma convencional con diferentes porcentajes para reemplazar agregados naturales por reciclados; se encontró que, con el menor porcentaje, el de 30 %, se cumplieron al borde las especificaciones técnicas de los límites para esta tubería, teniendo como desventaja el aumento en la absorción de agua y la disminución de la resistencia. Por lo cual, se propone intervenir en el diseño y la mezcla de un concreto con diferentes procesos para mejorar estas características físico-mecánicas, principalmente la absorción, que así mismo influye de manera importante en la resistencia.

La realización de elementos prefabricados con concreto reciclado puede interesar a diferentes sectores como son: los fabricantes de concreto premezclado, los productores de agregados, las empresas de reciclaje, constructores de elementos prefabricados para el abastecimiento de agua potable y el transporte de aguas residuales, las empresas de construcción, las agencias medio ambientales, las corporaciones regionales, entidades gubernamentales.

Además, actualmente el gobierno público la Resolución 472 del 28 de febrero del 2017, donde se reglamenta el manejo integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición (RCD). Este manejo integral consiste las actividades de prevención y reducción, recolección y transporte, almacenamiento, aprovechamiento, y finalmente la disposición final. En el artículo 19 de esta resolución se establece para los grandes generadores de RCD, que se debe hacer un uso de RCD aprovechables, en un porcentaje mayor o igual al 2% del total de los residuos generados, aumentando en años posteriores no menos el 2% anualmente, hasta alcanzar mínimo un 30%; para los pequeños generadores de RCD, se establece que estos deben entregarlos a una entidad competente de manejo de RCD.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. ANTECEDENTES

En la ciudad de Cali en el 2014 se hizo un estudio sobre la fabricación de adoquines con escombros reciclados de demolición y residuos sólidos de obra (Campo & Henao, 2014). Los escombros se tomaron de la empresa EMSIRVAC y los agregados naturales de la cantera El Chocho (agregado grueso triturado). El tipo de adoquín prefabricado seleccionado para realizar con estos agregados fue el adoquín en forma de “hueso de perro”. Para la realización de la mezcla se utilizó el método de Füller, con este método se determinaron los porcentajes de agregados, en este caso siendo dos, agregado grueso y agregado fino; se calculó la cantidad de agua a partir del asentamiento, se definió el tamaño máximo para el agregado grueso de 9,5mm y para el fino de 4,75mm. A estos adoquines se le realizaron ensayos de flexo-tracción, llevándolos a la ruptura como una viga simplemente apoyada; finalmente, se concluyó que los agregados obtenidos de esta fuente tienen una capacidad de absorción del 9 %, mientras que los naturales del 1,8 %. Y a partir de las pruebas técnicas necesarias, se concluye, que una dosificación con un reemplazo entre el 15 y el 25 % cumplen con la resistencia requerida.

Los resultados presentados anteriormente se asemejan a los que obtuvo el trabajo *Tubos de concreto con agregados reciclados* (Ortiz Vargas & Burbano, 2017), en el cuál realizaron la evaluación al incorporar un porcentaje de concreto reciclado como agregado para la elaboración de tubos de concreto, teniendo en cuenta los requisitos de aceptación exigidos por la normativa (NTC). Para ello se realizaron varias dosificaciones, que consistieron en reemplazar porcentajes de agregado natural por agregado reciclado de concreto, e implementar un tamaño máximo nominal alternante. Los porcentajes de reemplazo fueron del 50 %, 30 %, 15 % y 0 %. De todas las dosificaciones, la que cumplió con los parámetros fue la de 30 %; dichos resultados se encuentran cerca de los límites, indicando que cualquier alteración negativa en las distintas variables puede generar el incumplimiento de los requisitos mencionados. El mayor problema de las diferentes dosificaciones se presentó en cumplir el requerimiento técnico para la absorción del concreto en tubos. Teniendo en cuenta que las dos investigaciones presentadas llegaron a un resultado similar, se define el porcentaje de reemplazo en el rango de 25 a 30 % como un valor prudente para el desarrollo de un concreto con agregados reciclados.

Con la finalidad de establecer qué tipos de pre tratamientos se han trabajado efectivamente para disminuir la absorción en un concreto reciclado, se revisó el trabajo *Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review* (Shi, y otros, 2015) en el que recopilan la información que existe sobre diferentes procesos de tratamientos a agregados de concretos reciclados. Dentro del cual dividen los tratamientos en dos grupos principales: eliminación y fortalecimiento del mortero adherido. En el primer grupo de estos tratamientos se encuentran la molienda mecánica, el remojo previo en agua y el remojo previo en ácido; para el segundo grupo establecen la emulsión con polímeros, el compuesto

acuoso de puzolana, la bio-deposición de carbonato de calcio, la solución de silicato de sodio y la carbonatación. Estos procesos del segundo grupo consisten en fortalecer la zona interfacial de transición (ITZ) que permite una mayor adherencia entre los componentes el concreto; los del primer grupo como su nombre lo dice, es eliminar el mortero adherido el cual aumenta la porosidad de la matriz y a su vez disminuye la adherencia de sus compuestos. Finalmente establecen que el mejor tratamiento, no solo por su efectividad, sino por ser un método amigable con el medio ambiente, es el de carbonatación. Este se basa en la reacción química entre el CO₂ y la portlandita que libera la hidratación del cemento Ca (OH)₂ aportada por los cementos ricos en C₃S y sin adiciones puzolánicas, lo que a su vez mejora tanto los agregados como la ITZ.

Los pretratamientos para el fortalecimiento del mortero adherido cuentan con una gran variedad de investigaciones que utilizan diferentes materiales para la cobertura de los agregados, ya sea con soluciones, polímeros u otros. Un método novedoso implementado en el trabajo *Consolidating recycled concrete aggregates using phosphate solution* (Wang, y otros, 2018), consistió en consolidar la capa de mortero adherido de agregados reciclados con una solución de fosfato. Para lograr esto los agregados reciclados se sumergen en una solución de fosfato de hidrogeno de diamonio (DAP), el cual puede reaccionar con los productos de hidratación ricos en calcio en los agregados reciclados para producir hidroxiapatita que rellena los poros y sella las grietas de los agregados, obteniendo una mejora muy significativa en la microestructura de los agregados. El proceso consistió en sumergir los agregados en la solución DAP con una relación de solido liquido de 1kg/L a una temperatura de 20°C ± 1°C, además se usaron tres diferentes concentraciones (0.5 mol/L, 1 mol/L y 2 mol/L), y con cuatro duraciones diferentes de inmersión (1, 3, 7 y 14 días). Luego de la inmersión se procedía a sumergir los agregados durante 24 horas en agua de grifo, se secaban con una toalla y se ventilaban hasta que la masa alcanzó un valor constante, se pesaron antes de la ventilación y después para medir la absorción de agua; adicionalmente, se midió el PH durante la inmersión. De los resultados se obtiene que se alcanzó una disminución hasta del 18,16 % en la absorción del agua, sin embargo, la porosidad de los agregados con mayor concentración (2 mol/L) aumentó, al igual que la resistencia a la compresión que presentó un incremento hasta del 19 % con respecto a la muestra original. Estos porcentajes de mejoría indican que la efectividad del método usado es efectiva, al igual que el uso de polímeros cómo se demostró en el estudio realizado por Spaeth & Tegguer (2014). Este estudio consistió en un pretratamiento de agregados gruesos de concreto reciclado por medio de la impregnación de seis tipos de polímeros, ver Tabla 1.

El agregado reciclado se obtuvo de concreto ordinario que se preparó para la investigación y se trituró, teniendo a su vez como agregado grueso piedra caliza con densidad de 2,7 g/cm³, una relación agua/cemento de 0,49 y un proceso de curado de 90 días. Previo al proceso de impregnación de los agregados se tomó la absorción de agua tanto de los agregados naturales, como de los reciclados.

Tabla 1. Polímeros usados para el estudio
Tomada de: (Spaeth & Tegguer, 2014)

| Treatment acronyms | Names of product | Compositions | Concentration gradient | |
|--------------------|--------------------------------------|--|------------------------|---------------|
| | | | C_{min} (%) | C_{max} (%) |
| P1 | Sodium silicate solution | Sodium silicate | 7 | 30 |
| P2 | BS 2 Wacker siloxane/silane emulsion | Octyl/methyl methoxy co-oligomeric siloxane/silane | 5 | 30 |
| P3 | IE 4 Dow Corning silane emulsion | Octyl triethoxy silane | 5 | 40 |
| P4 | BS 3 Wacker siloxane/silane emulsion | Siloxane/propyl trimethoxy silane | 5 | 50 |
| P5 | BS 4 Wacker siloxane/silane emulsion | Siloxane/propyl triethoxy silane | 5 | 60 |
| P6 | BS 5 Wacker siloxane/silane emulsion | Siloxane/alkylalkoxysilane | 5 | 40 |

El proceso llevado a cabo consistió en una inmersión simple, con un único polímero, y otra doble, en donde se realiza una primera inmersión en un tipo de polímero, y seguidamente se hace el mismo proceso con otro tipo de polímero. El primer proceso se hizo con cada uno de los seis polímeros durante cinco minutos, y después se secaron las muestras durante 24 horas en una habitación a 20 °C, luego en un horno de ventilación a 50°C ± 5 °C hasta que la diferencia de masa fuera menor a 0,1 %. Para el segundo proceso, se recubrió inicialmente con P1 por tres minutos, y se dejó secando por 20 horas, seguidamente se realizó la inmersión con cada uno de los polímeros de P2 a P6 por 5 min, con un proceso de secado de 24 horas, para posteriormente secar con un horno de ventilación a 50°C ± 5 °C hasta que la diferencia de masa fuera menor a 0,1 %. Las impregnaciones se hicieron con diferentes dosificaciones. Y se realizó una prueba de pérdida por abrasión en la máquina de Los Ángeles.

De todo lo anterior se obtuvo que el proceso doble de P1+ P2, y el simple de P3, reducen de forma significativa la absorción de agua y refuerzan la matriz de concreto. Con base en los anteriores resultados cualquiera de los procesos ejecutados por Wang o Spaeth & Tegguer, abordaría el problema de la absorción de forma efectiva; lo más relevante para la elección de alguno de los procesos es la facilidad con la que se puedan conseguir los insumos y así mismo su coste.

Otra investigación que aborda el fortalecimiento del mortero adherido implementa el uso de un repelente de agua a base de silano, como tratamiento para el agregado reciclado de concreto, con el fin para la mejora la durabilidad del concreto a evaluar que se ve afectada por la alta absorción que tienden a presentar los concretos con agregados reciclados (Zhu, Kou, Poon, Dai, & Li, 2012). Diferentes dosificaciones del repelente de agua a base de silano fueron usadas para cubrir la superficie del concreto, es decir, tratamiento de silano superficial, o para agregar integralmente en la mezcla del concreto, es decir, tratamiento integral de silano. Las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto tratado fueron evaluadas. Se encontró que el tratamiento integral de silano puede mejorar la durabilidad del agregado de concreto reciclado; pero puede llevar a la reducción de la resistencia a compresión, el tratamiento superficial de silano es más efectivo que el tratamiento integral en mejorar la resistencia del agregado de concreto reciclado a la capilaridad por la absorción de agua, carbonatación y penetrados de cloruro.

Otro método que incide en la absorción y además en la penetración de cloruro es el uso de alcohol polivinílico como agente de cobertura en los agregados, esto se definió a partir del

estudio sobre el mejoramiento de las propiedades para el agregado reciclado de concreto (RCA) por medio de la impregnación de alcohol polivinílico (PVA) (Kou & Poon, 2010). Los efectos del PVA fueron evaluados en el desarrollo de propiedades de resistencia y durabilidad de los agregados reciclados de concreto. La investigación experimental se hizo en dos partes. Inicialmente, se determinó la óptima concentración de solución de PVA requerida para el mejoramiento para el RCA; estos, fueron sumergidos en soluciones de PVA al 6%, 8%, 10%, 12%, y la impregnación se llevó bajo un ambiente controlado de laboratorio. Se determinó la densidad, el valor de aplastamiento y la absorción de agua en los RCA impregnados con PVA (PI-RCA). Posteriormente, se determinó la pérdida por abrasión, la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción, el cambio dimensional (contracción) y la penetrabilidad de cloruro para el concreto preparado, que había sido impregnado con la concentración óptima (10%, definida en la primera fase) de PVA. Se encontró que el 10% de finos de los PI-RCA fue mayor, y que la absorción de agua de lo PI-RCA fue menor en comparación con los RCA sin tratamiento. Los resultados muestran que no únicamente hay un mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto hecho con PI-RCA, sino también que la contracción del PI-RCA se reduce mientras que la resistencia a la penetración de iones de cloruro en el concreto producido aumenta.

Finalmente, otra alternativa para disminuir la absorción de un concreto reciclado, que más que tener relación directa con las propiedades de los agregados, consiste en mejorar la matriz del concreto durante el proceso de mezclado con aditivos, como lo que se realizó en la investigación llamada *Incorporación de aditivos en hormigones reciclados para modificar sus propiedades* (Moro, y otros, 2014), en este se estudian las propiedades mecánicas y físicas de concreto producido con agregado grueso reciclado, como, la resistencia a compresión, la tracción indirecta y absorción capilar, para esto realizaron mezclas con varias relaciones agua -cemento (0.45, 0.5 y 0.6). Se añadieron aditivos, como un súper fluidificante e incorporador de aire, de manera independiente, y en otras muestras los dos al tiempo. En todas las mezclas se hizo un remplazo del 75 % de agregado natural por reciclado, además el concreto reciclado se obtuvo de la rotura de probetas a través de una mandíbula de laboratorio, estas probetas contenían agregado de canto rodado triturado. De este material se realizó una curva granulométrica para definir su tamaño máximo nominal, que resultó similar al canto rodado natural. Se evaluaron propiedades del agregado natural y del reciclado, como son la densidad relativa saturada y seca, absorción en 24 horas y abrasión en la máquina de Los Ángeles; para la absorción se obtuvo un valor de 0,4 % y 4,7 %, respectivamente. La mezcla del concreto se trabajó con un asentamiento del 8 a 10 cm con el cono de Abrams; finalmente, después de hacer el curado como lo estipula la Norma de Argentina (IRAM 1534, 2004), se obtiene a partir de los ensayos que los concretos con la menor relación agua/ cemento son los tienen mayor resistencia a la compresión y tracción, además poseen la menor absorción. El incorporador de aire fue el más beneficioso para disminuir la absorción en los concreto con relación agua/cemento del 60 %, pero disminuyen la resistencia en un 33 %. Los concretos con súper fluidificantes presentaron un aumento en su resistencia entre el 4 y 7 %. El uso de los dos aditivos, además de disminuir la absorción aumento la resistencia a tal punto de ser muy similar a la de un concreto reciclado sin aditivos.

2.2. ESTADO DEL ARTE

2.2.1. TUBERÍA DE CONCRETO

Debido a la facilidad de instalación, la versatilidad, el desempeño, la durabilidad, la resistencia, la seguridad y la economía, la tubería de concreto es la forma más viable para transportar fluidos como desechos industriales, agua potable, aguas negras o pluviales. Para ello es importante tener en cuenta las características del concreto que lo hacen funcional como tubería; además, es imprescindible estudiar características para la realización de la misma con agregados reciclados. Dentro de estas características se encuentran la resistencia a la rotura, la absorción, la infiltración y la permeabilidad especificadas en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1022.

Los criterios de aceptación y los requisitos están establecidos en la norma NTC 1022, y se hará a partir de los resultados de los ensayos correspondientes para cada una de las propiedades mencionadas anteriormente.

Los requisitos técnicos que deben cumplir los tubos utilizados para acueducto, alcantarillado, uso sanitario y aguas lluvias, así como los accesorios utilizados para ese fin se establece en la resolución 1166 de 2006 de la NTC; en este, se hace énfasis en la necesidad de hacer uso de materiales que sean aptos para proteger objetivos legítimos tales como la vida, la salud y la seguridad humana, animal, vegetal y el medio ambiente.

Norma Técnica Colombiana 1022

En esta norma se establecen los ensayos a realizar y requisitos que deben cumplir los tubos de concreto sin refuerzo en acero utilizados en la conducción de aguas lluvias, de aguas negras, de residuos líquidos industriales, drenajes de vías y en general tubos de concreto utilizados como conductos no sometidos a presión hidrostática interna. En la Tabla 2 se presenta la lista de las normas de la NTC que rigen la construcción de la tubería de concreto.

Tabla 2. Listado de la Normativa NTC.

| Norma | Contenido | Referencia |
|--------------|---|-------------------|
| NTC 121 | Especificación de desempeño para cemento hidráulico. | ASTM C1157 |
| NTC 174 | Ingeniería civil y arquitectura. Especificaciones de los agregados para concreto. | ASTM C33 |
| NTC 1299 | Ingeniería civil y arquitectura. Aditivos químicos para concreto. | ASTM C494 |
| NTC 1328 | Ingeniería civil y arquitectura. Juntas flexibles para unión de tubos circulares de concreto. | ASTM C443M |

| | | |
|----------|--|------------|
| NTC 1522 | Suelos. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado. | ASTM D422 |
| NTC 1977 | Concretos. Compuestos líquidos para formar una membrana de curado para el concreto. | ASTM C309M |
| NTC 3459 | Ingeniería civil y arquitectura. Agua para la elaboración de concreto. | BS 3148 |
| NTC 3493 | Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. | ASTM C618 |
| NTC 3653 | Ingeniería civil y arquitectura. Definiciones estándar de términos relacionados con tuberías de concreto y productos afines. | ASTM C822 |
| NTC 3676 | Ingeniería civil y arquitectura. Métodos de ensayo para tubería, secciones de pozos de inspección y bloques de concreto. | ASTM C497M |
| NTC 4018 | Ingeniería civil y arquitectura. Escoria de alto horno granulada y molida para uso en concretos y morteros. | ASTM C989 |
| NTC 4637 | Ingeniería civil y arquitectura. Concretos. Especificaciones para el uso de microsíllica como adición en mortero y concreto de cemento hidráulico. | ASTM C240 |
| NTC 5541 | Concretos reforzados con fibra. | ASTM C1116 |
| NTC 5653 | Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido. | ASTM C642 |

2.2.2. CONCRETO

El concreto es uno de los materiales más usado en la construcción, este consiste en una mezcla de arena, grava, roca triturada u otros elementos, que se unen por medio de una pasta creada con cemento y agua, en ocasiones se le incluyen aditivos para mejorar ciertas cualidades. El concreto como cualquier material pétreo tiene una gran resistencia a la compresión y una muy baja resistencia a la tensión (McCormac & Brown, 2011). Así pues, se puede definir el concreto como:

Cemento + Agua + Agregado fino +Agregado grueso + Aire +Aditivos +Materiales cementicios complementarios alternativos (ASCM)

Debido a que la adherencia de todos estos componentes en el concreto depende de las reacciones químicas entre el cemento y el agua, al igual que otros factores tales como la colocación y compactación, es de gran importancia establecer un proceso eficiente al momento de realizar la mezcla, seleccionando material de calidad para sus agregados, un buen diseño propio de la mezcla, un método adecuado de compactación, vibración, e incluso si es necesario la inclusión de un aditivo para garantizar la calidad del concreto endurecido.

Estructura interna del concreto

En la *Figura 1* se puede apreciar el esquema típico de la estructura interna del concreto endurecido, que consiste en el aglomerante, estructura básica o matriz, constituido por la pasta de cemento y agua; cuya función es aglutinar los agregados gruesos y finos, así como el aire y vacíos. La capacidad de la pasta para adherirse a los agregados y soportar esfuerzos de tracción y compresión establecen un comportamiento resistente en la mezcla, al igual que un efecto puramente mecánico propiciado por el ordenamiento de las partículas inertes y sus características propias. Se concluye de manera inmediata que la estructura del concreto no es homogénea, y en consecuencia no es isotrópica, es decir, no mantiene las mismas propiedades en diferentes direcciones. Esto se debe principalmente a la variación de los materiales que intervienen (Civilgeeks.com, 2011), en adición al proceso de elaboración, durante dicho proceso existe una etapa donde la pasta es plástica, facilitando el ordenamiento aleatorio de los componentes hasta su ubicación definitiva al completar el fraguado.

Un aspecto sumamente importante en la estructura del concreto endurecido reside en la porosidad o sistema de vacíos. Gran parte del agua que interviene en la mezcla, sólo cumple la función de lubricante en el estado plástico, ubicándose en las líneas de flujo y zonas de sedimentación de los sólidos hasta que se produce el endurecimiento y esta se evapora; de tal manera se forman los vacíos o poros, que condicionan sus propiedades como lo son la absorción y la permeabilidad.

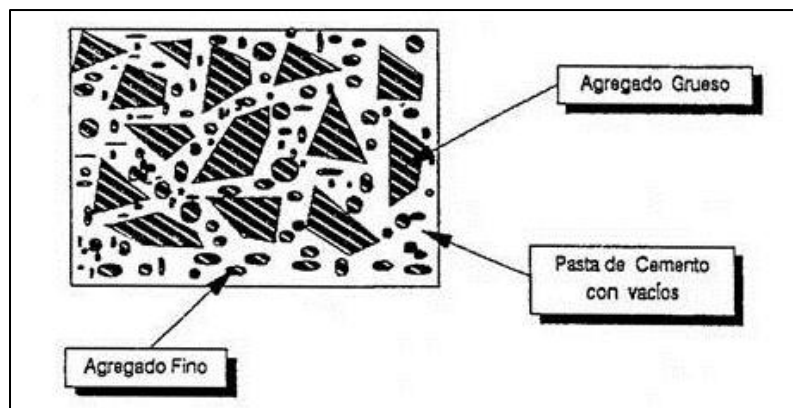


Figura 1. Esquema típico de la estructura del concreto endurecido
Fuente: civilgeeks.com

Para poder entender mejor el comportamiento del concreto es importantes establecer dos etapas en su fabricación, cuando está fresco y cuando está endurecido; en cada una de estas el concreto posee diferentes características; el desarrollo de las características en la primera etapa (concreto fresco) influyen aquellas de la segunda etapa (concreto endurecido).

Propiedades del concreto en estado fresco

a) Trabajabilidad: Está definida por la mayor o menor dificultad para el mezclado, transporte, colocación y compactación del concreto. Su evaluación es relativa, por cuanto depende realmente de las facilidades manuales o mecánicas de que se disponga durante las etapas del proceso, ya que un concreto que puede ser trabajable bajo ciertas condiciones de colocación y compactación, no necesariamente resulta así, si dichas condiciones cambian. El método tradicional de medir la trabajabilidad ha sido desde hace muchos años el "Slump" o asentamiento con el cono de Abrams, ya que permite una aproximación numérica a esta propiedad del concreto.

b) Segregación: Cuando la viscosidad del mortero se reduce por insuficiente concentración de la pasta, mala distribución de las partículas y/o granulometría deficiente, las partículas gruesas se separan del mortero y se produce lo que se conoce como segregación. Las diferencias de densidades entre los componentes del concreto provocan una tendencia natural a que las partículas más pesadas descendan, pero en general, la densidad de la pasta con los agregados finos es sólo un 20 % menor que la de los gruesos (para agregados normales) lo cual sumado a su viscosidad produce que el agregado grueso quede suspendido e inmerso en la matriz.

c) Exudación: Propiedad por la cual una parte del agua de la mezcla se separa de la masa y sube hacia la superficie del concreto; es un caso típico de sedimentación en el que los sólidos se asientan dentro de la masa plástica. Más que el efecto de la viscosidad y la diferencia de densidades, son las leyes físicas del flujo de un líquido en un sistema capilar las que gobiernan este fenómeno. La exudación está influenciada por la cantidad de finos en los agregados y la finura del cemento, por lo que, cuanto más fina es la molienda de este y mayor es el porcentaje de material que pasa la malla N° 100, la exudación será menor pues se retiene el agua de mezcla. Esta se produce inevitablemente en el concreto, ya que es una propiedad inherente a su estructura, lo importante es evaluarla y controlarla en cuanto a los efectos negativos que puede llegar a tener.

d) Contracción: Es una de las propiedades más importantes en función de los problemas de fisuración que acarrea con frecuencia. Ya que la pasta de cemento necesariamente se contrae debido a la reducción del volumen original de agua por combinación química, a esto se le llama contracción intrínseca que es un proceso irreversible. Pero también existe otro tipo de contracción inherente a la pasta de cemento, es la llamada contracción por secado, que es la responsable de la mayor parte de los problemas de fisuración, dado que ocurre tanto en el estado plástico como en el endurecido si se permite la pérdida de agua en la mezcla. Este proceso es reversible, ya que, si se repone el agua perdida por secado, se recupera gran parte de la contracción producida.

Propiedades del concreto en estado endurecido

Muchas de las propiedades exigibles a un hormigón en estado endurecido, dependen de las propiedades de éste cuando se encuentra en estado fresco, como son las características de la estructura a construirse, los métodos de colocación y la compactación disponible.

a) Elasticidad: En general, es la capacidad del concreto de deformarse bajo carga, sin tener deformación permanente. Sin embargo, el concreto no es un material elástico estrictamente hablando, ya que no tiene un comportamiento lineal para su deformación. Los módulos de Elasticidad normales oscilan entre 250,000 a 350,000 kg/cm² y están en relación inversa con la relación Agua/Cemento

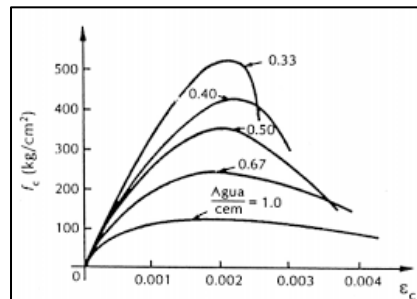


Figura 2. Curva Carga vs Deformación para diferentes relaciones a/c.
Fuente: infobasicingcivil.blogspot.com

b) Resistencia: Es la capacidad de soportar cargas y esfuerzos, siendo su mejor comportamiento en compresión en comparación con la tracción, debido a las propiedades adherentes de la pasta de cemento. Depende principalmente de la concentración de la pasta de cemento, que se acostumbra expresar en términos de la relación Agua/Cemento en peso. La afectan además los mismos factores que influyen en las características resistentes de la pasta, como son la temperatura y el tiempo, aunados a otros elementos adicionales constituidos por el tipo y características resistentes del cemento y de la calidad de los agregados. Un factor indirecto, pero no por eso menos importante en la resistencia, lo constituye el curado ya que es el complemento del proceso de hidratación sin el cual no se llegan a desarrollar completamente las características resistentes del concreto. Los concretos normales usualmente tienen resistencias en compresión del orden de 100 a 400 kg/cm².

c) Durabilidad: es la capacidad de resistir las condiciones de servicios a las que el concreto estará sometido, algunas como el desgaste, la meteorización y la acción química. La falta de la durabilidad en un concreto se debe al tipo de exposición en el que se encuentra o a las características propias de este. Las causas externas pueden ser físicas, químicas o mecánicas; las causas internas más relevantes son la relación álcali-agregado, cambios de volumen, y la permeabilidad que tiene gran relación con la vulnerabilidad del concreto ante agentes externos, por lo que cual se establece una buena durabilidad a un concreto que tenga una

permeabilidad muy baja. A continuación, se menciona brevemente algunas de estas causas, tanto internas como externas.

- Permeabilidad: la porosidad de un concreto no es lo único que determina su permeabilidad, esta también se debe a la distribución, la continuidad y el tamaño de los poros. Además, de que la permeabilidad se ve directamente afectada por el tamaño del cemento, por lo que es más conveniente el uso de cemento fino. Finalmente, si se tiene un concreto casi impermeable cuando tiene una baja relación agua/cemento, una buena gradación de los agregados y una buena compactación (ING Gerardo Rivera L., 2013)
- Meteorización: esto es un proceso que se da en el concreto debido a dilataciones y contracciones de este por cambios de temperatura. Para evitar que esto suceda se debe tener en cuenta varios aspectos como una relación agua cemento baja, un contenido mínimo de agua, un concreto manejable, un curado adecuado y un contenido óptimo de aire incorporado. Estas dilataciones se pueden presentar también en algunos tipos de agregados como son lutitas, arcillolitas, chert y otros micáceos, para descartar algún tipo de meteorización se realiza la prueba establecida en la NTC 126, que es la prueba de sanidad y solidez en sulfato de sodio o de magnesio (pérdida de agregado fino menor al 10 % en sodio y 15 % en magnesio, agregado grueso 12 y 18 % respectivamente).
- Ataque de la congelación y la fusión: La mejor forma de abordar este problema es con la inclusión de aire en el concreto, ya que esto le brinda espacio al agua que se puede llegar a congelar o ser expulsada por los agregados.
- Acción química: Este daño en el concreto se puede dar debido al efecto expansivo de los álcalis del cemento a causa de contenido de sílice en algunos materiales. Por lo que la ASTM C-150 recomienda que el contenido de $\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$ en el cemento no sea mayor al 0,6 %. Se encuentran también otros ataques químicos en el concreto como son la lixiviación, la acción del agua del mar, la acción de sulfatos y aguas naturales con cierto grado de acidez. El ataque por sulfatos se debe a la solución que se forma con sales, ya que en forma sólida las sales no afectan el concreto, existen algunas arcillas que tienen contenidos de sales que una vez se empieza la mezcla se produce un ataque al cemento, para esto se realiza una prueba de laboratorio de resistencia a sulfatos. El ataque del agua del mar es semejante al descrito anteriormente, y además de este ataque químico la cristalización de las sales en los poros del concreto pueden destruirlo por la presión que ejercen, por lo que en medios como estos la impermeabilidad del concreto juega un rol muy valioso. El ataque de los ácidos se produce comúnmente en chimeneas, y túneles por donde pasan locomotores de vapor, y también en algunas áreas industriales
- Desgaste: Las principales causas del desgaste en el concreto se debe a movimiento de materiales desgastadores por medio de agua en movimiento, acción del tráfico en el pavimento, y cavitación. Para que un concreto sea resistente a este tipo de situaciones es importante una relación agua cemento baja, un contenido mínimo de agua y un buen curado. La dureza del agregado según la NTC 93 y 98, debe de tener porcentaje de pérdida no mayor al 40 %. Para esto se evalúa la resistencia del agregado grueso en la máquina de los Ángeles (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2019).

2.2.3. CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO

Actualmente, se ha incrementado el uso de concreto como agregado reciclado, esto se debe a que en muchos lugares se tienen en cuenta las magnitudes de la contaminación y el impacto ambiental generado por la extracción de agregados naturales, tales como contaminación de aguas, polución en el aire, generación de polvo y demás. Los europeos afrontaron la destrucción en sus ciudades por graves problemas de acumulación de escombros con la dedicación del reciclaje de estos para utilizarlos como material de construcción. Después de la posguerra hubo muy poco interés por investigar este asunto; no fue, sino hasta años posteriores cuando se incrementó el estudio del producto de la demolición como agregado. En promedio, todo el continente europeo hace buen uso de sus residuos ya que de los 200 millones de toneladas de concreto que se producen, en promedio el 30 % son concretos reciclados, lo que demuestra cómo ha avanzado la tecnología en el tema descrito anteriormente. Estos avances se han logrado gracias a políticas gubernamentales y culturales encaminadas al desarrollo sostenible.

En Norte América cerca del 25 % a 30 % del flujo de residuos proviene de la demolición, de los cuales el 25 % es reciclado. En 38 estados en E.E.U.U. utilizan agregados de concreto reciclado para sub-bases viales y 11 lo reciclan en concreto nuevo. Consumen 136 millones de toneladas de concreto en edificios, sin contar con lo usado en carreteras, puentes y aeropuertos, donde cerca de 100 millones de toneladas son recicladas, y reutilizadas en carreteras para la creación de nuevos concretos, todo lo anterior permite una visualización de la importancia de los residuos de la construcción por su magnitud y potencial

Estudios

Por lo general, el agregado reciclado se obtiene de concreto demolido de estructuras que existían. Cómo se tiene una variedad de desperdicios, es importante para este tipo de material reciclado hacer un proceso de separación de lo que se puede usar para la nueva mezcla. Generalmente, se reemplaza en un porcentaje el agregado grueso natural por uno reciclado. Se debe de tener en cuenta que el comportamiento de un agregado grueso reciclado es muy heterogéneo en comparación con uno natural. Por lo cual los concretos reciclados presentan variaciones en muchas de sus propiedades físico-mecánicas. Este reemplazo porcentual se puede dosificar sea en peso o volumen de la mezcla.

Las propiedades de los agregados de concretos reciclados han sido investigadas en distintas ocasiones por Ploger, Buck y Malhotra y, en comparación con los agregados naturales se observa que la principal diferencia entre ellos es la mayor cantidad de absorción que presenta el agregado de concreto reciclado, este fenómeno es más marcado en el agregado fino; debido a la porosidad que presenta la pasta de cemento, el cual trata de concentrarse en la fracción fina; además, tienen un mayor desgaste a la abrasión en la

máquina de los Ángeles debido a que estos agregados presentan una menor densidad. Por lo que se concluye que la calidad de los agregados gruesos de los concretos reciclados es inferior a la de la grava natural a causa de la gran cantidad de mortero envejecido que permanece en las partículas de grava en los agregados reciclados.

Existen diferentes tipos de métodos para realizar el diseño de una mezcla de concreto con agregados reciclados, desde tomar en cuenta el mortero residual o solo una parte como mortero fresco para la nueva mezcla, hacer correcciones en la dosificación del agua dependiendo de la absorción de los agregados reciclados, etc.

La durabilidad del concreto con agregados reciclados es menor en comparación con el convencional, esta propiedad está relacionada con el mortero adherido, puesto que este mortero tiende a aumentar la porosidad y la permeabilidad del concreto.

Según Hansen (Hansen, 1985), entre menor sea el tamaño del agregado reciclado mayor será su porcentaje de mortero adherido, por lo que se recomienda usar la fracción gruesa del concreto triturado como agregado reciclado. A continuación, se presentan los valores índices del mortero adherido con base en el tamaño de la partícula.

Tabla 3. Datos de índice de mortero adherido. (Hansen, 1985)

| Tamaño de Partícula | Índice porcentaje Mortero adherido |
|----------------------------|---|
| 4-8mm | 60% |
| 8-16mm | 40% |
| 16-32mm | 30% |

El mortero adherido también afecta propiedades como la manejabilidad del concreto debido al aumento en la absorción, con base en esto varias normas internacionales existentes recomiendan para la fabricación de concreto reciclado como agregado la pre saturación de este agregado. Esta absorción depende de la calidad del concreto que se recicla, por lo que al usarse concreto de altas resistencias para este fin se garantiza una menor absorción. Se tiene que el incremento de la absorción al usar agregados reciclados a partir de concreto puede llegar a ser hasta del 225 %.

2.2.4. PRETRATAMIENTO DE AGREGADOS RECICLADOS

Debido a los problemas que se presentan al momento de realizar un concreto con agregados reciclados (AR), se han realizado investigaciones con diferentes tipos de procesos para la mejora de la calidad de los agregados a usar. Estos procesos de mejora se pueden dividir principalmente en dos grandes grupos, resolviendo el problema de dos formas, como lo son eliminando el mortero adherido o mejorando el agregado reciclado. En la Figura 3, se presenta una clasificación de algunos de los pretratamientos que se pueden encontrar entre

estos dos grupos. Algunos de estos procesos son costosos por el gasto del tiempo, el tipo de material usado, o la maquinaria necesaria para dicho proceso, por lo cual, al momento de seleccionar un proceso de pretratamiento es importante tener en cuenta su viabilidad económica.

Para los procesos de la eliminación de finos, se clasifican en dos grandes grupos, mecánicos y de remojo. En los pretratamientos mecánicos se utilizan procesos como la eliminación de finos por abrasión en un molino de bolas, el cual tiene gran probabilidad de dejar un daño permanente en los agregados al afectar la durabilidad del concreto producido con estos; se encuentra además el tratamiento con calor, que también afecta de forma negativa a los agregados con el tiempo (Al-Bayati, Das, Tighe, & Baaj, 2015).

Para los procesos de remoción por lavado del mortero adherido se usan componentes desde agua hasta diferentes tipos de ácidos el proceso consiste en dejar durante cierto tiempo el agregado sumergido con una dosificación del ácido o el agua; las desventajas de este tratamiento es que puede ser peligroso por tratarse de ácidos, también se producen nuevos residuos contaminados y generan un daño a la calidad del agregado en cuanto a la durabilidad. El remojo en agua sirve para eliminar cierta cantidad de finos, pero no es muy relevante lo que se logra con este método.

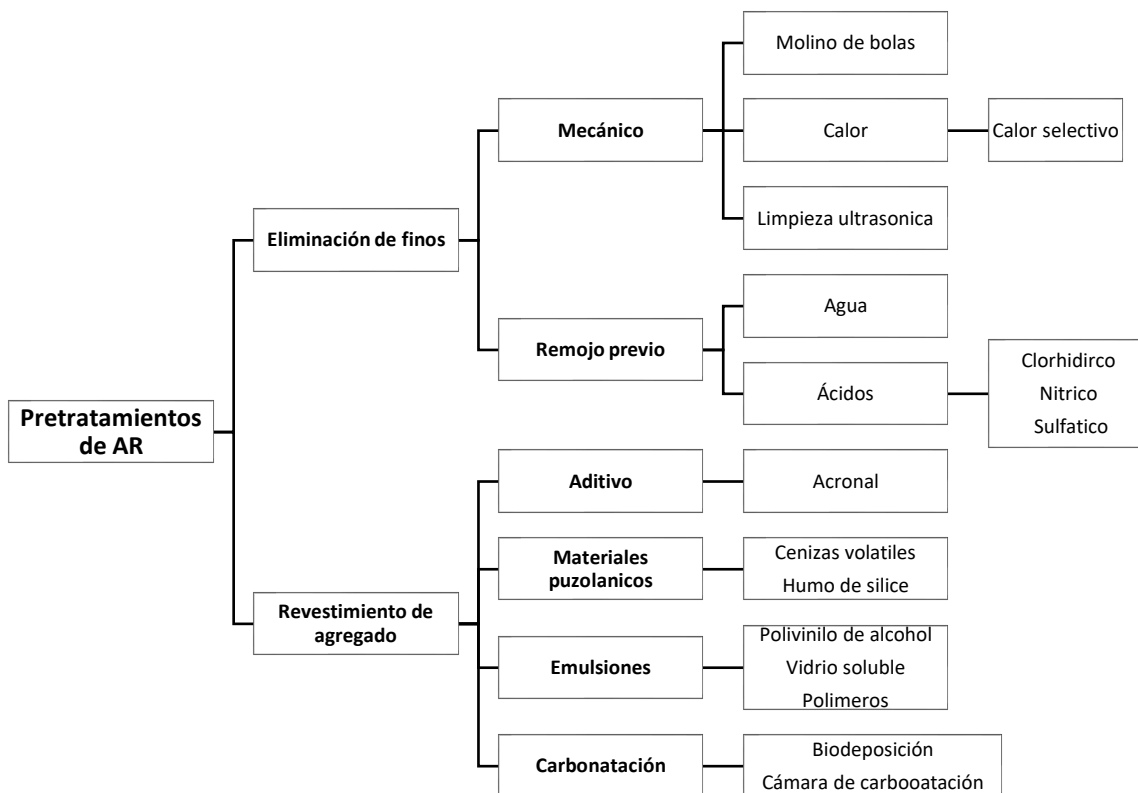


Figura 3. Clasificación de pre-tratamientos de agregados reciclados (ARC).

Fuente: Elaboración propia

Para los tratamientos de revestimiento existe más variedad de métodos, desde el uso de aditivos, materiales puzolánicos, emulsiones, lechadas con materiales cementantes (cemento portland, puzolana, etc.), hasta procesos químicos que llevan a la carbonatación del agregado. La idea de estos métodos es rellenar los poros creados entre la pasta de cemento y el agregado, a la cual esta está adherida. Dentro de estos métodos se encuentran algunos procesos que además de ser algo complejos de llevar a cabo, como el uso de bacterias para generar una biodeposición, también algunos se hacen con tecnologías avanzadas y /o materiales costosos.

En la sección anterior se mencionó que varias normas internacionales para la producción de concreto reciclado, recomiendan la pre saturación con agua del agregado; este proceso se podría clasificar como un pretratamiento para los agregados, puesto que se realiza con el fin de llevar a los agregados a un estado de superficie seca saturada (sss), para que al momento de realizar la mezcla, estos por su alta absorción no tomen el agua necesaria para la reacción del cemento, y finalmente el fraguado del concreto sea adecuado permitiendo que este desarrolle de forma plena las características mecánicas.

Según material bibliográfico, por lo general los agregados reciclados de concreto absorben el 70% del agua absorbida en 24 horas, aunque este porcentaje varía dependiendo del tamaño de la partícula y la cantidad del mortero adherido en el agregado (Di Maio, A.; Traversa, L.P. , 2003).

3. METODOLOGÍA

3.1. RECOLECCIÓN DEL MATERIAL

El proyecto consiste en dar una alternativa a una empresa fabricante de tubos de concreto en el manejo de sus escombros de concreto, por lo que los escombros se obtuvieron a través de esta empresa, al igual que el agregado natural, además el concreto se realizó con el mismo cemento que utilizan en sus tuberías; esto con el fin de tener un acercamiento más real y específico del problema, y así mismo desarrollar una solución fidedigna.

El agregado natural que utiliza la empresa Aljibes el Manantial se obtiene del río, y el cemento es Cemex Tipo UG; el agregado se almacena a la intemperie.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

3.2.1. GRANULOMETRÍA

Cada muestra en estado seco, fue previamente pesada y su tamaño fue de 1000 gramos. Se utilizó una tamizadora mecánica para facilitar la distribución de las partículas y obtener una mejor gradación. Los tamices utilizados para el análisis granulométrico fueron: 1/2" (12.7mm), 3/8" (9.525mm), 1/4" (6.35mm), #4 (4.76mm), #8 (2,38mm), #16 (1.19mm), #30 (0.595mm), #50 (0.297mm), #100 (0.149mm) y #200 (0.074mm). Donde a partir del pasa tamiz #8 se tiene el agregado fino (ver resultados en la sección de resultados 4.1.1)

Posteriormente, al tener los porcentajes que pasan por cada tamiz, se realizan las curvas granulométricas. (NTC 77, 2007)

3.2.2. DENSIDAD Y ABSORCIÓN

AGREGADO FINO:

Este ensayo se rige por la NTC 237, para realizarlo se necesita un picnómetro, un cronometro, una balanza, una bandeja, un recipiente y una varilla de compactación. La absorción y las densidades se determinan con las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{S-A}{A} * 100 \quad (1)$$

Dónde A = masa en el aire de la muestra secada al horno, S = masa de la muestra saturada y superficialmente seca.

$$D_{aparente} = 0.9975 * \frac{A}{B+S-C} \quad (2)$$

$$D_{nominal} = 0.9975 * \frac{A}{A+B-C} \quad (3)$$

Dónde A= peso seco, B= Peso picnómetro + agua, S= Peso SSS de la arena, C= Peso picnómetro + arena + agua.

AGREGADO GRUESO:

Este ensayo se rige por la NTC 176, se debe tomar un tamaño de muestra que depende del tamaño máximo nominal del agregado. Con las ecuaciones 1, 4 y 5 se determinan las densidades y la absorción.

$$D_{aparente} = 0,9975 * \frac{P_s}{P_{SSS} - P_{sumer}} \quad (4) \qquad D_{nominal} = 0,9975 * \frac{P_s}{P_s - P_{sumer}} \quad (5)$$

Dónde P_s = masa en el aire de la muestra secada al horno, gramos, P_{SSS} = masa de la muestra saturada y superficialmente seca, y P_{SUMER} = masa de la muestra sumergida.

Este ensayo es necesario para determinar la densidad y la absorción del agregado, propiedades fundamentales para realizar el diseño de mezcla. Cabe resaltar que el agregado grueso tanto como el fino que se utiliza es agregado de río (canto rodado).

3.2.3. IMPUREZAS ORGÁNICAS

Este ensayo consiste en poner una muestra del agregado fino en un recipiente cilíndrico, con una solución de hidróxido de sodio. Inicialmente, la cantidad del agregado debe ser aproximadamente 130 cm³, y junto con la solución, luego de agitarse, 200 cm³. Se deja reposar por 24 horas, luego de este periodo se compara el color de la solución de la muestra con un color patrón preestablecido; colores patrones que van desde un amarillo claro para bajo contenido de materia orgánica a un marrón oscuro para un alto contenido (NTC 127, 2000).

3.3. SELECCIÓN DE PRETRATAMIENTOS

Para decidir sobre qué procesos de pretratamientos implementar para los agregados a usar en el concreto de las probetas cilíndricas, y así hacer definir el diseño de mezcla para los tubos, se realizan varios pretratamientos por medio de pruebas preliminares comparando la variación de la absorción de los agregados. Se encontró en la bibliografía diferentes métodos entre los cuales estaba el uso de impregnación con polímeros (Spaeth & Tegguer, 2014), polivinilo de alcohol (Kou & Poon, 2010), silicato de sodio (P. Saravanakumar, 2015), entre otros más que abordan la problemática desde el objetivo de dar una capa de cobertura al agregado reciclado; para el proceso de remoción del mortero adherido se tienen métodos mecánicos como son el calor (Hanaa Khaleel Alwan Al-Bayati, 2015), remoción por medio de la máquina de los ángeles, también está el lavado con agua y con diferentes tipos de ácidos. En la Figura 3 se presenta previamente una clasificación más detallada de los diferentes procesos de pretratamientos.

Puesto que la problemática está enfocada en una empresa pequeña que construye de forma artesanal la tubería de concreto, se tiene la intención de encontrar un método que sea conveniente económicamente para esta, y que no implique más gasto de lo que significa deshacerse de los escombros que generan. Se optó por realizar pruebas preliminares con los pre-tratamientos más sencillos. Se hizo una impregnación con un polímero muy común, Acronal, un proceso con polivinilo de alcohol, silicato de sodio, y además se implementó la pre saturación con agua de los agregados reciclados, un método muy común y sencillo para el pretratamiento de estos.

POLIVINILO DE ALCOHOL:

Este proceso consistió en la impregnación del agregado reciclado con una solución al 10 % de polivinilo de alcohol (PVA). Se decidió ese porcentaje basándonos en los resultados obtenidos en un trabajo previo, donde se determinó que esa concentración era la óptima (Kou & Poon, 2010). Primero se preparó la solución con un volumen total de tres veces el volumen del agregado a tratar. Para esto se añadió en una olla el agua y el PVA, ver Figura 5, se hirvió la solución para acelerar la mezcla homogénea; una vez obtenida se dejó enfriar y posteriormente se sumergió el agregado durante 48 horas en la solución; el agregado se saca de la solución y se deja secando en un horno a 50 °C durante 24 horas, para finalmente realizar la prueba de absorción al agregado.



Figura 4. Etiqueta del Polivinilo de Alcohol.



Figura 5. Preparación de la solución de PVA

SILICATO DE SODIO:

Este proceso es bastante similar al que se realizó con el polivinilo de alcohol a diferencia que la solución se realizó al 20 %, se dejó el agregado remojando únicamente por 5 min y el secado se hizo a medio ambiente. También se prepara una solución de 3 veces el tamaño del agregado a tratar, para la preparación de esta solución solo fue mezclar un poco el agua con el silicato de sodio que venía en forma líquida y algo viscosa. Una vez secado se le realiza la prueba de absorción. En la

Figura 6, Figura 7, y Figura 8, se muestra el registro del proceder de este pretratamiento.

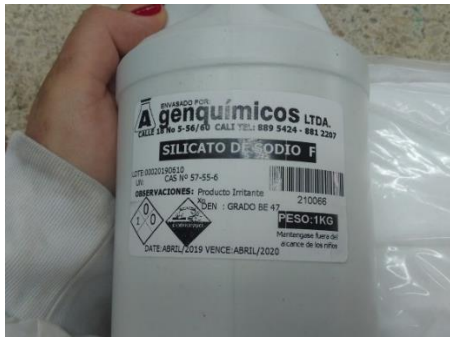


Figura 6. Silicato de Sodio.



Figura 7. Preparación de la solución de Silicato de Sodio.



Figura 8. Impregnación del AR.

ACRONAL:

Para este proceso se realizaron variaciones en la dosificación de la solución, al igual que en el tiempo se hicieron soluciones del 5 %, 10 % y 20 % con tiempos de impregnación de 10 y 20 min. La preparación de la solución simplemente consistió en revolver en el agua el Acronal que viene en forma líquida y viscosa. Para todos estos agregados reciclados de concretos tratados se realizó también la prueba de absorción. En la

Figura 9 se presenta el Acronal usado en el pretratamiento.



Figura 9. Acronal.

PRESATURACIÓN DEL AGREGADO:

En la bibliografía se encontró que una forma muy convencional de usar agregados reciclados en una mezcla de concreto, es pre saturando el agregado con agua. Este es un proceso que se realiza justo antes de empezar la mezcla. El agregado reciclado se sumerge un tiempo determinado en agua, y se saca, se seca para llevar a superficie seca saturada (SSS) y empezar a realizar la mezcla del concreto. Este proceso tiene como objetivo hacer que los agregados se saturen y que al momento de empezar la mezcla no tomen el agua de reacción del cemento para no afectar negativamente el proceso de fraguado del concreto. Para este proceso se realizaron dos muestras, una que se sumergió durante 5 min y otra durante 10 min. Puesto que este método es el más sencillo, se optó por realizar probetas de concreto con este método sin alguna evaluación previa.



Figura 10. Presaturación del AR.

3.4. DISEÑO DE MEZCLA

Para el diseño de la mezcla de concreto se parte de que la relación agua/cemento (a/c) no exceda el valor de 0.53 en masa, correspondientes a mezclas secas, y el cemento debía adicionarse a la mezcla en una proporción no menor de 280 kg/m^3 . Cabe destacar que el concreto para producir los tubos debe tener una resistencia a compresión mínima de 28 MPa (4000 psi) (NTC 1022, 2014). Según la NSR-10, al existir una gran variabilidad en las componentes de un diseño de mezclas para concreto, es necesario diseñar para una resistencia promedio requerida mayor que la especificada (Título C – NSR-10, 2010). Para este caso, la resistencia especificada a la compresión es de f'_c es de 28 MPa, por lo que la resistencia promedio requerida sería de 36.3 MPa. El diseño de las mezclas se hizo basándose en el método de espacios libres, y se complementó con el método sugerido por el Instituto Americano del Concreto - ACI 211.2.

3.4.1. PESOS UNITARIOS

Para poder calcular las cantidades de los materiales se deben obtener los pesos unitarios de los agregados y de la pasta.

PESO UNITARIO AGREGADOS

Para el ensayo de peso unitario compactado se toma una muestra de material previamente secado, se llena un recipiente metálico cilíndrico con este, se debe conocer el volumen del recipiente. El llenado se realiza en tres capas iguales, cada parte se apisona 25 veces con una varilla de apisonamiento; al finalizar, se nivela la superficie de la muestra con los bordes del recipiente, se retira el exceso y se pesa el conjunto. Con el peso del recipiente se halla el valor del peso unitario compacto del material.

En el ensayo de peso unitario suelto, se usa el mismo recipiente, pero se descarga el material en él desde una altura máxima de 5 cm, al llenarse, se nivela la superficie y se pesa. (NTC 92, 1995).

PESO UNITARIO PASTA

Para este ensayo se prepara la pasta con diferentes relaciones agua cemento, con el mismo tipo de cemento que se va a fabricar el concreto, en este caso, se prepararon con las relaciones 0.4, 0.5, 0.6 y 0.7. Siguiendo el proceso descrito previamente para la determinación de peso unitario compacto y suelto, se determinan estos pesos para cada una de estas relaciones y se realiza una gráfica de Peso Unitario Compacto/suelto vs relación agua cemento (a/c). A partir de esta grafica se interpola y se calcula el valor del peso unitario de la relación agua cemento que se va a usar en el diseño de las mezclas.

3.4.2. ESPACIOS LIBRES

Este método consiste en determinar el volumen de espacios que quedan entre las partículas de los agregados al estar contenidos en un recipiente con volumen conocido para rellenar estos espacios con pasta (agua + cemento). Para hallar estos espacios, se usa un recipiente cilíndrico de 10 cm diámetro y 10 cm de altura. Se llena el recipiente con los agregados correspondientes en diferentes dosificaciones (70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70), se rellena en tres capas y se compacta cada capa, posteriormente se pesa. Luego se añade agua para llenar todos los espacios hasta el punto que el agua rebose en el recipiente, esto se garantiza por medio del uso de una bomba de vacío. Se vuelve a pesar el conjunto con la adición de agua. Con la diferencia de pesos, se halla el peso del agua que llenó todos los espacios. Al conocer la densidad del agua, se determina el volumen que ocupó el agua, que es el mismo volumen de espacios libres.

3.4.3. DOSIFICACIÓN

Para calcular las cantidades de los materiales para la mezcla se toma la dosificación que menos espacios libres tenga. Puesto que el proyecto es la continuación de un trabajo realizado anteriormente, el objetivo es mejorar la calidad del concreto producido, para ello se toma el mismo valor de la relación a/c y del porcentaje de reemplazo del agregado grueso. Una vez establecidas estas variables, se toman además recomendaciones de la norma (ACI

Comitte 211). En la Tabla 4 se presenta el valor aproximado para la resistencia deseada con respecto a la relación a/c, que en este caso es para un concreto de 280kg/cm² y sin aire contenido se recomienda una relación del 0.57.

En la Tabla 5 se presenta una recomendación de la relación agua-cemento con base en el tipo de exposición del concreto a mezclar, ya que es una tubería de transporte de aguas grises y pluviales es una estructura expuesta a sulfatos y de sección delgada, a la cual se le recomienda una relación del 0.45.

Tabla 4. Resistencia de concreto y relación agua-cemento Fuente (ACI211.2-98)

Tabla 5. Relación a/c recomendada para diferentes tipos de exposiciones. Fuente (ACI211.2-98)

Table 3.2.2.3(a)—Relationships between water-cement ratio and compressive strength of concrete*

| Compressive strength at 28 days, psi | Approximate water-cement ratio, by weight | |
|--------------------------------------|---|------------------------|
| | Non-air-entrained concrete | Air-entrained concrete |
| 6000 | 0.41 | — |
| 5000 | 0.48 | 0.40 |
| 4000 | 0.57 | 0.48 |
| 3000 | 0.68 | 0.59 |
| 2000 | 0.82 | 0.74 |

* Values are estimated average strengths for concrete containing not more than 2 percent air for non-air-entrained concrete and 6 percent total air content for air-entrained concrete. For a constant w/c or w/(c + p), the strength of concrete is reduced as the air content is increased. 28-day strength values may be conservative and may change when various cementitious materials are used. The rate at which the 28-day strength is developed may also change.

Strength is based on 6 x 12-in. cylinders moist cured for 28 days in accordance with the sections on "Initial Curing" and "Curing of Cylinders for Checking the Adequacy of Laboratory Mixture Proportions for Strength or as the Basis for Acceptance or for Quality Control" of ASTM C 31 for Making and Curing Concrete Specimens in the Field. These are cylinders moist cured at 73.4 ± 3 F prior to testing.

The relationship in this table assumes a nominal maximum aggregate size of about 3/4 to 1 in. For a given source of aggregate, strength produced at a given w/c or w/(c + p) will increase as nominal maximum size of aggregate decreases: see Section 2.3.

Table 3.2.2.3(b)—Maximum permissible water-cement ratios for concrete in severe exposures*

| Type of structure | Structure wet continuously or frequently; exposed to freezing and thawing† | Structure exposed to sea water or sulfates |
|--|--|--|
| Thin sections (railings, curbs, sills, ledges, ornamental work) and sections with less than 1-in. cover over steel | 0.45 | 0.40‡ |
| All other structures | 0.50 | 0.45‡ |

* Based ACI 201.2R.

† Concrete should also be air entrained.

‡ If sulfate-resisting cement (Type II or Type V of ASTM C 150) is used, permissible w/c or w/(c + p) may be increased by 0.05.

Cuando finalmente se ha calculado la cantidad de cada material, se debe realizar una corrección por el contenido de agua en los agregados, para ello es necesario conocer la absorción y humedad de cada uno. La prueba de humedad se realiza el día anterior a la mezcla para que el valor no esté alejado de realidad, porque las variaciones en el clima alteran el contenido de humedad en el material y así mismo afecta de forma significativa la relación agua- cemento.

3.5. CALIDAD DEL CONCRETO

Para hacer una evaluación de la calidad del concreto que se está diseñando se deben de realizar probetas para dos ensayos, resistencia a la compresión y absorción. Las probetas que se realizaron fueron ocho por cada diseño de mezcla con dimensiones de tres pulgadas de diámetro (7.62 cm) y seis pulgadas de altura (15.24 cm). Se toman tres probetas para ensayar a la edad de 7 días compresión y una para absorción, e igualmente se ensaya la misma cantidad a la edad de 28 días. Para la realización de estas se llena la formaleta en tres capas, siendo cada una apisonada 25 veces y se enrasa en el borde con un poquito de cemento para

que quede con una superficie lisa, y garantizar un buen contacto con la máquina para el ensayo de compresión.

Las probetas se desencofran a las 24 horas y se sumergen en una piscina llena de agua con cal para el curado del concreto. Las probetas quedan sumergidas hasta el día del ensayo, estas se sacan dos o tres horas antes del ensayo y se dejan secar a temperatura ambiente; previo al ensayo se le toma a cada una el peso y las medidas de sus dimensiones. (NTC 550, 2000).

3.5.1. ASENTAMIENTO

Este ensayo se realiza al concreto una vez se ha terminado de mezclar para definir si la calidad de este está dentro del valor de asentamiento con el que se diseña la mezcla. Se utiliza un cono de Abraham y una barra de 5/8", el cono se llena en tres capas de igual volumen, y cada una de estas se apisona 25 veces, una vez se llene por completo el cono se enraza y se desmolda. El cono se pone al lado de la mezcla y la barra se ubica en su parte superior; posteriormente, se mide con un flexómetro en ambos extremos el valor del asentamiento hasta el centro de la barra (NTC 396, 1992).

3.5.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Por cada diseño de mezcla se ensayaron tres probetas por edad, se decidió ensayarlas a la edad de 7 y 28 días, para tener un valor inicial que cumpliera la resistencia que se buscaba, y el valor final de la resistencia. Se toma el registro de la fuerza máxima que soporta la probeta hasta el fallo (NTC 673, 2010).

3.5.3. ABSORCIÓN

En este ensayo se toma la probeta y se parte en tres partes, obteniendo tres muestras de tres pulgadas de diámetro (7.62 cm) y dos pulgadas de altura (5cm). Se introducen en un horno durante aproximadamente 24 horas a una temperatura de 110 ° C, obteniendo así su peso seco. Posteriormente se sumergen 48 horas en agua para obtener su peso saturado. Según la norma también se debe determinar el peso saturado después de hervir, para ello se sumergen las probetas en una olla con agua y se ponen a hervir durante 5 horas, seguido de esto, se le seca la humedad superficial y se pesa. Ya para finalizar, se toma el peso saturado sumergido, las probetas se suspenden en agua con una canastilla y se pesan. Con el valor de los pesos anteriormente mencionados se calcula el porcentaje de absorción y de vacíos del concreto con las ecuaciones (NTC 5653, 2008)

$$\% \text{ Absorción} = \frac{C-A}{A} \times 100 \quad (6)$$

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{g2-g1}{g2} \quad (7)$$

Dónde C= masa en gramos de la muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión y hervido, A= masa en gramos de la muestra seco al horno, ρ_1 = densidad seca, ρ_2 = densidad aparente.

$$D_{seca} = \frac{A}{C-D} \rho \quad (8)$$

$$D_{apar} = \frac{A}{A-D} \rho \quad (9)$$

Dónde D= masa en gramos de la muestra sumergida después de inmersión y hervido.

3.5.4. DURABILIDAD

Los factores que más resaltan y tienen influencia en la durabilidad de un concreto son tanto externos como internos. Para poder definir si el concreto que se fabricó tiene características que garantizaran su durabilidad se evalúan la permeabilidad del concreto fabricado, la resistencia a sulfatos y al desgaste de los agregados gruesos, tanto reciclado como natural.

PERMEABILIDAD

Para la permeabilidad se realizaron dos probetas de tres pulgadas (7,62 cm) de diámetro y seis pulgadas (15 cm) de altura para ensayar a los 28 días. Se introducen las probetas en el horno a 60 °C durante 24 horas para secar el concreto. Seguido a cada una se le pega un tubo de PVC de media pulgada de diámetro y con una longitud de seis centímetros. El tubo se pega a la probeta con silicona y además se impregna el concreto por los laterales y la parte superior con Acronal para evitar la fuga de agua. Una vez esta seca la silicona y el Acronal, el tubo de PVC se llena de agua y se toma un peso cada lapso definido para definir la cantidad de agua que se infiltra. Para determinar el coeficiente de permeabilidad K, se usa la ley de Darcy:

$$V = M \cdot t \quad (10)$$

Dónde, V es el volumen del agua infiltrada, t el tiempo con que se toma cada peso, y M es la pendiente de la curva obtenida al graficar el volumen en función del tiempo, la cual equivale a la constante $K \cdot A \cdot i$. Dónde A es el área de la sección de la probeta de concreto, e i el gradiente hidráulico. Con esto, se tiene que el coeficiente de permeabilidad K se halla al dividir la pendiente M de la curva Volumen V vs Tiempo T por $A \cdot i$.

RESISTENCIA A LOS SULFATOS

Para definir la resistencia a los sulfatos de los agregados, se toma los ensayos descritos en la NTC 126, esta establece que los agregados son sometidos a inmersión repetida en una solución saturada de sulfatos de magnesio o sodio, seguidamente del secado en un horno para la deshidratación de estas sales absorbidas por los poros del material. Al repetir la inmersión se rehidratan estas sales, lo cual genera una fuerza expansiva que simula la acción del agua al congelarse.

La solución saturada de sulfato tanto de sodio y magnesio se debe dejar reposando alrededor de 48 horas luego de preparada y tapada, una proporción de 250 gramos de sal anhidra o 700 gramos de sal decahidratada por cada litro de agua, es suficiente para la saturación con

sodio; y una proporción de 350 gramos de sal anhidra o 1230 de sal decahidratada es suficiente para la saturación con magnesio. Se repite el número de ciclos hasta que la masa del material sea constante, que es cuando la pérdida de masa es menor al 0,1 %. El porcentaje de pérdida del material permitido es diferente para el agregado grueso y el fino.

DESGASTE

Para determinar el desgaste de los agregados gruesos se realiza la prueba establecida en la norma NTC 98 (93), la cual mide el desgaste del agregado por medio de la abrasión, impacto, y trituración. El material se introduce en un tambor de acero rotatorio con un número específico de esferas metálicas, que depende de la distribución granulométrica del material a ensayar (máquina de los Ángeles). El efecto impacto-trituración sucede debido a una pestaña que recoge el material junto a las esferas, arrastrando todo esto hasta llevarlo cayendo hacia el lado opuesto del tambor. Luego ruedan hasta el interior del tambor recibiendo una acción de abrasión trituración, seguido las pestañas recogen el material y se repite el ciclo. El número de ciclos es de 500. Una vez terminado este proceso se recoge el material, se tamiza y se calculan los porcentajes de pérdida.

REQUISITOS PARA CONDICIONES ESPECIALES DE EXPOSICIÓN

Para definir una relación agua/cemento que cumpla los requerimientos mínimos para la durabilidad del concreto, se consultan con la Tabla 6 y la Tabla 7.

Tabla 6. Requisitos para concretos expuesto a condiciones especiales.

Fuente: Código Colombiano de construcciones sismo-resistentes. Decreto 1400 de 1984.

| CONDICIONES DE EXPOSICIÓN | MÁXIMA RELACION AGUA / CEMENTO |
|---|--------------------------------|
| Concreto que debe ser permeable: | |
| a. Expuesto a agua dulce | 0,50 |
| b. Expuesto a agua salina | 0,45 |
| Para la protección del concreto reforzado expuesto al agua salina o a ser salpicado por agua salina | 0,40 |

Tabla 7. Requisitos para concretos expuesto a soluciones que contienen sulfatos.

Fuente: Código Colombiano de construcciones sismo-resistentes. Decreto 1400 de 1984.

| EXPOSICIÓN AL SULFATO | SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (SO ₄) EN EL SUELO, PORCENTAJE EN MASA | SULFATOS (SO ₄) EN EL AGUA EN PARTES POR MILLÓN | TIPO DE CEMENTO | RELACION AGUA—CEMENTO MÁXIMA POR MASA |
|-----------------------|--|---|-----------------|---------------------------------------|
| Despreciable | 0,00 a 0,10 | 0 a 150 | ----- | ----- |
| Moderada | 0,10 a 0,20 | 150 a 1500 | 2, 1-P | 0,50 |
| Severa | 0,20 a 2,00 | 1500 a 10000 | 5 | 0,45 |
| Muy severa | Mas de 2,00 | Mas de 10000 | 5 con puzol. | 0,45 |

Tabla 8. Valores máximos de relación A/C para diferentes tipos de estructuras y grados de exposición.
Fuente: Manual de dosificación de mezclas de concreto. Medellín, Colombia (1974)

| TIPO DE ESTRUCTURA | CONDICIONES DE EXPOSICION | | |
|---|--|---|--------------|
| | Número Superior. Clima severo, bastante variación de temperatura ++. | | |
| | Número inferior. Clima Suave, lluvioso o seco | | |
| EN EL AIRE | Concreto en el agua o al alcance de niveles oscilantes de agua. | | |
| | Agua dulce | Agua salada o en contacto con sulfato + | |
| Secciones delgadas concreto ornamental, pilotes reforzados, tuberías. | 0.49 0.53 | 0.44 0.49 | 0.40 0.40 |
| Secciones con recubrimiento menores de 2,5 cm. | | | |
| Secciones moderadas como muros de contención, estribos, pilas, vigas. | 0.53 * | 0.49 0.53 | 0.44 0.44 |
| Partes exteriores de estructuras masivas. | 0.57 -- | 0.49 0.53 | 0.44 0.44 |
| Concreto depositado a presión bajo el agua. | -- -- | 0.44 0.44 | 0.44 0.44 |
| Losa sobre el piso | 0.53 * | -- -- | -- -- |
| Concreto protegido contra la meteorización, interior de edificios, concreto en el subsuelo. | * * | -- -- | -- -- |

++ : Debe tratar de usarse aire incorporado.
* : Las relaciones A/C deben seleccionarse con base en los requisitos de resistencia.
+ : Para concentraciones de sulfatos mayores de 0,2% del suelo o del agua.

3.6. TUBOS DE CONCRETO

La evaluación de la calidad de los tubos se hace bajo los parámetros estipulados en la NTC 3676, Métodos de ensayos para tubos y secciones de pozos de inspección prefabricados en concretos. La resistencia de aplastamiento de los tubos se define basándose en tres tipos de clases, como se observa en la *Tabla 9*.

Tabla 9. Requisitos físicos y dimensionales de los tubos de concreto sin refuerzo

| Diámetro nominal interno, mm | Clase 1 | | Clase 2 | | Clase 3 | |
|------------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|
| | Espesor mínimo de pared, mm | Resistencia mínima, KN/m. Método de los tres apoyos | Espesor mínimo de pared, mm | Resistencia mínima, KN/m. Método de los tres apoyos | Espesor mínimo de pared, mm | Resistencia mínima, KN/m. Método de los tres apoyos |
| 100 | 16 | 22 | 19 | 29 | 19 | 35 |

| | | | | | | |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| 150 | 16 | 22 | 19 | 29 | 22 | 35 |
| 200 | 19 | 22 | 22 | 29 | 29 | 35 |
| 250 | 22 | 23,5 | 25 | 29 | 32 | 35 |
| 300 | 25 | 26,5 | 35 | 33 | 44 | 38 |
| 350 | 30 | 28 | 39 | 35 | 47 | 41 |
| 400 | 34 | 30 | 44 | 40 | 50 | 44 |
| 450 | 38 | 32 | 50 | 44 | 57 | 48 |
| 500 | 42 | 33 | 55 | 47 | 65 | 53,5 |
| 600 | 54 | 38 | 72 | 52,5 | 85 | 64 |
| 700 | 84 | 42 | 98 | 59 | 98 | 68 |
| 750 | 88 | 44 | 107 | 63 | 107 | 69,5 |
| 800 | 92 | 45 | 111 | 64 | 111 | 71 |
| 900 | 100 | 48 | 119 | 65,5 | 119 | 73 |
| 1000 | 90 | 51 | 127 | 67 | 127 | 75 |

Para la fabricación de los tubos se usó un agregado de río, el cual es el mismo que se usa en la empresa Aljibes para sus tubos. Además, como se indicó anteriormente el diseño de mezcla se basó en reemplazar un porcentaje del agregado natural grueso con concreto reciclado triturado de uno de los tubos que producen en la empresa. El porcentaje óptimo de reemplazo definido previamente (Ortiz Vargas & Burbano, 2017) fue del 30 %. La empresa hizo el préstamo de dos formaletas de tubos de 12 pulgadas, por lo que primero se hizo un tubo y al día siguiente al desencofrar el primer tubo se hicieron los dos restantes.

Puesto que el agregado natural usado y el cemento era el mismo que el empleado para la fabricación de las probetas, se utilizó el mismo diseño de mezcla. Se tomó una muestra de los agregados naturales en las condiciones de almacenamiento el día anterior de la fabricación de los tubos para realizar el cálculo de humedad, y así definir la corrección por humedad en el diseño de mezcla.

Una vez armada la formaleta esta se cubre con aceite quemado para facilitar el desencofrado de los tubos. Posteriormente se pesan las dosificaciones de todos los agregados, el agua, y el cemento, finalmente, se procede a realizar la mezcla en el trompo; una vez terminado el proceso de mezclado se toma el ensayo del cono de Abraham para definir si la mezcla está en el rango adecuado de asentamiento.

Posteriormente, se pone la mezcla en la formaleta en tres capas y se apisona con una barra metálica plana, y por fuera de la formaleta se dan pequeños golpes con una porra para ayudar a la compactación del concreto.

También se toma una muestra del concreto en ocho probetas de tres pulgadas de diámetro y seis pulgadas de altura, para confirmar la resistencia del concreto fundido y la absorción de este mismo.

Una vez desencofrados los tubos, estos se recubrieron con un plástico y se les regaba con agua dos veces al día en la mañana y en la tarde hasta cumplir los 28 días. Las probetas se sumergieron en una solución de agua con cal hasta el día que se usaron para los respectivos ensayos.

3.7. ANALISIS DE COSTOS

En este análisis se hará el cálculo y la comparación de los costos que conllevan las pérdidas de la empresa por tubos con defectuosos, sean estos reparables o desechados; y los costos de la producción de un tubo de concreto con agregado reciclado, siendo el agregado reciclado concreto triturado de los tubos defectuosos.

Para el cálculo de los costos por pérdidas de tubos defectuosos se toma el costo por administración, reparación, lucro cesante, disposición final de desechos (que incluye el transporte), almacenamiento y posibles multas ambientales por mal manejo de escombros. Para el cálculo de los costos de la producción de tubo con concreto reciclado se toma en cuenta la inversión en equipo, mano de obra, infraestructura, los costos que generan el proceso de realizar tubería nueva con concreto reciclado a partir de tubería dañada y su debido proceso de pretratamiento.

Este análisis se hace con el fin de determinar si la inversión en el proceso de la recuperación de los tubos dañados es económicamente viable para la empresa, teniendo en cuenta que esta hace la producción de forma artesanal.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Los agregados gruesos y finos, ya sean agregados naturales o reciclados, junto con el agua y el cemento conforman los ingredientes necesarios para la fabricación de concreto, aportando en la estructura resistente de este y convirtiéndose en materiales esenciales de la producción del concreto.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la granulometría, absorción, densidad, impurezas orgánicas, peso unitario compacto y suelto; con estas propiedades se logra establecer la caracterización de los agregados naturales y reciclados a utilizar.

4.1.1. GRANULOMETRÍA:

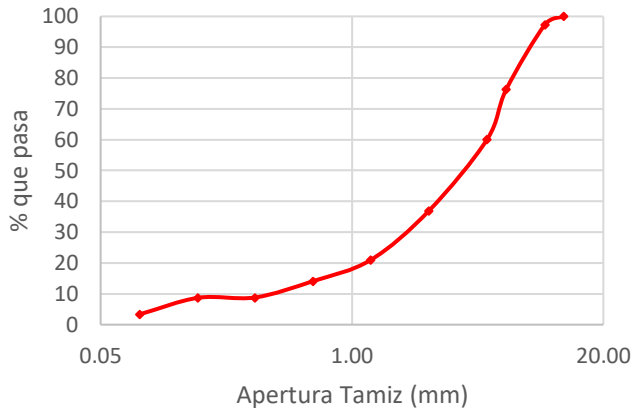
Se presentan los análisis granulométricos para el agregado natural, agregado reciclado y agregado con porcentaje de reemplazo del 30 %.

Tabla 10. Granulometría de agregado natural

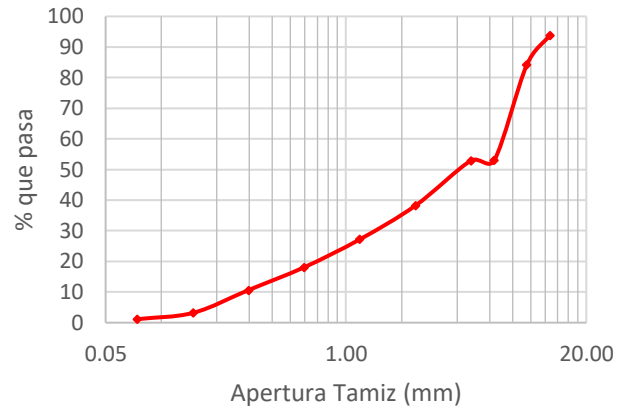
| Tamiz | Peso (g) | % retenido | % que pasa |
|-------|----------|------------|------------|
| 1/2 | 0 | 0 | 100 |
| 3/8 | 26 | 2,6 | 97,4 |
| 1/4 | 209,8 | 20,98 | 76,42 |
| 4 | 163,8 | 16,38 | 60,04 |
| 8 | 231,3 | 23,13 | 36,91 |
| 16 | 159,3 | 15,93 | 20,98 |
| 30 | 68,5 | 6,85 | 14,13 |
| 50 | 53,1 | 5,31 | 8,82 |
| 100 | 1 | 0,1 | 8,72 |
| 200 | 53,3 | 5,33 | 3,39 |
| Fino | 29,5 | 2,95 | 0,44 |

Tabla 11. Granulometría de agregado reciclado

| Tamiz | Peso (g) | % retenido | % que pasa |
|-------|----------|------------|------------|
| 1/2 | 67,8 | 6,78 | 93,22 |
| 3/8 | 71,7 | 7,17 | 86,05 |
| 1/4 | 144,9 | 14,49 | 71,56 |
| 4 | 60,5 | 6,05 | 65,51 |
| 8 | 136 | 13,6 | 51,91 |
| 16 | 134,2 | 13,42 | 38,49 |
| 30 | 116 | 11,6 | 26,89 |
| 50 | 99,7 | 9,97 | 16,92 |
| 100 | 108,5 | 10,85 | 6,07 |
| 200 | 37,3 | 3,73 | 2,34 |
| Fino | 20 | 2 | 0,34 |



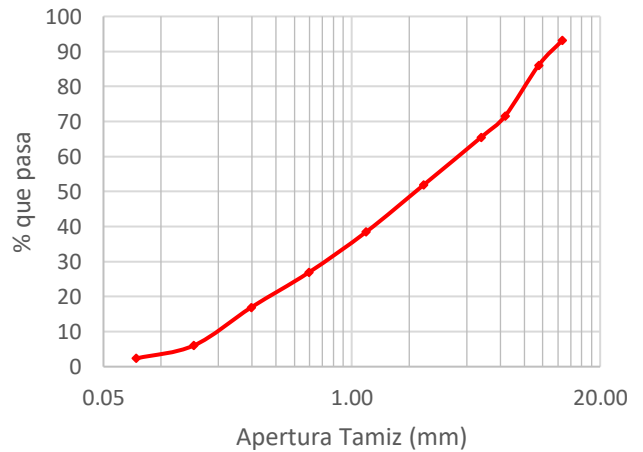
Gráfica 1. Curva Granulométrica Agregado Natural



Gráfica 2. Curva Granulométrica Agregado Reciclado

Tabla 12. Granulometría de agregado con 30 % de reemplazo

| Tamiz | Peso (g) | % retenido | % que pasa |
|-------|----------|------------|------------|
| 1/2 | 61,9 | 6,19% | 93,81% |
| 3/8 | 96,4 | 9,64% | 84,17% |
| 1/4 | 311,5 | 31,15% | 53,02% |
| 4 | 0,7 | 0,07% | 52,95% |
| 8 | 147,1 | 14,71% | 38,24% |
| 16 | 110,2 | 11,02% | 27,22% |
| 30 | 91,2 | 9,12% | 18,10% |
| 50 | 74,5 | 7,45% | 10,65% |
| 100 | 74,4 | 7,44% | 3,21% |
| 200 | 20,8 | 2,08% | 1,13% |
| Fino | 10 | 1,00% | 0,13% |



Gráfica 3. Curva Granulométrica agregado con 30 % de reemplazo

4.1.2. DENSIDAD Y ABSORCIÓN

En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de absorción y de densidad de los agregados naturales, reciclados y con el reemplazo del 30 % de agregado grueso.

Tabla 13. Densidad y absorción de agregados

| DATOS | ARENA | GRUESO NATURAL | GRUESO RECICLADO | GRUESO REEMPLAZO 30 % |
|---------------------------------|-------|----------------|------------------|-----------------------|
| DAPARENTE (gr/cm ³) | 1.93 | 1.96 | 1.78 | 1,93 |
| DNOMINAL (gr/cm ³) | 2.73 | 2.03 | 2.28 | 2,07 |
| Absorción (%) | 4.19 | 1.78 | 12.36 | 3,54 |

4.1.3. IMPUREZAS ORGÁNICAS

Se realiza la prueba bajo la norma NTC 127, y se obtiene que el color del agua es aproximadamente el No. 2 de la tabla, Ver Figura 11.



Figura 11. Impurezas orgánicas de agregado fino

4.1.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados previos presentados de los agregados a utilizar se establece que estos cumplen con los estándares mínimos para usarse en un concreto y aportar positivamente en la calidad de este.

Para evitar el uso excesivo de cemento es importante tener una granulometría corrida de los agregados, lo cual implica que los espacios dejados por las piedras grandes sean ocupados por los tamaños menores subsiguientes. Para esto es importante definir el módulo de finura, el cual no deberá ser menor a 2.3 ni mayor a 3.1 para el agregado fino. Usando la siguiente ecuación se obtiene este módulo (MF).

$$MF = \frac{\% \text{retenido acumulado}}{100} \quad (11)$$

De la ecuación anterior se tiene que el módulo MF es de 3,17. Por lo que el agregado fino está un 2 % por encima del límite superior recomendado para este.

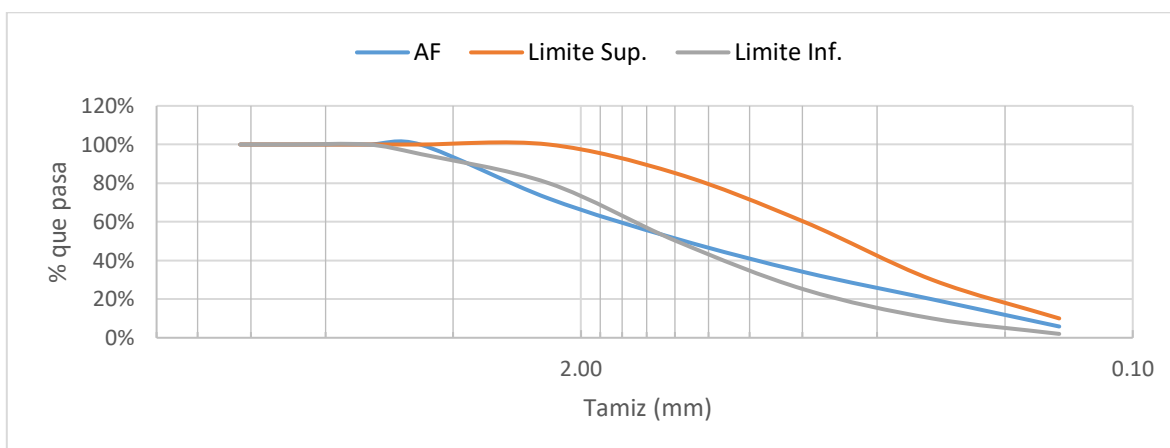
En la Gráfica 4 se presenta la distribución granulométrica con base en la Tabla 14; se observa que la distribución del agregado fino natural está por fuera de los límites que se recomienda

en la ASTM C-33, por lo que este agregado tendrá unas implicaciones un poco desfavorables en la fabricación del concreto, pero cabe resaltar que aunque no cumplan con estas, no se encuentran muy alejadas tampoco.

Tabla 14. Requerimiento de granulometría del agregado fino para concreto.

Fuente: ASTM C-33

| Tamiz | | Porcientos pasado recomendado |
|-------|---------|-------------------------------|
| Mm | Pulg. | |
| 9.51 | 3/8" | 100 |
| 4.76 | N.º 4 | 95-100 |
| 2.38 | N.º 8 | 80-100 |
| 1.19 | N.º 16 | 50-85 |
| 0.595 | N.º 30 | 25-60 |
| 0.297 | N.º 50 | 10-30 |
| 0.149 | N.º 100 | 2-10 |



Gráfica 4. Distribución granulométrica del agregado fino

Por otra parte, la norma inglesa establece que el agregado reciclado a partir de concreto, tienen como límite un porcentaje de finos del 5 %, observando los resultados de la Tabla 11, se establece que los valores de este agregado están dentro de los límites, con un valor de 2 %.

Observando la Tabla 13 se establece que la densidad del agregado fino, el grueso y el grueso con el reemplazo son muy parecidos, están en 1.93, 1.96, y 1.93 kg/cm³ respectivamente; esto significa que el porcentaje de reemplazo del agregado grueso reciclado no genera un impacto significativo en esta característica; lo que es caso contrario en la absorción, puesto que esta se duplica aproximadamente, para el agregado fino, el grueso y el grueso con reemplazo se tienen valores de 4.19, 1.78 y 3.54 % respectivamente; que es algo de esperarse, puesto que el agregado grueso reciclado es un concreto triturado con mortero adherido, el cual como se ha expuesto anteriormente es muy poroso y absorbente.

Por lo general la densidad de los materiales pétreos oscila entre los valores de 2.3 y 2.8 kg/cm³, lo que depende de la roca de origen. Encontramos que los agregados usados para el concreto se encuentran por debajo de este rango, clasificándose así como un agregado normal (Neville, 1999), con una densidad desde 1.3g/cm³.

4.2. SELECCIÓN PRETRATAMIENTOS

Para seleccionar el pretratamiento se realiza la prueba de absorción a los agregados después de ser sometidos a cada proceso seleccionado para evaluar y se comparan los resultados, en este caso se implementaron procesos que tienen que ver con el recubrimiento del agregado para darle una capa superficial que pueda sellar los poros generados por el mortero añadido.

Puesto que el otro pretratamiento a evaluar consiste en una pre saturación del agregado pocos minutos antes de hacer la mezcla, a este no se le hizo ninguna prueba de absorción, sino que sus resultados se evaluaron directamente de las probetas de concreto fabricadas con este agregado pre saturado.

En la Tabla 15 se presentan los resultados de absorción por cada uno de los procedimientos realizados, y un valor de absorción de referencia del concreto sin ningún pre tratamiento.

Tabla 15. Absorción de Agregado reciclado con proceso de pretratamiento.

| | Concentración | | |
|-----------------------|---------------|----------|---------|
| | Solución (%) | Tiempo | ABS (%) |
| Sin Pretratamiento | - | - | 12,36 |
| Silicato de Sodio | 20 | 5 min | 11,34 |
| Polivinilo de alcohol | 10 | 48 horas | 12,36 |
| Acronal | 5 | 10 min | 11,84 |
| | | 20 min | 12,50 |
| | 10 | 20 min | 11,75 |
| | | 15 | 10 min |
| | | 20 min | 11,17 |
| | 20 | 10 min | 11,34 |

4.2.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La diferencia en la absorción entre los diferentes pretratamientos usados es mínima; con respecto al valor de referencia, encontramos que la diferencia mayor en una relación del valor de referencia sobre el valor del pretratamiento es del 111 % y la menor del 100 %, siendo estas la inmersión en Acronal al 15 % durante 20 min y en Polivinilo del alcohol respectivamente. Lo que significa que estos tipos de procesos no tienen mayor impacto en la absorción del agregado tratado. Con base en los resultados presentados en la Tabla 15 se selecciona el pre tratamiento de impregnación con Acronal del 15 % durante 20 minutos.

4.3. DISEÑO DE MEZCLA

4.3.1. PESOS UNITARIOS

Este ensayo determina una característica que se usa para calcular las cantidades de los agregados necesarios en el diseño de la mezcla del concreto. En la Tabla 16 se presentan los resultados para los cuatro tipos de agregados que se manejaron, lo cuales se obtuvieron según el proceso descrito en apartado anterior, metodología.

Tabla 16. Pesos unitarios de agregados.

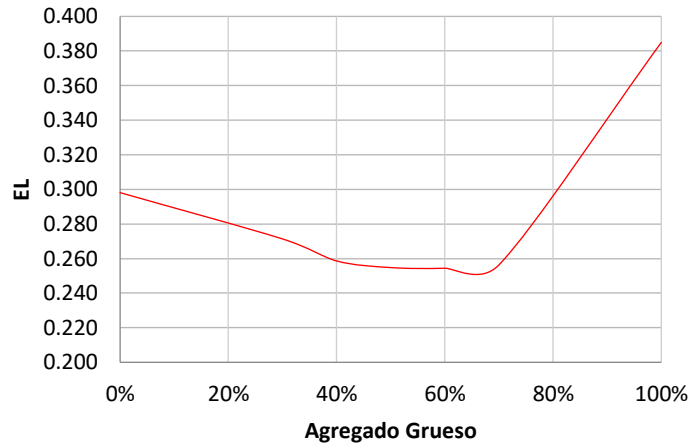
| | FINO NATURAL | GRUESO NATURAL | GRUESO RECICLADO | GRUESO REEEMPLAZO 30 % |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------|---------------------|------------------------------|
| PESO UNITARIO SUELTO gr/cm^3 | 1.54 | 1.62 | 1.12 | 1.46 |
| PESO UNITARIO COMPACTADO gr/cm^3 | 1.66 | 1.75 | 1.19 | 1.68 |

4.3.2. ESPACIOS LIBRES

Se realiza el cálculo de los espacios libres usando el agregado natural con un 30 % de reemplazo del reciclado, ya que el concreto que se fabricara con este. En la Tabla 17 y la Gráfica 5 se presentan los resultados de este ensayo.

Tabla 17. Espacios libres del agregado con el 30 % de reemplazo y el agregado fino.

| DOSIFICACION | | PESO CON AGREGADO | PESO AGREGADO + AGUA | PESO ESPACIOS LIBRES | % ESPACIOS LIBRES |
|--------------|-------|----------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| GRAVA | ARENA | | | | |
| 100% | 0% | 1144,8 | 1447 | 302,2 | 0,385 |
| 70% | 30% | 1328,8 | 1530 | 201,2 | 0,254 |
| 60% | 40% | 1349,3 | 1549 | 199,7 | 0,256 |
| 50% | 50% | 1369 | 1569 | 200 | 0,255 |
| 40% | 60% | 1387 | 1590 | 203 | 0,259 |
| 30% | 70% | 1347 | 1560 | 213 | 0,271 |
| 0% | 100% | 1253 | 1487 | 234 | 0,298 |

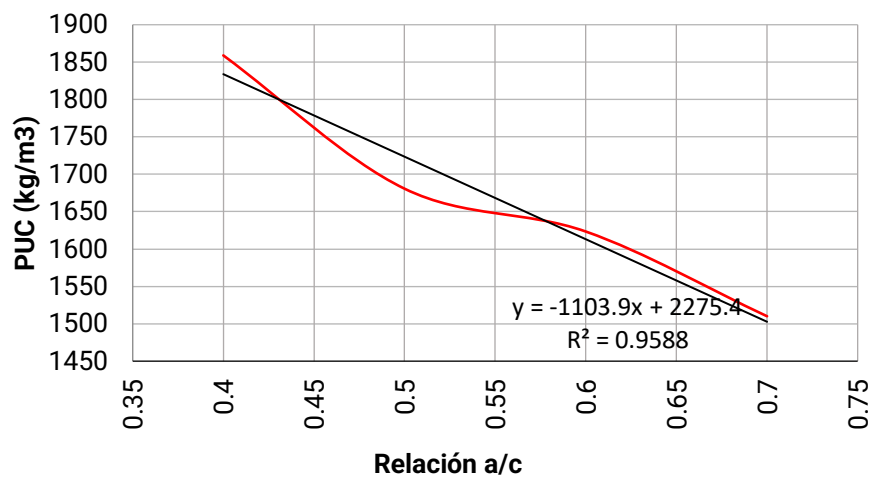


Gráfica 5. Espacios Libres.

Ya que el uso de agregado reciclado disminuye considerablemente la resistencia mecánica, se toma un porcentaje menor de arena para disminuir la cantidad de pasta necesaria para envolver las partículas y así mismo disminuir el coste y la afectación de mayor uso de pasta en la resistencia del concreto (García Pérez, 2004). Aunque el porcentaje más recomendable es uno de 60 – 40 %, se define que el porcentaje óptimo para el diseño de la mezcla es la relación 70 % agregado grueso y 30 % agregado fino por lo expuesto anteriormente.

4.3.3. DOSIFICACIÓN

Una vez con los datos de los pesos unitarios del agregado y los espacios libres a usar en la mezcla, se debe realizar el cálculo de pesos unitarios compactados (P.U.C.) de la pasta variando las dosificaciones de agua y cemento, para así, definir el valor del peso unitario de la pasta con respecto a la relación a/c que se usa en el diseño de mezcla, en este caso, es de 42 %. En la Gráfica 6 se presenta la línea de tendencia y su fórmula, con la cual se halla el valor del P.U.C. de la pasta, que en este caso corresponde a 1811,76 kg/cm^3 .



Gráfica 6. Peso compacto de la pasta.

Una vez calculados los pesos unitarios de todos los componentes y definido el valor de la relación a/c se procede a realizar el cálculo de las cantidades de cada mezcla. En la Tabla 18 se presentan las dosificaciones para cada una de las mezclas que se realizaron por metro cubico (m^3), en el Anexo D se presenta de forma más detallada cada diseño de mezcla. Cabe resaltar que se realizó una dosificación para el volumen de 6 probetas de forma cilíndrica con altura de 15 cm y diámetro 7.6 cm, y la prueba del Cono de Abrams, dando un volumen de 15193.72 cm^3 .

Tabla 18. Dosificaciones para cada diseño de mezcla por metro cubico m^3 .

| COMPONENTE | M1 | M 2 Y 3 | M4 |
|------------------------------------|-----------|----------------|-----------|
| Agua (Kg) | 161,73 | 157,98 | 157,98 |
| Cemento (Kg) | 385,08 | 376,14 | 376,14 |
| Agregado Grueso con reemplazo (Kg) | 651,48 | 651,48 | 651,48 |
| Agregado Grueso reciclado (Kg) | 195,44 | 195,44 | 195,44 |
| Agregado Fino (Kg) | 458,12 | 458,12 | 458,12 |

Dónde la M1 es la mezcla del concreto reciclado con agregados sin ningún pre tratamiento, M2 es la mezcla de concreto con agregado pre saturado durante cinco minutos, M3 es la mezcla de concreto con agregado impregnado de Acronal y M4 es la mezcla de concreto con agregado pre saturado durante diez minutos.

4.3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al observar las dosificaciones de la Tabla 18, la variación de las cantidades sucede debido a la variación del agua y el cemento, puesto que las condiciones de humedad cambian. Una vez se desencofraba al siguiente día, los cilindros se introducían en una piscina para el curado, hasta el día que se les realizaba las pruebas de resistencia a la compresión y de absorción.

4.4. CALIDAD DEL CONCRETO

Para evaluar la calidad del concreto se realizaron los ensayos que determinan el asentamiento del concreto fresco, la resistencia a compresión, la absorción y la durabilidad.

4.4.1. ASENTAMIENTO

Esta prueba se toma el mismo día que se realizan los cilindros por cada tipo de mezcla con el fin de garantizar la resistencia del concreto fabricado, en la Tabla 19 se presentan los resultados de cada uno de los diseños realizados, los cuales se encuentran dentro del rango del diseño, de 2.0 cm a 5.0 cm.



Figura 12. Asentamiento de concreto con agregados con pretratamiento

Tabla 19. Asentamiento de concretos.

| | <u>Slump (cm)</u> |
|-----------|-------------------|
| M1 | 2,5 |
| M2 | 4,75 |
| M3 | 5 |
| M4 | 2,5 |

4.4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Para cada una de las mezclas se hicieron 8 probetas, de las cuales seis se usaron para definir la resistencia a compresión, con tres probetas a la edad de 7 días y tres probetas a la edad de 28 días. A cada espécimen se le toman las dimensiones y pesos. En la Tabla 20 se presentan los resultados de las resistencias. En la siguiente figura se observa que la falla del

cilindro fue a cortante por lo en esta prueba hizo falta capping o unas mejores placas de neopreno. Ver Anexo D, para encontrar de forma más detallada la falla de cada probeta.

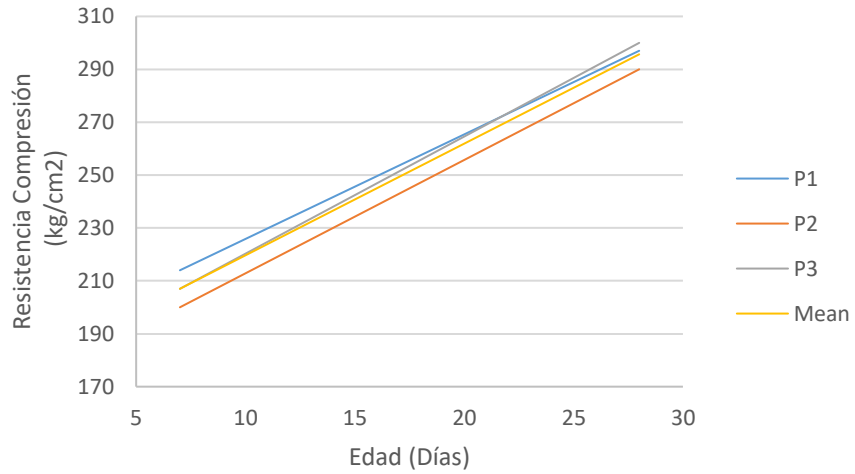


Figura 13. Ensayo a compresión de probetas de concreto con agregados con pretratamiento

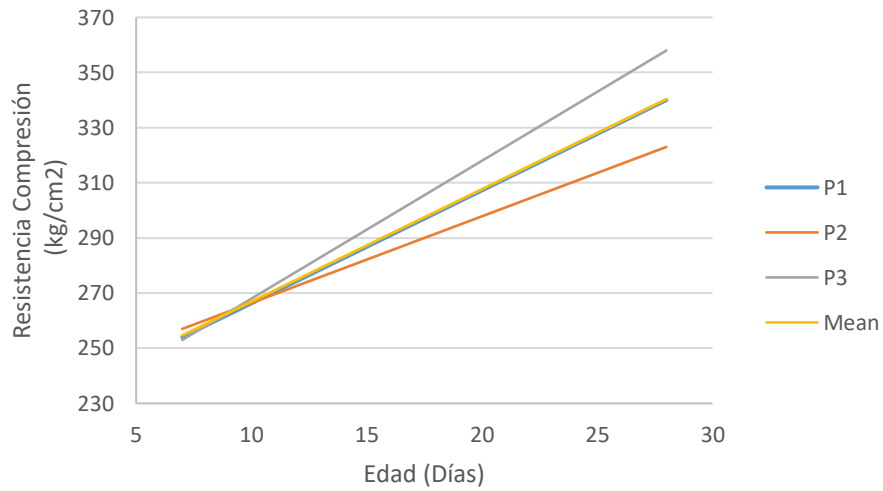
Tabla 20. Resistencia de los tipos de Mezcla.

| No | PRETRATAMIENTO | 7 días | | | Promedio (Kg/cm ²) | 28 días | | | Promedio (Kg/cm ²) |
|----|----------------|-----------------------|-----|-----|-----------------------------------|-----------------------|-----|-----|-----------------------------------|
| | | (Kg/cm ²) | | | | (Kg/cm ²) | | | |
| M1 | REFERENCIA | 214 | 200 | 207 | 207 | 297 | 290 | 300 | 296 |
| M2 | PRESOAK 5 min | 254 | 257 | 253 | 255 | 340 | 323 | 358 | 340 |
| M3 | ACRONAL | 284 | 290 | 282 | 285 | 334 | 349 | 347 | 343 |
| M4 | PRESOAK 10 min | 220 | 231 | 226 | 226 | 338 | 322 | 328 | 329 |

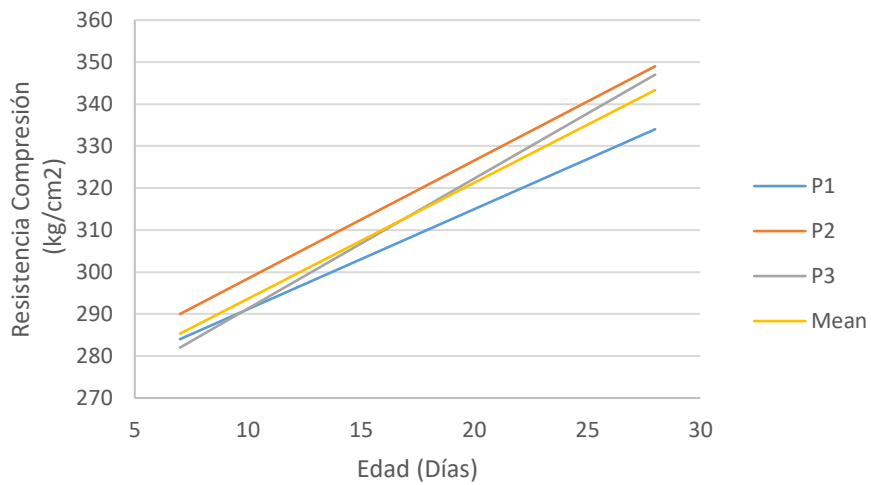
Los resultados anteriores presentados desde la Gráfica 7 a la Gráfica 10, muestran que todas las mezclas alcanzaron la resistencia mínima de diseño de 280 kg/cm². El valor menor de resistencia corresponde a la muestra M1 con 296 kg/cm², y el valor máximo es de la mezcla M3 con 343 kg/cm². Adicionalmente, se observa que la falla presentada en la probeta corresponde a cortante y no a compresión, por lo cual la resistencia del concreto seguramente era superior.



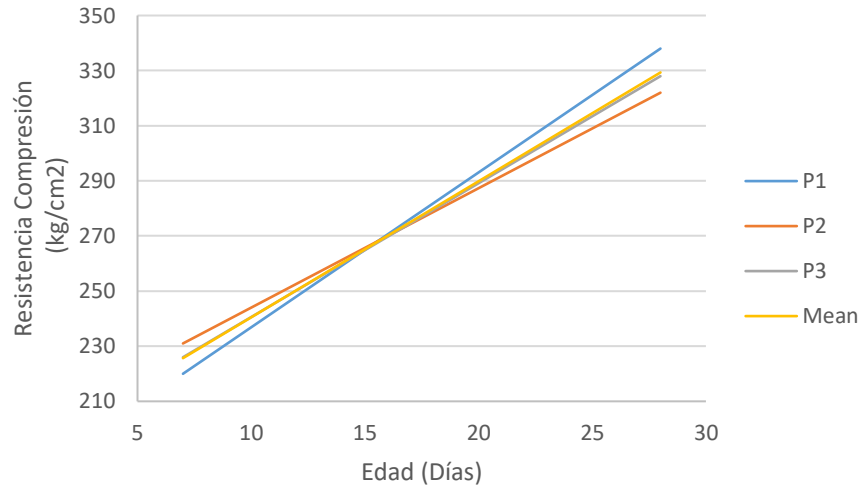
Gráfica 7. Resistencia a la compresión vs edad de curado Mezcla M1.



Gráfica 8. Resistencia a la compresión vs edad de curado Mezcla M2.



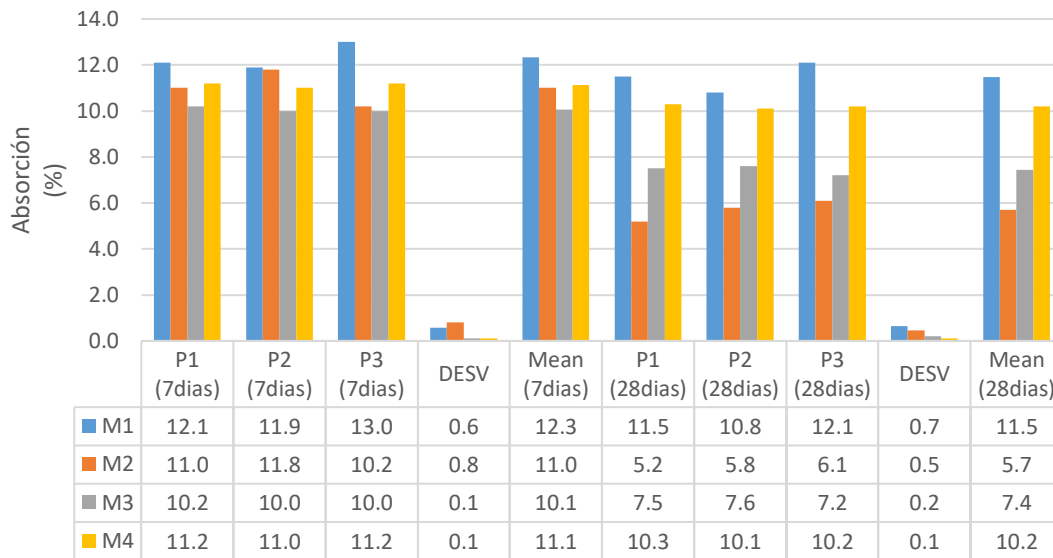
Gráfica 9. Resistencia a la compresión vs edad de curado Mezcla M3.



Gráfica 10. Resistencia a la compresión vs edad de curado Mezcla M4.

4.4.3. ABSORCIÓN

Cada ensayo de absorción se hizo con una probeta que se cortó en tres pedazos para obtener un valor promedio más confiable. Como se ve en la *Gráfica 11* las mezclas M2 y M3 presentaron una absorción por debajo del 9 %, que es el valor que estipula la NTC 3676 como máximo.



Gráfica 11. Absorción del Tipo de Mezclas.

4.4.4. DURABILIDAD

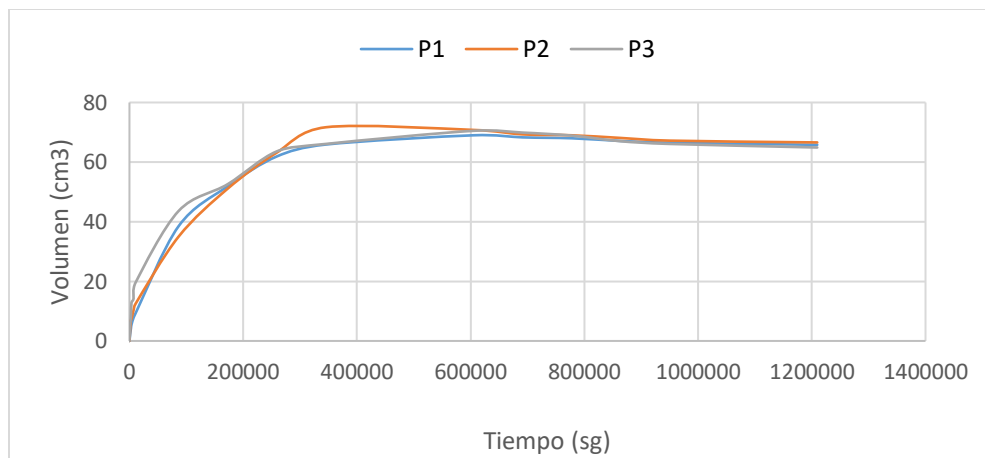
Para evaluar la durabilidad del concreto se definen características del concreto como son la permeabilidad, la resistencia a sulfatos y el desgaste.

Según la Tabla 6, la Tabla 7 y la

Tabla 8 la relación agua cemento(a/c) máxima permitida para garantizar una durabilidad del concreto, en las condiciones de la tubería de concreto que se fabricó debe ser de 0.45, 0.45 y 0.40 respectivamente; el diseño del concreto actualmente tiene una relación de 0.42, por lo que cumple la recomendación de dos de las tres tablas presentadas. Se toma esta relación con base al proyecto previamente desarrollado (Ortiz Vargas & Burbano, 2017)

PERMEABILIDAD

Siguiendo el procedimiento del ensayo detallado anteriormente en la metodología, se obtienen los resultados presentados en Gráfica 12, que corresponden a la muestra M2.



Gráfica 12. Permeabilidad Volumen Vs Tiempo

El coeficiente de permeabilidad de la mezcla M2 se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 21. Coeficiente de Permeabilidad de Mezcla M2.

| Coeficiente de Permeabilidad K (m/seg) | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| P 1 | P2 | P3 | Promedio |
| 1,05378E-08 | 1,04571E-08 | 9,64248E-09 | 1,02125E-08 |

DESGASTE MAQUINA DE LOS ANGELES

Para realizar esta prueba se toma una muestra de los escombros de concreto y se lleva al laboratorio Ingeomac para realizar el ensayo, en la Tabla 22 se presentan los detalles y los resultados del ensayo.

Tabla 22. Resistencia al desgaste de agregado grueso reciclado.

| | |
|--|------|
| GRADACION USADA | C |
| NUMERO DE ESFERAS | 8 |
| NUMERO DE REVOLUCIONES | 500 |
| P1: PESO MUESTRA SECA ANTES DEL ENSAYO, (gr) | 5000 |
| P2: PESO MUESTRA SECA DESPUES DEL ENSAYO, (gr) Y DESPUES DE LAVAR SOBRE TAMIZ No. 12 | 2996 |
| P1 - P2 = PÉRDIDA | 2004 |
| % DESGASTE : $\frac{P1 - P2}{P1} \times 100$ | 40,1 |
| NORMA NTC-174 | |

Para garantizar que el concreto producido por estos agregados sea de buena calidad y con una buena durabilidad se establece que la pérdida del agregado no debe ser mayor al 40 %. Observando el resultado anterior se define que la calidad del agregado grueso está fuera de los rangos permitidos, con un 40.1 % de perdida, está por encima del límite con un 0,25 %.

RESISTENCIA A LOS SULFATOS

Para realizar esta prueba se toma una muestra de los escombros de concreto y se lleva al laboratorio Ingeomac para realizar el ensayo, se realizaron cinco ciclos. En la Tabla 23 y la

Tabla 24 se presentan los resultados de este.

Tabla 23. Resistencia a los sulfatos agregado grueso reciclado.

| Descripción: | | Escombros en solución de sulfato de sodio | | | | | | |
|---|-----------|---|------------------|---------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------------|
| FRACCIÓN GRUESA | | | | | | | | |
| RECIPIENT E No. | % PASA | % RETENIDO | PESO PARCIAL (g) | % RETENIDO GRAD. ORIGINAL | PESO REAL (g) | PESO FINAL (g) | % PERDIDA REAL | % PERDIDA CORREGIDA |
| 1 | 2½" | 2" | | | | | | |
| 2 | 2" 1½" | 1½" 1" | | | | | | |
| 3 | 1" ¾" | ¾" ½" | 0 302,9 | 16,80 | 302,9 | 283,1 | 6,54 | 1,10 |
| 4 | ½" ⅜" | ⅜" N°4 | 409,5 | 51,45 | 409,5 | 392,7 | 4,10 | 2,11 |
| PERDIDA TOTAL FRACCIÓN GRUESA(%) | | | | | | | 3,21 | |

Tabla 24. Resistencia a los sulfatos fracción fina del agregado reciclado.

| FRACCIÓN FINA | | | | | | | |
|-----------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------------|
| RECIPIENT E No. | TAMIZ % PASA | TAMIZ % RETENIDO | % RETENIDO GRAD. ORIGINAL | PESO REAL (g) | PESO FINAL (g) | % PERDIDA REAL | % PERDIDA CORREGIDA |
| 1 | 4 | 8 | 12,5 | 123 | 118,5 | 3,81 | 0,48 |
| 2 | 8 | 16 | 8,50 | 131 | 119,3 | 9,21 | 0,78 |
| 3 | 16 | 30 | 9,22 | 120 | 118,4 | 1,42 | 0,13 |
| 4 | 30 | 50 | 3,50 | 109 | 95,2 | 12,50 | 0,44 |
| | | | | | | 1,83 | |

Para garantizar que el concreto producido por estos agregados sea de buena calidad y con una buena durabilidad se establece que la pérdida de agregado fino debe ser menor al 10 % en sodios y para el agregado grueso 12 %. Observando el resultado anterior se define que la calidad del agregado fino está dentro de los rangos permitidos, con un 3.21 % de pérdida. Para ver en más detalle los resultados proporcionados por el laboratorio de Ingeomac ver Anexo D.

4.4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al revisar todos los factores evaluados para definir la calidad del concreto producido se encuentran que la mayoría de diseños están dentro de los parámetros que se establecen para este tipo de elemento estructural.

El asentamiento de cada mezcla estuvo dentro de los rangos del diseño que se estableció. La resistencia a la compresión está por encima del valor mínimo requerido de 28 MPa, incluyendo el concreto de referencia con ningún proceso de pretratamiento a los agregados. Las muestras M2 y M3 cumplieron con el valor máximo permitido para la absorción del 9 %.

Basándose en los resultados de la Gráfica 11, se escoge el pretratamiento de pre saturación con agua de la Muestra M2, ya que es el concreto con menor absorción. Una vez seleccionado este diseño, se replica este diseño de concreto para evaluar su comportamiento en la tubería.

Para la durabilidad, el uso de un agregado grueso natural con reemplazo del 30 % de agregado reciclado no tiene un impacto negativo, puesto que los valores de la resistencia al desgaste y su solidez del agregado reciclado están dentro de los requerimientos que se recomiendan para los agregados (ver Tabla 22 y Tabla 23). Para definir un concreto de baja permeabilidad se tiene que el rango de la constante K debe estar entre 10^{-8} a 10^{-9} m/sg; el valor de K promedio del concreto producido con la muestra M2 se encuentra un 2.12 % (ver Tabla 21) por encima del límite superior, aunque está muy cerca del rango esto podría incidir negativamente en la durabilidad del concreto.

4.5. TUBOS DE CONCRETO

Se fundieron tres tubos de concreto para ser ensayados, uno para permeabilidad y dos para resistencia de aplastamiento, ver Figura 14. De la mezcla se tomaron ocho testigos (probetas) de 7.2 cm de diámetro y 15.4 cm de altura, esto para determinar la resistencia a compresión a las edades de 7 y 28 días con tres probetas, y dos para el ensayo de absorción.



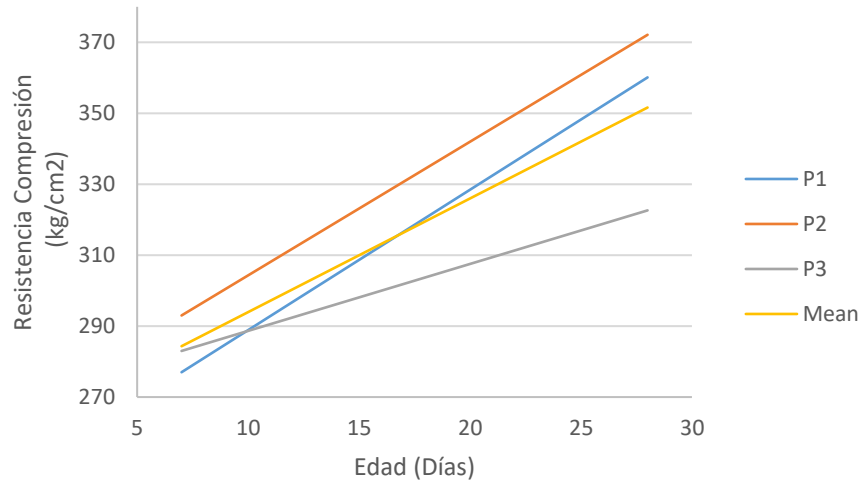
Figura 14. Tubos de concreto: concreto fresco (superior), concreto endurecido (inferior).

4.5.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

A cada probeta se les midió el diámetro y la altura. Los resultados que se presentan en la Tabla 25, muestran que el concreto de los tubos cumple con la resistencia mínima de compresión establecida en la norma de 280 kg/cm².

Tabla 25. Resistencia a la Compresión concreto de Tubos.

| 7 días (Kg/cm ²) | | | Promedio (Kg/cm ²) | Desviación estándar (Kg/cm ²) | 28 días (Kg/cm ²) | | | Promedio (Kg/cm ²) | Desviación estándar (Kg/cm ²) |
|---------------------------------|-----|-----|-----------------------------------|---|----------------------------------|-----|-----|-----------------------------------|---|
| 277 | 293 | 283 | 284 | 8,1 | 360 | 372 | 323 | 352 | 25,8 |



Gráfica 13. Resistencia a la compresión vs edad de curado de concreto de tubos.

4.5.2. ABSORCIÓN

Como se detalla en la metodología se toma un cilindro y se divide en tres partes para determinar la absorción, esto se realiza a los 7 y 28 días de edad del concreto. En la *Tabla 26* se presentan los resultados

Tabla 26. Absorción de Tubos con Mezcla de la Muestra M2

| 7 días (%) | | | | | 28 días (%) | | | | |
|---------------|-----|-----|-----------------|--------------------------|----------------|-----|-----|-----------------|--------------------------|
| | | | Promedio (%) | Desv. estándar (%) | | | | Promedio (%) | Desv. estándar (%) |
| 6,7 | 6,2 | 6,4 | 6,4 | 0,2 | 5,5 | 6,5 | 5,6 | 5,9 | 0,6 |

4.5.3. RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO

Para este ensayo se usaron dos tubos de 42 cm (12 pulgadas) de diámetro interno y con 6 cm de espesor de la pared. Por lo que según la *Tabla 9* es un tubo de categoría 3, para el cual está establecido que la resistencia mínima por aplastamiento debe ser de 38 KN/m.

Para realizar el montaje del ensayo del aplastamiento a tres apoyos, se usó en la parte inferior soportes de madera maciza; para los soportes superiores, una sección rectangular de madera maciza, y una viga metálica, por las dimensiones de la maquina universal, esta viga tenía una restricción de altura de 8.5 cm, siendo así una viga IPE80; debido a la carga que esta soporta en el ensayo y su poca altura se le añadieron unos atizadores para evitar el pandeo del alma, ver Figura 15. En el Anexo E se presenta el detalle de la viga.



Figura 15. Soporte Superior, viga IPE80

En la Figura 16 se presenta el montaje del ensayo y en la Tabla 27 los resultados.

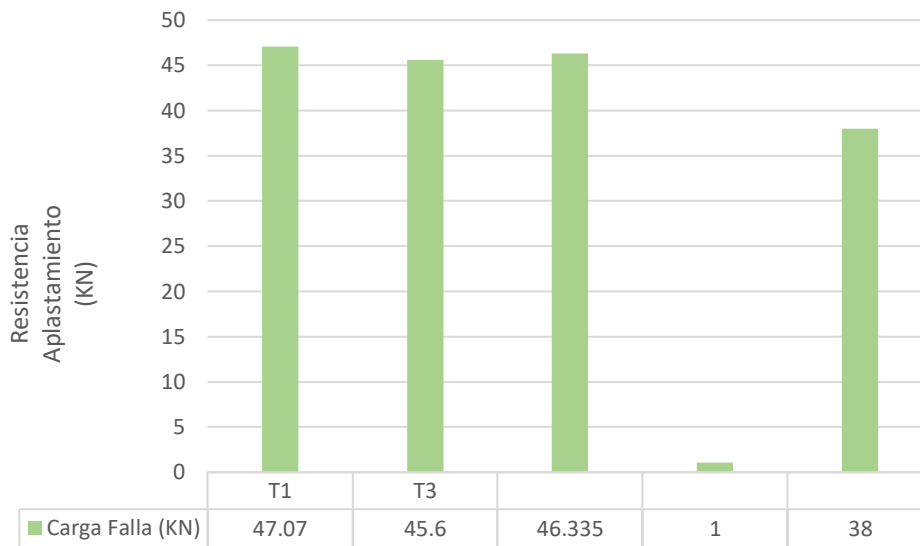


Figura 16. Montaje del ensayo de aplastamiento

Cómo se indica previamente la resistencia de la tubería en el ensayo de aplastamiento cumple con la resistencia mínima que equivale a 38 KN/m.

Tabla 27. Resultados de aplastamiento de tubos de con la mezcla M2.

| TUBO | ϕ ext (cm) | ϕ int (cm) | Longitud (cm) | Carga Falla (KN) | Tipo de falla | Pu/Padm |
|------|-----------------|-----------------|---------------|------------------|---------------|---------|
| T1 | 30 | 24 | 102 | 47,07 | Súbita | 1,239 |
| T3 | 30,3 | 25 | 103 | 45,6 | Súbita | 1,200 |



Gráfica 14. Resistencia al aplastamiento de Tubos.

En la Figura 17 se observa la falla que cada tubo presentó en el ensayo de aplastamiento.



Figura 17. Falla súbita en tubería de concreto.

4.5.4. PERMEABILIDAD

Una vez se llenó el tubo con el montaje de la prueba no hubo ninguna fuga, por lo que se concluye que el retiro de la formaleta no generó alguna fisura. Después de 15 minutos de empezar el ensayo, se inspecciona por puntos de humedad y no había; luego de otros 15 minutos se inspecciona nuevamente, sin haber alguno. Por último, 24 horas después de iniciado el ensayo se inspecciona, pero la tubería no presentaba ningún punto de humedad. Se concluye que la tubería cumple con las especificaciones de permeabilidad.



Figura 18. Montaje (izquierda) e inspección (centro y derecha) de ensayo de permeabilidad de tubos de concreto.

4.5.5. CALIDAD TUBOS FABRICADOS POR ALJIBES

Para definir el impacto en la calidad de los tubos debido al proceso realizado a los agregados reciclados en este proyecto, se tomaron cuatro muestras del concreto con el que se fabrican los tubos en Aljibes. De estas cuatro probetas, tres para ensayar a 28 días y definir la resistencia a compresión; de esta no se tiene conocimiento porque los tubos se fabrican de forma artesanal, sin ningún tipo de parámetro técnico o control de calidad; y una probeta para definir la absorción de este mismo concreto. En la Tabla 28 se presentan los resultados de los ensayos previamente mencionados.

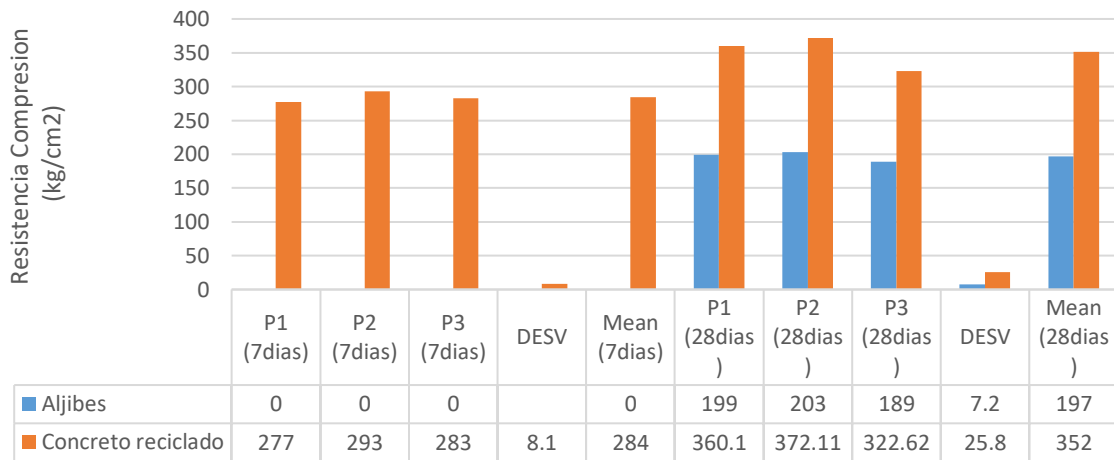
Tabla 28. Resistencia a la compresión y absorción de tubos fabricados por Aljibes.

| f'c 28 días (Kg/cm ²) | | | Desviación estándar (Kg/cm ²) | Promedio (Kg/cm ²) | Absorción 28 días (%) | | | Desviación estándar (%) | Promedio (%) |
|--------------------------------------|-----|-----|---|-----------------------------------|--------------------------|------|-----|-------------------------------|-----------------|
| 199 | 203 | 189 | 7,2 | 197 | 9,7 | 10,3 | 9,1 | 0,6 | 9,7 |

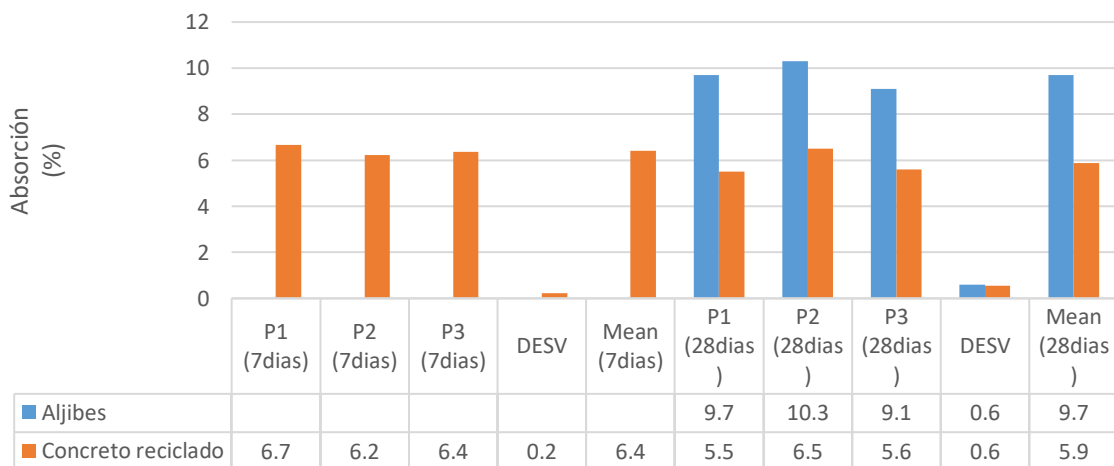
Para ver con más detalle los resultados anteriores ver Anexo E.

4.5.6. ANALISIS DE RESULTADOS

En la *Gráfica 16* y la *Gráfica 15* se presentan los resultados comparativos de los tubos fabricados por la empresa Aljibes y los tubos fabricados con el concreto reciclado. La diferencia en los resultados es considerable. Y esto se debe al diseño de mezcla del concreto con el que actualmente se fabrican los tubos en Aljibes; puesto que, para fabricar un tubo de las mismas dimensiones a los desarrollados en el proyecto, utilizan medio bulto de cemento aproximadamente, mientras que para los tubos que se fabricaron con el concreto reciclado se usó aproximadamente un bulto (50kg).



Gráfica 15. Resultados Comparativos Tubos Aljibes y Tubos de concreto reciclado. Resistencia a la compresión



Gráfica 16. Resultados Comparativos Tubos Aljibes y Tubos de concreto reciclado. Absorción

Cabe resaltar que la resistencia de los tubos fabricados por Aljibes, puede ser menor que los de los testigos presentados, ya que el concreto de estos tubos no tienen ningún proceso de

curado, mientras que los testigos que se probaron sí, estuvieron sumergidos en una solución de agua con cal hasta el día del ensayo.

En cuanto a la calidad del concreto con agregado reciclado de los tubos, se puede decir que cumple a cabalidad con los parámetros que establece la NTC 3676, tanto para la resistencia a compresión, la resistencia al aplastamiento, la absorción y la permeabilidad. En la Tabla 29 se presenta un condensado de los resultados y un factor de seguridad con respecto a los valores mínimos establecidos por la norma mencionada previamente.

Tabla 29. Factor de seguridad

| ENSAYO | NTC 3676 | TUBOS M2 | FACTOR SEGURIDAD |
|--|----------|----------|------------------|
| Resistencia compresión (kg/cm ²) | 280 | 352 | 1,26 |
| Resistencia aplastamiento (Tn/m) | 3,875 | 4,725 | 1,22 |
| Absorción (%) | 9 | 5,9 | 1,53 |

Si se hace un promedio del factor de seguridad de los anteriores parámetros se tiene que el factor de seguridad del diseño del concreto con agregado reciclado con respecto a los valores mínimos del NTC 3676 es de 1,33. Si se realiza este mismo ejercicio con el trabajo de investigación previo (Ortiz Vargas & Burbano, 2017), se obtiene lo siguiente.

Tabla 30. Factor de seguridad antecedente

| ENSAYO | NTC 3676 | (Ortiz & Burbano, 2017) | FACTOR SEGURIDAD |
|--|----------|-------------------------|------------------|
| Resistencia compresión (kg/cm ²) | 280 | 288 | 1,03 |
| Resistencia aplastamiento (KN/m) | 2,35 | 2,371 | 1,01 |
| Absorción (%) | 9 | 8,81 | 1,02 |

Al analizar los datos de la Tabla 30, se puede decir que previamente el concreto que se produjo con este mismo reemplazo de agregado y relación a/c (Ortiz Vargas & Burbano, 2017), estuvo al límite de los valores mínimos establecidos en la norma, por lo que la reproducción de este diseño no garantizaba que el concreto cumpliera con los requerimientos técnicos. Si se llegara a presentar algún fallo en la fabricación de estos o

cualquier leve variación en las propiedades del concreto, harían que este no cumpla el desempeño que establece la norma.

Comparando los resultados de las anteriores tablas, se puede decir que, aunque el proceso de pretratamiento que se usó para el agregado reciclado fue algo sencillo y nada complicado, marco una gran diferencia en el desempeño del concreto producido. Sin embargo, el hecho de hacer únicamente el reemplazo con el agregado grueso reciclado, desechando el fino de esto, también influye en mejorar la calidad del concreto, aunque los finos del agregado reciclado se podrían usar, pero para la dosificación este fino se debe considerar como un ASCM, y la dosificación se hace por medio de reemplazo múltiple.

Con respecto al proyecto desarrollado por Ortiz Vargas y Burbano, el concreto con agregados reciclados fabricado en esta investigación alcanzó una mejora del 33 % en la absorción, un 22 % en la resistencia a compresión, y en la resistencia de aplastamiento, si se comparan los factores de seguridad, se tiene una mejora del 22%.

4.6. ANALISIS DE COSTOS

Para el análisis de costos se tuvo en cuenta los costos totales por reparación de la tubería; se analizaron los costos directos, los cuales están representados en costos por mano de obra, materiales y herramientas (insumos fungibles), y los costos indirectos representados en los costos por almacenamiento, administración y lucro cesante que se genera por la tubería que es reparada y no es despachada a tiempo, además de la tubería que es dañada sin oportunidad de ser reparada. Para la evaluación de los costos directos se examinó en qué parte se dañan los tubos con más frecuencia y cuáles son las posibles causas para que esto ocurra.

4.6.1. DAÑOS QUE SE PRESENTAN EN LOS TUBOS DE CONCRETO

Se ha encontrado que las partes que más sufren daño son el espigo y la campana, en muy pocas ocasiones en el cuerpo del tubo. El espigo se daña con facilidad debido a que es la última parte del tubo en fundir afectando su compactación y con una mezcla más seca, es decir, con diferente composición de la mezcla del tubo, lo cual afecta la adherencia entre el concreto del tubo y del espigo. Además, que el retiro de la formaleta del espigo se realiza inmediatamente al elaborar el tubo. Por otro lado, la campana se desmolda al día siguiente de fundido el tubo. La formaleta se retira por medio de golpes, lo que puede ocasionar fisuras o fracturas.

El cuerpo del tubo se daña generalmente en el transporte dentro de la planta ya que estos en algunas ocasiones se colocan en el piso y se ruedan sin tener demasiados cuidados, provocando ciertas fisuras que deben resanarse. También se presentan daños en el momento de cargar la tubería en los vehículos de transporte, debido al tamaño y peso se hacen difíciles de manipular por el personal encargado de esta labor.

Además de estos daños en la planta se presentan otros de camino al destino al cual se despacha la tubería; estos daños se generan por el mal estado de las vías, el cuidado por parte del conductor al manejar, las medidas optadas para la ubicación y protección de la tubería mientras se transporta.

4.6.2. EVALUACIÓN DE LOS COSTOS ACTUALES

COSTOS POR REPARACIÓN

La planta cuenta con una cuadrilla conformada por dos personas que se encargan de la reparación de la tubería dañada en la planta y en el lugar de destino. Los trabajadores trabajan medio día en esta actividad, por lo que este costo de mano de obra es equivalente a un trabajador. Las reparaciones se realizan de forma artesanal, es decir, no se ocupan equipos o maquinaria en la actividad, interviene solo el material y la herramienta menor.

Para determinar dichos costos, además de considerar la mano de obra por parte de la cuadrilla y la cantidad de material que se consumía por reparación, se analiza el costo unitario, la vida útil y la cantidad de la herramienta menor con la que se dota al personal; se hizo un seguimiento a los insumos por tres meses para establecer las cantidades.

La vida útil está impuesta por administración; el tiempo que se asume como vida útil, en realidad es el tiempo en el que se dota al personal con un nuevo insumo. En casos especiales, el tiempo de renovación puede disminuirse a causa del aumento de producción. Se calculan los costos totales aproximados por mes desde la Tabla 31 a la Tabla 34.

Tabla 31. Costo herramienta menor

| Elemento | Vida Útil (Día) | Vida Útil (mes) | Costo Unitario | Costo Unitario Mensual | Costo Total Mensual Cuadrilla |
|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------------|-------------------------------|
| Balde | 90 | 3,00 | \$ 5.750 | \$ 1.917 | \$ 3.833 |
| Brocha 3" | 20 | 0,67 | \$ 9.900 | \$ 14.850 | \$ 29.700 |
| Brocha 2" | 20 | 0,67 | \$ 5.200 | \$ 7.800 | \$ 15.600 |
| Palustre N.º 8 | 120 | 4,00 | \$ 21.900 | \$ 5.475 | \$ 10.950 |
| Palustre N.º 5 | 120 | 4,00 | \$ 19.900 | \$ 4.975 | \$ 9.950 |
| Espátula 2" | 120 | 4,00 | \$ 7.900 | \$ 1.975 | \$ 3.950 |
| Pala Redonda 8 1/2" | 150 | 5,00 | \$ 44.900 | \$ 8.980 | \$ 17.960 |
| Carreta Tipo Buggy | 180 | 6,00 | \$ 175.000 | \$ 29.167 | \$ 58.333 |
| TOTAL | | | | \$ | 150.277 |

Tabla 32. Costo elementos de protección personal

| Elemento | Vida Útil (Día) | Vida Útil (mes) | Costo Unitario | Costo Unitario Mensual | Costo Total Mensual Cuadrilla |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------------|-------------------------------|
| Tapabocas | 7 | 0,23 | \$ 1.300 | \$ 5.571 | \$ 11.143 |
| Mascarilla respirador Filtro doble | 90 | 3 | \$ 16.900 | \$ 5.633 | \$ 11.267 |
| Guantes vaqueta tipo Ingeniero | 15 | 0,5 | \$ 8.450 | \$ 16.900 | \$ 33.800 |
| Guantes de caucho | 15 | 0,5 | \$ 6.200 | \$ 12.400 | \$ 24.800 |
| Monogafas | 30 | 1 | \$ 5.900 | \$ 5.900 | \$ 11.800 |
| Tapa oídos | 30 | 1 | \$ 3.100 | \$ 3.100 | \$ 6.200 |
| TOTAL | | | | \$ | 99.010 |

Tabla 33. Costo de materiales

| Material | Unidad | Cantidades por mes | | | Costo Unitario | Costo Promedio Total |
|-------------------|--------|--------------------|---------|-----------|----------------|----------------------|
| | | Septiembre | Octubre | Noviembre | | |
| Cemento | Kg | 1100 | 950 | 1450 | \$ 510 | \$ 595.000 |
| Triturado 3/8 | M3 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | \$ 67.001 | \$ 24.567 |
| Arena Gruesa | M3 | 0,7 | 0,6 | 1 | \$ 47.380 | \$ 36.325 |
| Arena Fina | M3 | 1,1 | 0,9 | 1,3 | \$ 47.380 | \$ 52.118 |
| Sikadur-32 Primer | Kg | 20 | 18 | 25 | \$ 76.665 | \$ 1.609.956 |
| Acronal | Galón | 11 | 10 | 15 | \$ 7.800 | \$ 93.600 |
| TOTAL | | | | | | \$ 2.411.565 |

Tabla 34. Costo de mano de obra

| Concepto | Costo |
|------------------------------|---------------------|
| Sueldo | \$ 908.526 |
| Auxilio de Transporte | \$ 106.454 |
| SEGURIDAD SOCIAL | |
| Riesgos laborales (ARL) | \$ 63.233 |
| Caja de compensación | \$ 36.341 |
| Salud (EPS) | \$ 77.225 |
| Pensión | \$ 109.023 |
| PRESTACIONES SOCIALES | |
| Cesantías | \$ 84.581 |
| Prima | \$ 84.581 |
| Interés cesantías | \$ 10.149 |
| Vacaciones | \$ 37.858 |
| TOTAL | \$ 1.517.971 |

De las tablas anteriores se define que el costo total por reparación de la tubería es de \$ 4.178.823 mensualmente.

COSTOS POR PÉRDIDA

Se definen los costos al considerar la pérdida total de las tuberías, es decir su costo en venta y almacenamiento. Este costo se realiza tanto para la tubería con daños reparables como para la tubería no reparable. Para la tubería reparable se aplica el costo por no ser entregada a tiempo y por su almacenamiento; para la no reparable el almacenamiento, la demolición y el desecho genera el costo total. Los costos de tuberías reparables y no reparables por mes se presentan en la Tabla 35 y la Tabla 36.

Tabla 35. Costo de tubería no reparable.

| Diámetro (pulg.) | Dimensiones | | | Cantidad (Unidad) | | | Costo Unitario | Costo Promedio Total |
|------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------|----------|------------|----------------|----------------------|
| | Diámetro (mm) | Espesor (mm) | Longitud (m) | Septiemb re | Octubr e | Noviemb re | | |
| 8 | 200 | 30 | 1,04 | 2 | 1 | 0 | \$60.000 | \$60.000,00 |
| 10 | 250 | 32,5 | 1,04 | 3 | 2 | 2 | \$70.000 | \$163.333,33 |
| 12 | 300 | 45 | 1,04 | 1 | 3 | 4 | \$130.000 | \$346.666,67 |
| 14 | 350 | 47 | 1,04 | 2 | 2 | 2 | \$140.000 | \$280.000,00 |
| 16 | 400 | 50 | 1,04 | 1 | 0 | 3 | \$161.000 | \$214.666,67 |
| 18 | 450 | 57 | 1,04 | 2 | 2 | 1 | \$206.000 | \$343.333,33 |
| 20 | 500 | 65 | 1,04 | 1 | 1 | 0 | \$257.000 | \$171.333,33 |
| 24 | 600 | 85 | 1,04 | 1 | 0 | 1 | \$453.000 | \$302.000,00 |
| 28 | 700 | 98 | 1,04 | 1 | 1 | 0 | \$598.000 | \$398.666,67 |
| 32 | 850 | 108 | 1,04 | 0 | 1 | 0 | \$726.000 | \$242.000,00 |
| 36 | 900 | 111 | 1,04 | 0 | 0 | 0 | \$765.000 | \$0,00 |
| 40 | 1000 | 120 | 1,04 | 0 | 0 | 0 | \$893.000 | \$0,00 |
| 44 | 1100 | 125 | 1,04 | 0 | 0 | 1 | \$969.000 | \$323.000,00 |
| 48 | 1200 | 135 | 1,04 | 0 | 0 | 0 | \$1.130.000 | \$0,00 |
| | | | | | | | 0 | |
| TOTAL | | | | | | | | \$2.845.000 |

Tabla 36. Costo de tubería reparable.

| Diámetro (pulg) | Dimensiones | | | Cantidad (Und) | | | Costo Unitario | Costo Promedio Total |
|-----------------|---------------|--------------|--------------|----------------|----------|------------|----------------|----------------------|
| | Diámetro (mm) | Espesor (mm) | Longitud (m) | Septiemb re | Octubr e | Noviemb re | | |
| 8 | 200 | 30 | 1,04 | 5 | 1 | 2 | \$60.000 | \$160.000,00 |
| 10 | 250 | 32,5 | 1,04 | 12 | 6 | 8 | \$70.000 | \$606.666,67 |
| 12 | 300 | 45 | 1,04 | 6 | 8 | 4 | \$130.000 | \$780.000,00 |
| 14 | 350 | 47 | 1,04 | 4 | 5 | 4 | \$140.000 | \$606.666,67 |
| 16 | 400 | 50 | 1,04 | 2 | 4 | 3 | \$161.000 | \$483.000,00 |
| 18 | 450 | 57 | 1,04 | 2 | 4 | 1 | \$206.000 | \$480.666,67 |
| 20 | 500 | 65 | 1,04 | 5 | 6 | 2 | \$257.000 | \$1.113.666,67 |
| 24 | 600 | 85 | 1,04 | 2 | 2 | 2 | \$453.000 | \$906.000,00 |
| 28 | 700 | 98 | 1,04 | 6 | 1 | 2 | \$598.000 | \$1.794.000,00 |
| 32 | 850 | 108 | 1,04 | 2 | 1 | 0 | \$726.000 | \$726.000,00 |
| 36 | 900 | 111 | 1,04 | 0 | 0 | 0 | \$765.000 | \$0,00 |
| 40 | 1000 | 120 | 1,04 | 1 | 0 | 1 | \$893.000 | \$595.333,33 |
| 44 | 1100 | 125 | 1,04 | 2 | 0 | 1 | \$969.000 | \$969.000,00 |
| 48 | 1200 | 135 | 1,04 | 0 | 1 | 0 | \$1.130.000 | \$376.666,67 |
| | | | | | | | | |
| TOTAL | | | | | | | | \$9.597.666,6 |

El área ocupada por los tubos se calcula como el diámetro por la longitud, en la Tabla 37 se presenta el área ocupada por tubos defectuosos de tres meses y se calcula un valor total

promedio a partir este sondeo; y en la Tabla 38 para tubos a desechar. Para la tubería a reparar se tienen un área total de 10,75 m² y para la tubería a desechar 2,42 m². Adicional a estas zonas se establece un área para manipulación y movimiento de la tubería ya sea reparable o para desechar de 10.56 m² (correspondientes para el manejo de un montacargas de 3.8m x 1.2m). Lo que da un área total necesaria de 23,73 m².

Tabla 37. Área ocupada por tubos a reparar

| Dimensiones | | | Cantidad (UND) | | | AREA (M2) | | |
|---------------|--------------|--------------|----------------|-----------|-----------|---------------|--------------|--------------|
| Diámetro (mm) | Espesor (mm) | Longitud (m) | SEP | OCT | NOV | SEP | OCT | NOV |
| 200 | 30 | 1,04 | 5 | 1 | 2 | 1,040 | 0,150 | 0,002 |
| 250 | 32,5 | 1,04 | 12 | 6 | 8 | 3,120 | 2,340 | 0,050 |
| 300 | 45 | 1,04 | 6 | 8 | 4 | 1,872 | 2,160 | 0,033 |
| 350 | 47 | 1,04 | 4 | 5 | 4 | 1,456 | 0,940 | 0,021 |
| 400 | 50 | 1,04 | 2 | 4 | 3 | 0,832 | 0,400 | 0,012 |
| 450 | 57 | 1,04 | 2 | 4 | 1 | 0,936 | 0,456 | 0,004 |
| 500 | 65 | 1,04 | 5 | 6 | 2 | 2,600 | 1,950 | 0,012 |
| 600 | 85 | 1,04 | 2 | 2 | 2 | 1,248 | 0,340 | 0,004 |
| 700 | 98 | 1,04 | 6 | 1 | 2 | 4,368 | 0,588 | 0,002 |
| 850 | 108 | 1,04 | 2 | 1 | 0 | 1,768 | 0,216 | 0,000 |
| 900 | 111 | 1,04 | 0 | 0 | 0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 1000 | 120 | 1,04 | 1 | 0 | 1 | 1,040 | 0,000 | 0,000 |
| 1100 | 125 | 1,04 | 2 | 0 | 1 | 2,288 | 0,000 | 0,000 |
| 1200 | 135 | 1,04 | 0 | 1 | 0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| TOTAL | | | 49 | 39 | 30 | 22,568 | 9,540 | 0,141 |

Tabla 38. Área ocupada por tubos a desechar

| Dimensiones | | | Cantidad (Und) | | | AREA (M2) | | |
|--------------|--------------|-------------|----------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Diámetro (m) | Longitud (m) | Espesor (m) | Abril | Mayo | Junio | Abril | Mayo | Junio |
| 0,2032 | 1,04 | 0,030 | 2 | 1 | 0 | 0,423 | 0,031 | 0 |
| 0,254 | 1,04 | 0,033 | 3 | 2 | 2 | 0,792 | 0,068 | 0,195 |
| 0,3048 | 1,04 | 0,045 | 1 | 3 | 4 | 0,317 | 0,14 | 0,18 |
| 0,3556 | 1,04 | 0,047 | 2 | 2 | 2 | 0,74 | 0,098 | 0,188 |
| 0,4064 | 1,04 | 0,050 | 1 | 0 | 3 | 0,423 | 0 | 0,15 |
| 0,4572 | 1,04 | 0,057 | 2 | 2 | 1 | 0,951 | 0,119 | 0,114 |
| 0,508 | 1,04 | 0,065 | 1 | 2 | 0 | 0,528 | 0,135 | 0 |
| 0,6096 | 1,04 | 0,085 | 1 | 0 | 1 | 0,634 | 0 | 0,085 |
| 0,7112 | 1,04 | 0,098 | 1 | 1 | 0 | 0,74 | 0,102 | 0 |
| 0,8128 | 1,04 | 0,108 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,112 | 0 |
| 0,9144 | 1,04 | 0,111 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,016 | 1,04 | 0,120 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,1176 | 1,04 | 0,125 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1,2192 | 1,04 | 0,135 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | | | 14 | 14 | 14 | 5,55 | 0,80 | 0,91 |

El costo por almacenamiento se estima de modo general para ambos casos, ya que las tuberías se encuentran almacenadas en el mismo lugar. Estos costos se determinan al calcular aproximadamente el área ocupada por los tubos, el valor del metro cuadrado del terreno en la zona y el área para la manipulación y movimiento de la tubería.

Se estima que el valor mensual del almacenamiento es el 1 % del valor de terreno por metros cuadrados, al seguir que el canon de arrendamiento estándar es alrededor del 1 % del valor comercial de un inmueble. El valor del metro cuadrado de las afueras de Jamundí no supera \$ 60.000 pesos/m². Se tiene así un costo total de:

- Almacenamiento, \$ 1.423.800,00
- Desecho, \$ 100.000,00

Con base en lo anterior se define un costo total de \$ 13.942.266,67 para los costos por pérdida.

4.6.3. INVERSIÓN INICIAL

La inversión inicial para la introducción de los procesos para el reciclaje de concreto se basa en la estimación de los costos de la máquina trituradora, costo de la mano de obra (operario máquina), costo de la recolección y disposición del material a reciclar, costo de herramienta menor adicional, costo de instalación y mantenimiento de la máquina.

COSTO TRITURADORA DE MANDÍBULA

Era necesario conocer la cantidad de material a procesar para seleccionar las especificaciones de la trituradora de mandíbula adecuada; la cantidad de concreto en peso perteneciente a las tuberías no reparables es de aproximadamente cuatro toneladas por tres meses; se define que el promedio mensual de concreto a triturar es de aproximadamente de 1.33 toneladas, para lo cual la mandíbula con menor capacidad es suficiente ya que es de aproximadamente seis toneladas. Se hace el cálculo a partir del valor de la capacidad de la mandíbula, lo que resulta que al día se tratarían 272.72 kg, si se trabaja 22 días al mes.

Teniendo en cuenta lo anterior y proyectando una mayor utilización de escombros a parte de los generados en la planta, se estima que una trituradora Industrial de mandíbulas con capacidad de 30 metros cúbicos día o 45000 kilogramos por día. Esta se cotiza con un valor aproximado de \$ 16'500,000 de pesos incluyendo instalación.

COSTO MANO DE OBRA

La mano de obra bastaría con un solo trabajador, ya que la actividad de triturar no superaría las cuatro horas diarias y la demolición de los tubos con porra se puede realizar en el tiempo

restante del día, por ello, el costo de la mano de obra comprende un salario mínimo legal de \$ 1'517.971.

COSTO MANTENIMIENTO TRITURADORA DE MANDÍBULA

Debido al desgaste o pequeñas averías que puede presentar la trituradora al estar en constante contacto con material abrasivo, es necesario contar con un mantenimiento trimestral por parte de un especialista. Dicha actividad tendría un costo de \$ 200,000 mensuales, solo si es inspección y mantenimiento.

COSTO CONSUMO DE ENERGÍA

La trituradora de mandíbula consume 3 KW/h, así que el costo mensual de la energía consumida si se utiliza 22 días al mes es de \$ 147.452, con una tarifa de energía de \$ 558,53 KW-h.

INVERSIÓN TOTAL INICIAL

Al totalizar todos los costos que intervienen en la inversión inicial para implementar un proceso de reciclaje de concreto se tiene:

- Trituradora de mandíbula, \$ 16.500.000

Los costos mensuales fijos de reciclaje del concreto serán de \$ 1.865.423, en detalle:

- Mano de obra, \$ 1'517.971
- Mantenimiento, \$ 200.000,00
- Consumo de energía, \$ 147.452

COSTO PROCESO PRETRATAMIENTO DE AGREGADOS

Puesto que el proceso propuesto es uno tan sencillo como el saturar el agregado reciclado con agua durante diez minutos, se desprecia el costo adicional que este puede generar en la producción del concreto reciclado.

4.6.4. ANALISIS DE RESULTADOS

La empresa actualmente tiene pérdidas de un valor económico considerable, esto se debe a que el proceso de fabricación es de forma artesanal y no se cuenta con tecnología sofisticada. Estos costos totales por pedida tienen un 72 % dado por el proceso de reparación de la tubería defectuosa; introducir el proceso de fabricar tubería con concreto reciclado no incidiría en la reducción de este costo, ya que este está dado por problemas de fabricación.

Si se compara el costo de la tubería no reparable y su desecho, con el costo de la fabricación de tubería con concreto reciclado sin incluir la inversión inicial, encontramos que se tendrá un ahorro del 37 %, que en pesos representan \$1.079.577 / mensual. Si dividimos el costo de la inversión inicial por la introducción de este proceso entre el ahorro calculado previamente, se tiene que la inversión se recuperaría en 15 meses con 8 días. Una vez recuperada esta inversión inicial, la empresa tendrá una reducción del costo con un valor de \$12.954.924 /anual por tubería no reparable.

Se debe tener en cuenta que habrá algunas variaciones en los valores y cantidades estimadas en la sección anterior para determinar los costos, esto debido a que la fabricación es de forma artesanal, las cantidades que se presentaron de la tubería no reparable y reparable, se estableció a partir de sondeos que se hicieron específicamente en los meses que se indican en las respectivas tablas, lo que no incluye una variación del mercado a lo largo del año.

5. CONCLUSIONES

La calidad del concreto producido con agregado de concreto reciclado se ve mejorada considerablemente al utilizar únicamente el agregado grueso (retenido Tamiz #4) y desechando el fino, puesto que estos materiales finos absorben mayor cantidad de agua.

Existen numerables métodos de pretratamiento para el agregado reciclado que mejoran la calidad del concreto fabricado con este material, que hacen posible el uso de este concreto en diferentes elementos estructurales; incluyendo métodos tan sencillos como la pre saturación del agregado antes de realizar la mezcla hasta métodos tan vanguardistas como el uso de bacterias para generar un proceso de carbonatación en el agregado reciclado.

Al revisar el cambio en las propiedades físico mecánicas de un concreto reciclado con agregados sin pretratamientos y uno con pretratamiento se tiene que el aumento en la resistencia a compresión es de 15 % y la absorción con una disminución del 54 %.

El uso de pretratamientos como la pre-saturación del agregado reciclado no afecta negativamente la permeabilidad del concreto fabricado con estos. Así como el concreto reciclado de tubería de concreto como agregado grueso tiene la suficiente calidad que establece la norma para que estos garanticen la durabilidad del concreto, teniendo en cuenta su resistencia al desgaste y su solidez.

Se concluye que el método elegido de pre saturación con agua para el agregado reciclado tuvo incidencia relevante en la absorción, puesto que en el trabajo previo (Ortiz Vargas & Burbano, 2017) se obtuvo un valor aproximado del 8%, mientras que en este diseño de mezcla se tuvo una absorción del 5.9 %. Un valor con una mayor distancia del límite del 9 % establecido por la norma y con una mejora de 26 % con respecto al trabajo previo.

Se concluye que una vez un concreto tiene una absorción menor, su resistencia mecánica se ve mejorada, ya que con el concreto reciclado sin pretratamiento obtuvo una resistencia de 29.6MPa, mientras que con agregados con pre saturación obtuvo 32.9 MPa, con una diferencia de 11 %.

La calidad del concreto con agregados reciclados con pre saturación cumple a cabalidad las especificaciones técnicas establecidas en la NTC 3676; alcanzando en la absorción, resistencia a la compresión y al aplastamiento factores de seguridad de 1.53, 1.26 y 1.22 respectivamente (Ver Tabla 29).

Es evidente que el realizar el proceso de fabricar tubería de concreto con agregado reciclado a partir de concreto triturado requiere de una inversión inicial grande y un retorno en un tiempo considerable (un año y tres meses), por lo que la inclusión de este proceso tendría un beneficio a corto plazo únicamente en una factibilidad ambiental y con subsidios del gobierno que permitan incentivar a empresas a tener una noción de responsabilidad

ambiental, ya que se estaría reduciendo la cantidad de residuos generada por tubos defectuosos y así mismo la contaminación que se genera por el sector de la construcción. A largo plazo la introducción del proceso le generaría una reducción en sus costos por pérdida del 37 % mensual, y una reducción anual de \$12.954.924 después de recuperada la inversión inicial.

Se observa que aproximadamente el 50 % del coste por reparación se debe al cemento y al aditivo que se implementa; por lo que se podría cambiar el concreto a otro tipo y otro aditivo más económico, lo cual reduciría de forma drástica el gasto en reparación de tal forma que el uso de concreto reciclado sería muy costoso comparado con este valor.

Debido al alto costo de la producción de concreto reciclado en otros países donde este se usa y está regulado, se produce gracias a subsidios que da el gobierno, por lo que el uso de concretos reciclados es la acción emprendida por gobiernos entorno a la responsabilidad ambiental actual mas no por un beneficio económico.

6. FUTUROS TRABAJOS

Se propone como trabajo a futuro el desarrollo de un concreto que tenga un mayor reemplazo del agregado grueso por agregado reciclado, y así mismo, explorar otros pretratamientos al agregado, e incluso el uso de aditivos en la mezcla del concreto que sirvan para mejorar las características mecánicas de este. También es importante aclarar que en este proyecto se aproxima a la solución del problema por medio de la mejora del agregado reciclado, pero también una opción para mejorar las características mecánicas del concreto es a través de la mejora de la matriz del concreto, lo cual, como se dice previamente se puede lograr por medio de aditivos en la mezcla u otros procesos.

Se recomienda estudiar el mercado potencial en ciudades pequeñas y evaluar la factibilidad ambiental, social, normativa y económica de avanzar en empresas como Aljibes, ya que, en ciudades como Cali, el trabajo de empresas de este tipo está por concluir, debido a que son superadas por empresas que garantizan la calidad y durabilidad con tuberías más económicas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ACI Comitte 211. (s.f.). Standar Practice to Selecting Proportions for structural Leightweight Concrete (ACI 211-98).
- Al-Bayati, H. K., Das, P. K., Tighe, S. L., & Baaj, H. (2015). Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 284-298.
- Bui, N. K., Satomi, T., & Takahashi, H. (2017). Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 496-507.
- Campo, S. L., & Henao, J. M. (2014). *Estudio del uso de agregados reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) provenientes de la ciudad de Cali como material para la construcción de elementos prefabricados de concreto, caso de los adoquines*. Cali: Universidad PONTificia Javeriana.
- Cement Sustainability Initiative. (2009). *Reciclando concreto*. www.wbcscement.org.
- Civilgeeks.com, I. y. (11 de Diciembre de 2011). *Civilgeeks.com*. Obtenido de <https://civilgeeks.com/2011/12/11/propiedades-principales-del-concreto/>
- Corporación BIOPARQUE. (14 de Julio de 2017). *Colombia recicla menos del 9% de su basura y economía circular apenas despega*. Obtenido de Catorce 6: <https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/17059-colombia-recicla-menos-del-9-de-su-basura-y-economia-circular-apenas-despega>
- Di Maio, A.; Traversa, L.P. . (2003). *Evaluación de hormigones reciclados mediante ensayos no destructivos*.
- García Pérez, J. (2004). *Diseño de hormigones dirigido a la aplicación*. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Hanaa Khaleel Alwan Al-Bayati, P. K. (2015). Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 284-298.
- Hansen, T. C. (1985). *Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete: Second State-of-the-art Report, Developments 1945-1985*. Denmark: RILEM TC-37-DRC, 1985.
- ICONTEC. (1996). Norma Técnica Colombiana 92. Bogotá, Colombia.
- ING Gerardo Rivera L. (2013). Durabilidad del Concreto. En I. G. L., *Concreto Simple* (págs. 147-160). Universidad del Cauca.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certifiacción ICONTEC. (1992). Norma Técnica Colombiana 396.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (1996). Norma Técnica Colombia 237. Bogotá, Colombia.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (1996). Norma Técnica Colombiana 129. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (1996). Norma Técnica Colombiana 176. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (1996). Norma Técnica Colombiana 32. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (1996). Norma Técnica Colombiana 92. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2002). Norma Técnica Colombiana 3676. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2008). Norma Técnica Colombiana 1022. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2008). Norma Técnica Colombiana 5653.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2009). Norma Técnica Colombiana 401. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2010). Norma Técnica Colombiana 673.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2019). Norma Técnica Colombiana 98. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (996). Norma Técnica Colombia 176. Bogotá, Colombia.
- J, P., Brito, J. d., C., C., & L., E. (2018). Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 110-119.
- Kou, S.-C., & Poon, C.-S. (2010). Proprieties of concrete prepared wit PVA-impregnatedrecycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 649-654.
- López, S. A. (2013). *Aditivo Hiperplastificante en absorción de humedad por capilaridad del hormigón*. Santiago de Chile: UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO.
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. México: Alfaomega.
- Moro, J. M., Meneses, R. S., Señas, L., Priano, C., Ortega, N. F., & Aveldaño, R. R. (2014). Incorporación de aditivos en hormigones reciclados para modificar sus propiedades. *Ciencia y tecnología*, 63-74.
- Neville, A. (1999). *Tecnología del concreto*.

- Ortiz Vargas, C., & Burbano, O. M. (2017). *Tubos de concreto con agregado reciclado*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- P. Saravanakumar, K. A. (2015). Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*, 611-617.
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2015). Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *Journal of Cleaner Production* 112, 466-472.
- Spaeth, V., & Tegguer, A. D. (2014). Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 143-152.
- Thomas, J., Thaickavil, N. N., & Wilson, P. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 349-365.
- Wang, L., Wang, J., Xu, Y., Cuin, L., Qian, X., Chen, P., & Fang, Y. (2018). Consolidating recycled concrete aggregates using phosphate solution. *Construction and Building Materials*, 703-712.
- Zapata, J. C. (2016). *Absorcion y peso especifico del agregado grueso*. Obtenido de Academia Education: https://www.academia.edu/7707615/ABSORCION_Y_PESO_ESPECIFICO_DEL_
- Zhan, B., Poon, C. S., Liu, Q., Kou, S., & Shi, C. (2013). Experimental study on CO2 curing for enhancement of recycled aggregate properties. *ScienceDirect*, 3-7.
- Zhu, Y. G., Kou, S.-C., Poon, C.-S., Dai, J.-G., & Li, Q.-Y. (2012). Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*, 32-38.