



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

INFLUENCIA DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)
PROVENIENTES DE CONCRETO EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AL
ATAQUE DE CLORUROS EN MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO

PRESENTADO POR:

DANNA CAMILA ROJAS SANTANDER
JULIO ENRIQUE OLAYA MADIEDO

CÓDIGO: 506586
CÓDIGO: 506219

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAM DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA
2020



INFLUENCIA DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)
PROVENIENTES DE CONCRETO EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AL
ATAQUE DE CLORUROS EN MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO

TRABAJO DE GRADO

PRESENTADO POR:

DANNA CAMILA ROJAS SANTANDER
JULIO ENRIQUE OLAYA MADIEDO

CÓDIGO: 506586
CÓDIGO: 506219

DOCENTE ASESOR:

HÉCTOR CAMILO HIGUERA FLÓREZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAM DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA
2020



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

NOTA DE ACEPTACIÓN:

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

Dedicatoria

El presente trabajo de grado está dedicado principalmente a Dios, quien ha guiado mi camino, manteniéndome fuerte para lograr culminar cada etapa de mi vida y cumplir todas las metas trazadas sin desfallecer. También a mis familiares, especialmente a mis padres Raul Rojas Guerrero y Ana María Santander por ser el motor en mi vida, por su esfuerzo y dedicación desinteresada a lo largo de toda mi vida, que hoy ayuda a culminar mi carrera universitaria.

Del mismo modo, a mi compañero y amigo Julio Enrique Olaya Madiedo por su amistad y su apoyo, a todos mis compañeros de la universidad que sin duda han aportado a mi crecimiento profesional.

Danna Camila Rojas Santander

A mis padres Clara Madiedo y Jairo Olaya por formarme, por darme esta oportunidad de crecer y ser una mejor persona, con su confianza, apoyo y esfuerzo he podido lograr esta meta en mi vida y ser profesional.

A mi abuela Clara Mahecha por su compañía, apoyo incondicional y motivación cada día.

A mi compañera Danna Rojas, amigos y demás personas que me acompañaron en este proceso, donde tuve muchas experiencias y vivencias que aportaron muchas cosas en mi vida.

Julio Enrique Olaya Madiedo

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a todos los docentes del programa de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia, en especial a nuestro director de tesis Ing. Héctor Camilo Higuera Flórez quien, con su gran experiencia, tiempo y conocimientos orientó este trabajo de grado.

También queremos agradecer al equipo de los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia y la Universidad Nacional de Colombia por la guía en la realización de las prácticas del presente trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	2
1 PRELIMINARES.....	4
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	4
1.1.1 ANTECEDENTES.....	4
1.1.2 JUSTIFICACIÓN.....	7
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.3 MARCO DE REFERENCIA	9
1.3.1 MARCO TEÓRICO.....	9
1.3.2 MARCO CONCEPTUAL	16
1.4 ESTADO DEL ARTE	19
1.5 OBJETIVOS	21
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES	22
1.6.1 ALCANCES	22
1.6.2 LIMITACIONES	22
1.7 METODOLOGÍA.....	23
1.7.1 FASE I.....	23
1.7.2 FASE II	23
1.7.3 FASE III	24
1.7.4 FASE IV	24
2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	25
2.1 AGREGADO FINO.....	25
2.1.1 GRANULOMETRÍA	26
2.1.2 MASA UNITARIA.....	27
2.1.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN	28

2.2	CEMENTO	29
2.2.1	DENSIDAD DEL CEMENTO	29
2.2.2	CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO.....	31
2.2.3	TIEMPOS DE FRAGUADO DEL CEMENTO.....	33
2.2.4	RESISTENCIA DEL CEMENTO	35
2.3	AGREGADO FINO PROVENIENTE DE RESIDUOS DE DEMOLICIÓN Y CONSTRUCCIÓN (RCD)	36
2.3.1	MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.....	36
2.3.2	GRANULOMETRÍA	37
2.3.3	DENSIDAD Y ABSORCIÓN	38
2.3.4	MASA UNITARIA.....	38
3	DISEÑO DE MEZCLA Y ELABORACIÓN DE MUESTRAS	38
3.1	DISEÑO DE MEZCLA	39
3.1.1	COMPOSICIÓN.....	39
3.2	ELABORACIÓN DE MUESTRAS.....	41
3.2.1	CUBOS DE MORTERO.....	41
3.2.2	CILINDROS DE MORTERO	42
3.2.3	PROCESO DE CURADO	43
4	CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS	44
4.1	PREPARACIÓN DE MUESTRAS	44
4.2	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NTC 220.....	44
4.3	PENETRACIÓN DE CLORUROS NT BUILD 492	46
4.4	RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL)	48
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
6.1	CONCLUSIONES.....	58
6.2	RECOMENDACIONES	60
7	BIBLIOGRAFÍA	61
8	ANEXOS	65

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 2-1 Resultados análisis granulométrico agregado fino.	26
Tabla 2-2 Curva de gradación agregado fino.....	27
Tabla 2-3 Resultados masa unitaria suelta y compactada agregado fino.....	28
Tabla 2-4 Resultados densidad y absorción agregado fino.	29
Tabla 2-5 Resultados densidad del cemento.....	30
Tabla 2-6 Resultados consistencia del cemento.....	32
Tabla 2-7 Resultados tiempo de fraguado.	34
Tabla 2-8 Resultados resistencia a la compresión del cemento	36
Tabla 2-9 Resultados análisis granulométrico RCD.....	37
Tabla 2-10 Resultados densidad y absorción RCD.	38
Tabla 2-11 Resultados masa unitaria RCD.....	38
Tabla 3-1 Diseño de mezcla 1.	40
Tabla 3-2 Diseño de mezcla 2.	40
Tabla 3-3 Diseño de mezcla 3.	40
Tabla 3-4 Diseño de mezcla 4.	41
Tabla 4-1 Resultados de resistencia a la compresión.....	45
Tabla 4-2 Resultado ensayo NT Build-492	48
Tabla 4-3 Resultados resistencia a la polarización.....	51
Tabla 5-1 Resistencia a la compresión de las 4 mezclas con diferente contenido de RCD.....	53

LISTA DE ILUSTACIONES

	pág.
Ilustración 1-1 Diagrama de torta de RCD por instituciones.	4
Ilustración 1-2 Proceso de corrosión.....	13

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1-1 Corrosión del acero.....	14
Imagen 2-1 Lavado de material.	25
Imagen 2-2 Preparación de la muestra de RCD en máquina de los ángeles.	36
Imagen 3-1 Determinación de la fluidez del mortero.....	39
Imagen 3-2 Moldes para cubos.....	42
Imagen 3-3 Cilindros de mortero.....	43
Imagen 4-1 Ensayo de compresión.	45
Imagen 4-2 Ensayo NT Build - 492.....	47

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1-1 % participación de RCD del aprovechamiento.	7
Gráfica 2-1 Penetración vs volumen.	32
Gráfica 2-2 Curva de gradación RCD.	37
Gráfica 4-1 Diagrama de la resistencia a la polarización.	49
Gráfica 5-1 Velocidad de corrosión para cada tipo de mezcla.	54
Gráfica 5-2 3 Contenido de RCD vs. Coeficiente de migración.	55
Gráfica 5-3 Dnssm vs resistencia a la compresión.	56

PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIANTE: DANNA CAMILA ROJAS SANTANDER **CÓDIGO:** 506586

ESTUDIANTE: JULIO ENRIQUE OLAYA MADIEDO **CÓDIGO:** 506219

DIRECTOR SUGERIDO: HÉCTOR CAMILO HIGUERA FLÓREZ

ALTERNATIVA: AUXILIAR DE INVESTIGACIÓN

INTRODUCCIÓN

La construcción es una de las actividades realizadas por el ser humano con más antigüedad y a la vez es el sector en el que menos se ha evolucionado respecto a la gestión ambiental con el paso del tiempo, esto porque el ser humano ha tenido poca consciencia frente al medio ambiente. Afortunadamente en los últimos años, se ha generado una mayor sensibilidad hacia el cuidado del medio ambiente y así mismo el interés en la sostenibilidad de las construcciones, esto ha llevado a la búsqueda de las problemáticas generadas por este sector y así mismo encontrar las posibles soluciones para combatir el daño causado. Se observó que una de las principales problemáticas ambientales que está generando la construcción es el mal uso de los residuos de construcción y demolición (RCD).

Los residuos de construcción y demolición poseen un gran potencial para ser reutilizados en la misma actividad, por esta razón se ve la necesidad de ampliar la investigación en este tema. Bien sabemos que hay recursos renovables y no renovables; Dentro de las materias primas usadas en la construcción se encuentran recursos no renovables como es la arena, de esto nace la idea de hacer reutilizable este recurso no renovable, y obtener de los RCD una arena reutilizada a la hora de hacer concreto. Esta iniciativa ayuda a mitigar o si es el caso a remover algunas de las principales consecuencias de los residuos mencionados como son: La contaminación del aire debido a las partículas de material fino que quedan sin uso y sin un correcto manejo de este, es decir, sin cubrimiento; Contaminación del agua que puede ser el mal manejo de las fuentes hídricas cercanas a la obra o el material sobrante en el que se haya utilizado el agua para mezcla; Contaminación del suelo sucede cuando hay rellenos, excavaciones, entre otras; y por último pero no menos importante la contaminación paisajística o también llamada contaminación visual, es todo aquello que perturba o irrumpe la estética de un paisaje o en este caso de una obra¹.

Ante este fenómeno las entidades nacionales tanto de Europa como de América han acudido a establecer reglamentos para el tratado de los residuos, debido a que estos residuos en muchas ocasiones estaban siendo desechados de manera incontrolada terminando así en vertederos, fuentes hídricas y en lugares

¹ (JUSTE, 2018)

inadecuados². Colombia por medio del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la Resolución 472 del 28 de febrero de 2017 y aplica a todas las personas naturales y jurídicas que generen, recolecten, transporten, almacenen, aprovechen y dispongan RCD de las obras civiles o de otras actividades conexas en el territorio nacional.

En el presente documento evaluaremos el comportamiento mecánico como lo es la resistencia y el comportamiento químico frente a los ataques de Cloruro del mortero con reemplazos de agregado fino procedente de los residuos de construcción y demolición (RCD) susceptibles de aprovechamiento provenientes de residuos pétreos no contaminados, más exactamente de concreto

² (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2017)

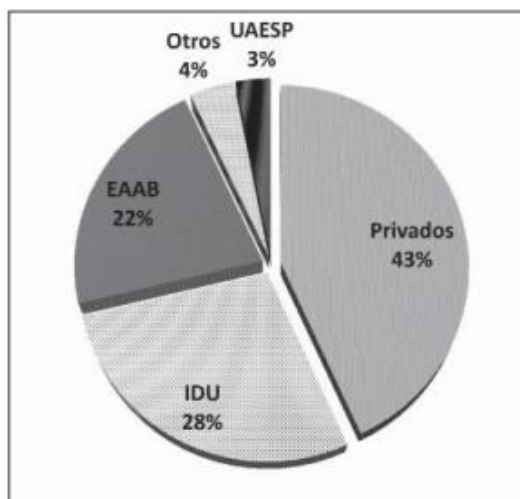
1 PRELIMINARES

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

1.1.1 Antecedentes

El sector de la construcción en la última década ha incrementado de forma exponencial y de la misma manera han incrementado los residuos de construcción y demolición (RCD), la Secretaria Distrital de Planeación y Ambiente de Bogotá da una estimación de 2 toneladas per cápita³, esta cifra es demasiado alarmante, ya que refleja la poca utilización de estos residuos y además si comparamos estas cifras con el promedio de países europeos como Dinamarca, Finlandia y Alemania⁴. Estos países representan esta misma cantidad, cabe resaltar que la cantidad antes expresada de Bogotá es solo de la capital del País, no se están teniendo en cuenta los residuos de construcción y demolición de ciudades con gran crecimiento como lo son Medellín y Cali. La Secretaría de Ambiente de Bogotá nos presenta un diagrama de torta en el que se desglosa el porcentaje de residuos que aportan las principales compañías de Bogotá⁵.

Ilustración 1-1 Diagrama de torta de RCD por instituciones.



Fuente: resolución 2397 de la secretaría de educación.

³ (ALCALDÍA DE BOGOTÁ - SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2011)

⁴ (SERVICE CONTRACT ON MANAGEMENT OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE, 2011)

⁵ (ALCALDÍA DE BOGOTÁ - SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2011)

Como se puede observar, las construcciones provenientes de empresas privadas son las que más aportan a este problema de residuos y muchas veces se depositan estos residuos en lugares inapropiados dañando la impresión paisajística y sobre todo empeorando la situación ambiental; El IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) quienes son los encargados de la realización de obras viales y espacios públicos en Bogotá son los segundos en aportar mayor cantidad de residuos.

En la resolución 2397 de 2011 "Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital". Menciona que todo ciudadano tiene derecho a gozar de un buen estado ambiental y también tienen el deber de proteger los recursos naturales y velar por conservar este bienestar; También informa que en el artículo 80 el Estado deberá realizar la planificación para el buen manejo y aprovechamiento de los recursos naturales y adicional a eso deberá controlar los factores del deterioro ambiental e imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados⁶.

Los RCD, residuos de construcciones y demoliciones según la resolución 1115 de 2012 de la Secretaría Distrital de Ambiente se pueden clasificar en dos grandes grupos: Residuos susceptibles de aprovechamiento y los no susceptibles de aprovechamiento.

Los residuos no susceptibles de aprovechamiento son aquellos materiales contaminados con residuos peligrosos o que estén en un mal estado y por esta razón, no puedan ser aprovechados. También se encuentran los residuos que tienen normas específicas de restricción como por ejemplo el Amianto, residuos electrónicos, biosanitarios, entre otros.

Los residuos susceptibles de aprovechamiento se dividen en dos categorías:

1. Residuos provenientes de tierras, es decir, excavación, nivelaciones y sobrantes de adecuación de terreno. También los residuos pétreos no contaminados.

⁶ (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2011)

Pétreos son aquellos residuos provenientes de: Hormigón, gravas, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos, entre otros.

Por lo contrario, los residuos no pétreos son provenientes de: Vidrios, aceros, hierros, yesos, etc.

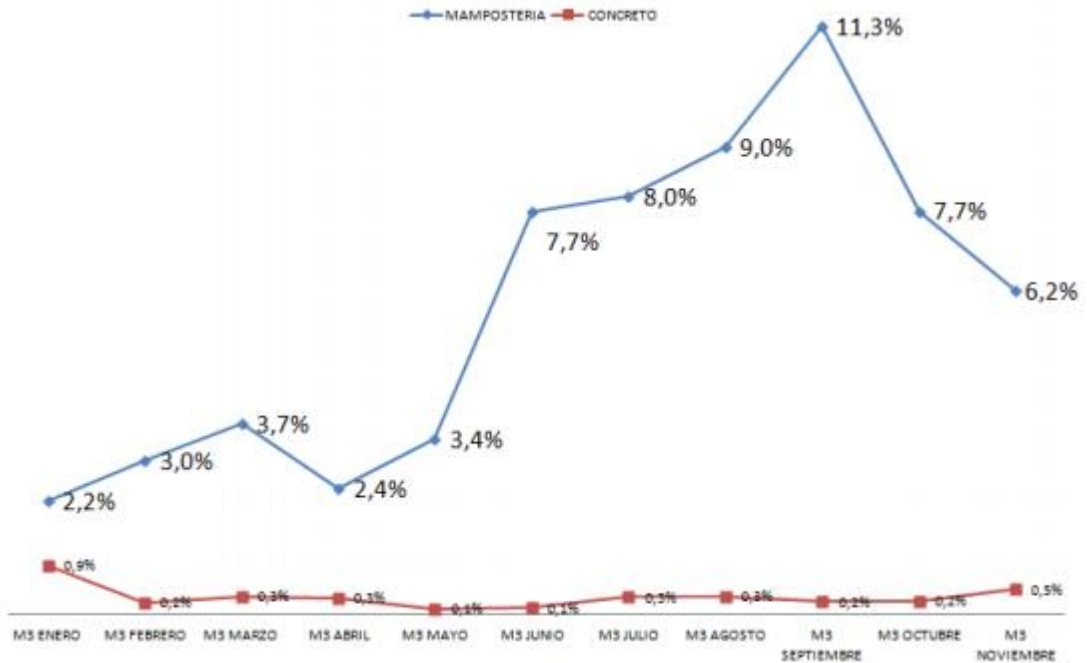
2. Productos usados para cimentaciones y pilotajes como arcillas, bentonitas y demás.

En el presente estudio, teniendo en cuenta la información anterior, se va a trabajar con residuos susceptibles de aprovechamiento provenientes de residuos pétreos no contaminados, más exactamente de los sobrantes de mezcla de concreto.

La empresa CEMEX líder global en la industria de materiales que han laborado por más de 100 años y que están ubicados en más de 50 países, proveen productos y soluciones al sector de la construcción; Participó en el Foro Internacional del Programa Basura Cero-Escombros Cero para la gestión y control de los residuos de la construcción y demolición (RCD), presentaron las cifras del manejo de RCD y la estimación para los próximos años.

Realizan un análisis en el año 2011 al material que ingresa de obra y se pudo concluir que de la mampostería y del concreto se recibe el 6% de la cantidad total de RCD que ingresan a la empresa. Como el interés de este estudio va orientado hacia este tipo de residuos, la empresa nos presenta la tasa mensual de aprovechamiento que realizaron tanto de mampostería como de concreto:

Gráfica 1-1 % participación de RCD del aprovechamiento.



fuelle: <http://ambientebogota.gov.co/documents/664482/0/Johao-Ariel-Cemex.pdf>

Teniendo en cuenta el panorama de la cantidad aprovechable de RCD se presenta este estudio como impulso para incrementar la reutilización de estos residuos⁷. En la gráfica se observa el bajo aprovechamiento de los residuos provenientes del concreto en comparación con los provenientes de la mampostería, por esta razón, este estudio se concentra únicamente en el análisis del comportamiento del mortero con arena de residuos de construcciones y demoliciones de concreto.

1.1.2 Justificación

Sabemos que en el proceso de construcción de obras civiles existen diferentes residuos de construcción y demolición como lo son de concreto, mampostería, asfalto, cerámica, heterogéneo entre otros. Nuestro estudio acerca del comportamiento mecánico y químico de un mortero haciendo uso de agregado fino provenientes de residuos de demolición y construcción específicamente de concretos, puede permitirnos analizar qué tan factible es el uso de RCD de concreto,

⁷ (VEGA GARCÍA, 2012)

para así contribuir al desarrollo de una construcción sostenible, minimizar el impacto medioambiental que producen este tipo de residuos y dar un valor añadido a este tipo de materiales poco usados. Cabe resaltar que el comportamiento de una estructura está fuertemente ligado a la calidad de los materiales que se utilicen en su construcción, el concreto es el material de construcción más usado en el mundo debido a su fácil y rápida preparación mientras se encuentra en su estado plástico, su alta resistencia al fuego y clima, la disposición de sus materiales constitutivos está disponibles a bajo costo, localmente o muy cerca del sitio con excepción del cemento y los aditivos, es por esto que también es importante hacer este tipo de investigaciones que hacen un aporte tecnológico al sector de la construcción.

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La construcción es una actividad que encontramos a grande o pequeña escala en cualquier parte del mundo esta actividad trae como consecuencia el consumo de recursos naturales y tiene como tal un impacto negativo en el medio ambiente, pero bien sabemos que el sector de la construcción también juega un papel importante en el desarrollo económico de un país es por esto que es importante garantizar la sustentabilidad de esta actividad. La creciente sensibilidad por el medio ambiente y recursos naturales nos hace pensar en la búsqueda de alternativas que mejoren el impacto que tiene esta actividad más específicamente en el manejo de los residuos de construcción y demolición (RCD) que se genera en la ejecución de obras civiles de construcción.

Los residuos de Construcción y Demolición (RCD) plantean una gran problemática ambiental debido a su cantidad y disposición inadecuada. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible nos ha dado a conocer las cifras recientes de escombros que produce el país, pero advirtió según un estudio realizado en el 2011, que entre las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali, Manizales, Cartagena, Pereira, Ibagué, Pasto, Barranquilla, Neiva, Valledupar y San Andrés, se generaron más de 22 millones de toneladas (tons) de Residuos de Construcción y Demolición (RCD); algo así como 445 mil bultos de cemento gris, cada uno con un peso de 50 kilogramos, la cantidad aproximada para construir 2.967 viviendas de interés social de 50 metros cuadrados⁸

⁸ (Revista ambiental catorce 6 , 2017)

Es por ello que ante esta problemática se hace necesario buscar una alternativa para llegar a una economía circular donde se pueda reciclar estos residuos de construcción y demolición que permitan al sector de la construcción un desarrollo sostenible para así minimizar la utilización de recursos naturales mediante la reutilización de estos mismos. El mayor porcentaje de RCD que se presenta es el de concreto es por esto que ante esta situación en este proyecto se plantea evaluar el comportamiento físico (resistencia) y químico (cloruros) que tiene un mortero con la implementación de agregados finos provenientes de RCD de concreto. De acuerdo a lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el comportamiento mecánico y ante el ataque de cloruros de morteros de cemento hidráulico con adición de residuos (RCD) provenientes de concreto?

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 Marco teórico.

1.3.1.1 Mortero.

El mortero en su definición más general es toda mezcla de un aglomerante, arena y agua. De acuerdo con su origen, los morteros pueden ser premezclados en planta, premezclados secos o elaborados en obra y de acuerdo con su dosificación ha sido costumbre hablar de morteros de relación 1:3 o 1:4 entre otros, queriendo indicar partes de cemento: arena⁹.

➤ Tipos de morteros

Atendiendo a su endurecimiento se pueden distinguir dos tipos de morteros: Los aéreos que son aquellos que endurecen al aire al perder agua por secado y fraguan lentamente por un proceso de carbonatación, y los hidráulicos que endurecen bajo el agua, debido a que su composición les permite desarrollar iniciales relativamente altas¹⁰.

⁹ (SALAMANCA CORREA, 2001)

¹⁰ (GUTIERREZ DE LÓPEZ, 2003)

Teniendo en cuenta los materiales que los constituyen pueden ser:

- Morteros calcáreos
- Morteros de yeso
- Morteros de cal y cemento
- Morteros de cemento

➤ **Usos del mortero**

Los morteros pueden tener una función estructural, y pueden usarse entonces en la construcción de elementos estructurales, o en la mampostería estructural en donde puede ser de pega o de relleno en celdas de muros¹¹.

Existen morteros que no tienen función estructural y se destinan a recubrimiento como pañetes.

- Mortero de pega
- Mortero de relleno
- Morteros de recubrimiento

➤ **Propiedades del mortero fresco**

Consistencia:

La consistencia de un mortero define la manejabilidad o trabajabilidad del mismo. En algunos manuales se denomina plasticidad, pero este es un grado de consistencia. La consistencia adecuada se consigue en obra mediante la adición de cierta cantidad de agua que varía en función de la granulometría del mortero, cantidad de finos, empleo de aditivos, absorción de agua de la base que se aplica, así como las condiciones ambientales¹².

¹¹ (GUTIERREZ DE LÓPEZ, 2003)

¹² (RODRÍGUEZ MORA, 2003)

Plasticidad

La plasticidad es la condición del mortero que le permite deformarse continuamente sin romperse. De la plasticidad depende lograr una buena unión entre los elementos constructivos y disminuir a penetración de agua en los cerramientos terminados. La determinación de la plasticidad se puede considerar haciendo medidas de consistencia en cono de Abrams y limitando el contenido de finos¹³.

Retención de agua

Se refiere a la capacidad del mortero de mantener su plasticidad cuando queda en contacto con la superficie sobre la que va a ser colocado. La retención de agua influye en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final, pues un mortero que no retenga el agua no permite la hidratación del cemento¹⁴.

➤ Propiedades Del Mortero Endurecido

Retracción

Se debe principalmente a la retracción de la pasta de cemento y se ve aumentada cuando el mortero tiene altos contenidos de cemento. Para mejorar esta retracción y evitar agrietamientos es conveniente utilizar arenas con granos de textura rugosa, y tener en cuenta además que en clima caliente y de muchos vientos, el agua tiende a evaporarse más rápidamente produciendo tensiones internas en el mortero, que se traducen en grietas visibles. La retracción es proporcional al espesor de la capa, a la riqueza en cemento de la mezcla y a la mayor absorción de la pared sobre la que se vaya a aplicar¹⁵.

Adherencia

Es la propiedad que poseen los morteros de adherirse a los materiales con los cuales están en contacto (piedra, ladrillos, acero, etc.). Esta es para muchos autores, investigadores, profesores, constructores y albañiles la propiedad

¹³ (ARTIGAS)

¹⁴ (GUTIERREZ DE LÓPEZ, 2003)

¹⁵ (GUTIERREZ DE LÓPEZ, 2003)

fundamental que deben cumplir los morteros, aunque son pocos los que han realizado un trabajo de investigación o técnico para determinar que valores de resistencia deben alcanzar los mismos¹⁶.

Durabilidad

Al igual que en el concreto un mortero es durable cuando puede resistir en forma satisfactoria las condiciones a que estará sujeto, tales como: la meteorización, la acción química y el desgaste. Es indispensable que este resista, sin deteriorarse con el tiempo, las condiciones para las cuales se ha proyectado¹⁷.

Corrosión

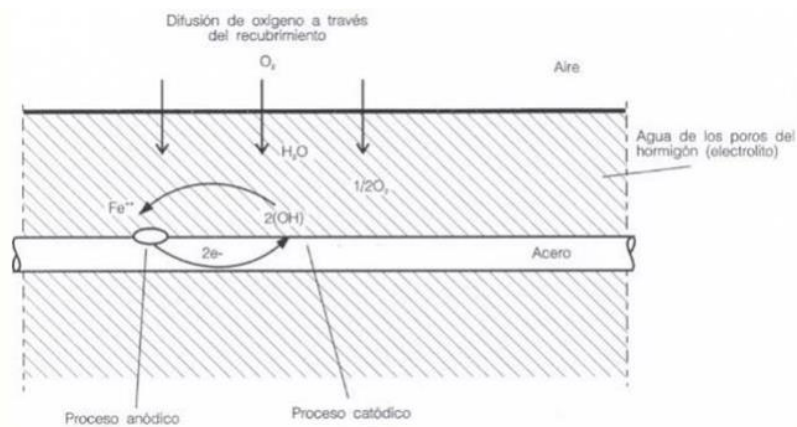
La corrosión se produce mediante un mecanismo electroquímico o galvánico provocado por la presencia de agua y oxígeno dentro del hormigón. Puede estar influenciado por distintos factores como las características propias del concreto, el recubrimiento del concreto reforzado, la temperatura, entre más temperatura, más rápido se produce el proceso de oxidación y la presencia de cloruros que aceleran el proceso de corrosión.¹⁸

¹⁶ (La adherencia en los morteros de albañilería, 1995)

¹⁷ (ING. RIVERA L)

¹⁸ (AMADOR, 2014)

Ilustración 1-2 Proceso de corrosión.



Fuente: <https://masqueingenieria.com/blog/corrosion-acero-hormigon-armado/>

Existen métodos como el de resistencia a la polarización para determinar la velocidad de corrosión, este método ha sido utilizado por varios años para determinar las velocidades de corrosión, la mayoría de veces se encuentra expresada en mili-pulgadas por año (mpy). Dichas mediciones se pueden obtener rápidamente, normalmente en menos de 10 minutos. Durante años de investigación científicos observaron experimentalmente el grado de polarización en una determinada corriente aplicada fue mayor a una velocidad de corrosión. Además, se pudo observar una aparente linealidad en el origen de la curva de polarización, por lo tanto, la pendiente de la curva lineal es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión.¹⁹

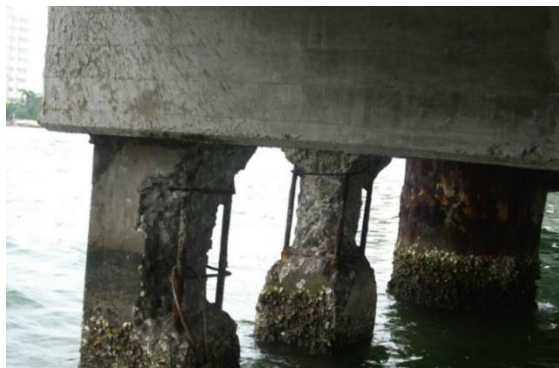
1.3.1.2 Ataque de cloruros

Sabemos que el concreto o mortero tiene propiedades químicas dentro de ellas se encuentra la durabilidad nombrada anteriormente que la definimos como la habilidad para resistir, en nuestro caso resistir a el ataque químico donde encontramos el ataque por cloruros. Los cloruros se hallan normalmente en el ambiente de las zonas cercanas al mar, en el agua marina, y en ciertos suelos y aguas contaminadas de manera natural o artificial.

¹⁹ (Obtención de curvas galvanostáticas y ensayos de resistencia a la polarización en varillas de construcción ASTM A42 en solución de agua al 3.5% de cloruro de sodio., 2017)

El concreto es penetrado por los iones cloruros debido a su propia naturaleza de material compuesto constituido principalmente por una fase solida formada por áridos, los que están envueltos en una matriz porosa, que se forma al reaccionar con el agua y el cemento²⁰. El ion cloruro al penetrar el concreto genera corrosión en el acero de refuerzo y posteriormente generando en el concreto desintegración, erosión, corrosión y expansión disminuyendo la vida útil y su óptimo funcionamiento.

Imagen 1-1 Corrosión del acero.



Fuente: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/corrosion-del-acero-de-refuerzo>

La corrosión por cloruro, se produce por la presencia del ión cloruro que se encuentra en el agua o en la niebla marina, que actúa como un catalizador para la oxidación, tomando parte activa en la reacción. Al oxidar al acero para formar el ion complejo cloruro férrico, (FeCl_2), arrastra este ion inestable en la solución, donde reacciona con los iones hidroxilo disponibles para formar hidróxido de hierro. $\text{Fe}(\text{OH})_2$ que libera iones cloruro y consume iones hidroxilo.²¹

1.3.1.3 Residuos de construcción y demolición (RCD)

De acuerdo con el Decreto 586 de 2015 y a la Resolución 01115 de 2012, se tendrán en cuenta las siguientes definiciones:

²⁰ (Influencia de la penetración de iones cloruros en el hormigón armado a diferentes relaciones agua/cemento y condiciones de exposición, 2005)

²¹ (CASAS ARCHILA, 2010)

RCD se refiere a los Residuos de Construcción y Demolición que se generan durante el desarrollo de un proyecto constructivo. Estos RCD son **susceptibles de aprovechamiento** cuando se trata de:

- Materiales producto de excavación, nivelaciones y sobrantes de la adecuación del terreno: tierras y materiales pétreos no contaminados productos de la excavación.
- Productos o materiales usados para cimentaciones y pilotajes: Arcillas, bentonitas y demás.
- Materiales pétreos como hormigón, arenas, gravas, gravillas, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos.
- Materiales no pétreos como vidrios, aceros, hierros, madera, plásticos, metales, cartones, yesos, dry wall.

Los residuos **no susceptibles de aprovechamiento** son:

- Materiales aprovechables contaminados con residuos peligrosos.
- Materiales que por su estado no pueden ser aprovechados.
- Residuos peligrosos. Este tipo de residuo debe ser identificado y manejado de acuerdo a los protocolos establecidos para cada caso.
- Amianto, asbesto cemento (tejas de Eternit) electrónicos, biosanitarios. (Secretaría distrital del medio ambiente)

Tipología y producción de RCD

A partir de los RCD convenientemente gestionados y tratados en plantas de reciclaje autorizadas se pueden obtener áridos reciclados para su empleo en obras de ingeniería civil o edificación. Las plantas de tratamiento de RCD son aquellas instalaciones acondicionadas con la máquina y equipos específicos para el reciclaje de RCD, que disponen de sistemas de control de calidad, para maximizar el valor añadido de los áridos reciclados.

El principio básico de una planta de tratamiento de RCD es la separación y liberación de los elementos que componen el todo-uno y su agrupación en forma homogénea, con vistas a su reutilización, reciclaje, valorización o deposición de forma controlada.

De acuerdo a su movilidad, las plantas de tratamiento pueden clasificarse en móviles, semimóviles o fijas. Las plantas móviles y semimóviles se encuentran destinadas a reciclar en obra, mientras que las plantas fijas necesitan unas instalaciones propias y terrenos que se traducen en una inversión elevada.

1.3.2 Marco conceptual

Cemento

El cemento es un polvo fino que se obtiene de la calcinación a 1,450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. Es el material de construcción más utilizado en el mundo. Aporta propiedades útiles y deseables, tales como resistencia a la compresión, durabilidad y estética para un sinfín de aplicaciones a la construcción²²

Mortero

Es la mezcla entre cemento, agua y arena; Son utilizados especialmente en mampostería para actividades como: Pegar ladrillos, realizar pañete y sobre todo para dar un acabado final a muros y paredes, también en los que se desea colocar una plantilla para la colocación de pisos y relleno de celdas²³.

²² (CEMEX)

²³ (ARGOS)

Concreto

Es la mezcla entre agua, cemento (o material cementante), agregados finos (la mayoría de las veces arena) y agregados gruesos (grava). Al solidificarse constituye uno de los materiales más resistentes en la construcción.

La diferencia entre mortero y el concreto es que el concreto posee los agregados gruesos, mientras que el mortero no tiene agregados gruesos.²⁴

Agregado

Es el material granular tanto fino como por ejemplo la arena y grueso como por ejemplo piedra o grava, que es utilizado para complementar la formación de mortero y concreto. Son minerales comunes que se pueden obtener debido a las fuerzas geológicas, erosivas del agua y del viento.²⁵

Curado

Es el tratamiento que se le da al hormigón, mortero o concreto, después de su colocación con el fin de mantener húmedas sus superficies, esto ayuda a impedir la rápida evaporación del agua de amasado. Esta tarea suaviza la retracción del material y evita su agrietamiento por desecación brusca.²⁶

Fraguado

Es el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del hormigón (o mortero de cemento), producido por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos —procedentes de la reacción química del agua de amasado— con los óxidos metálicos presentes en el Clinker que compone el cemento²⁷.

²⁴ (CONCEPTO-DEFINICIÓN)

²⁵ (FERREX)

²⁶ (PARRO)

²⁷ (PARRO)

RCD

Residuos de construcción y demolición: Son los residuos generados por la construcción, reparación o demolición de todo tipo de obras civiles, anteriormente a estos residuos se les conocía como *escombros*.

Aprovechamiento

Es el proceso en el cual, se hace una recuperación de los materiales provenientes de los residuos de construcción y demolición (RCD), y se realiza su reincorporación nuevamente a la producción mediante procesos de reutilización y reciclaje²⁸.

Reutilización

Es una alternativa para el tratamiento de los residuos obtenidos de las obras de construcción con la cual se pretende mitigar el impacto ambiental, ya que lo que se busca es volver al residuo en un material sin afectar su composición para que funcione en el proceso de producción con los demás materiales.

Reciclaje

Es el proceso mediante el cual se aprovechan y transforman los escombros recuperados y se devuelve a los materiales su potencialidad de reincorporación como materia prima para la fabricación de nuevos productos. En el reciclaje se realiza un tipo de transformación en las propiedades del residuo para luego poder ser reutilizado²⁹.

²⁸ (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2011)

²⁹ (OBSERVATORIOS AMBIENTALES URBANOS)

1.4 ESTADO DEL ARTE

En el transcurso del tiempo se han desarrollado diferentes investigaciones y estudios acerca del uso de residuos de construcción y demolición (RCD) en morteros y/o concretos con el fin de evaluar su comportamiento. A continuación, se resaltan algunas de ellas:

En la Universidad Estatal de Feira de Santana en Brasil, estudiantes examinaron la resistencia mecánica, propiedades físicas y la contracción por secado de mortero, a partir de residuos de construcción y demolición (RCD) que contiene mortero (55%), de cerámica (26%) y concreto (16%). Después de realizar los diferentes ensayos concluyeron que los morteros reciclados presentan mayor porosidad total, velocidad de absorción y contracción por secado³⁰.

En Madrid, España estudiantes de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid realizaron una investigación enfocada en estudiar la viabilidad de incorporar fracción fina de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en morteros de albañilería, utilizando tres muestras de agregados reciclados finos: uno a partir de hormigón, uno de reciclaje de cerámica y uno de la línea de reciclaje mixto. Para la obtención de resultados realizaron ensayos de compresión y resistencia a la flexión, resistencia de la unión y contracción y los llevaron a concluir que los morteros con agregados finos reciclados tenían un peor rendimiento en comparación a un mortero con arena natural, sin embargo, los valores obtenidos se encontraron dentro de los límites establecidos por la norma respectiva de su país. Por lo tanto, el estudio demostró la posibilidad de sustituir la arena con áridos reciclados en la producción de mortero³¹.

Por otro lado, en la Universidad de Córdoba en España un estudiante presentó en su tesis doctoral el uso de la fracción fina de los residuos de construcción y demolición (RCD) en la fabricación de morteros de albañilería utilizando dos tipos de áridos reciclados, uno procedente de residuos de hormigón (FRCA) y otro de residuos mixtos de tabiquería con un alto porcentaje de ladrillo rojo cerámico (FMRA).

³⁰ (LOPES LIMA, y otros, 2012)

³¹ (SAIZ MARTÍNEZ, y otros)

Dicha investigación se realizó a partir de tres fases, en la primera se estudiaron propiedades del mortero fresco y endurecido fabricado con FRCA en diferentes porcentajes de agregado reciclado (0%, 5%, 10%, 20% y 50%) y se evaluaron las propiedades a corto y a largo plazo de morteros de baja resistencia. En la segunda fase se fabricaron morteros de mayor resistencia utilizando FMRA, en esta fase se llevaron a cabo sustituciones de arena natural por arena reciclada (0%, 25%, 75%, y 100%). Por último, en la tercera fase se sustituyó un 100% de arena natural por FRCA. Como conclusión de la tesis se dijo que podían admitirse tasas de sustitución de hasta un 50% de arena natural por árido reciclado en morteros de albañilería para usos de interior sin que sus propiedades puedan verse afectadas significativamente³².

En la universidad politécnica de Catalunya estudiantes valoraron la influencia y el impacto de los áridos reciclados en la durabilidad del hormigón reciclado, con relación a la penetración de cloruros, para estudiar dicha fijación de cloruros, sometieron muestras a una inmersión en una solución de cloruro de sodio durante 35, 50 y 90 días. Seguidamente determinaron la cantidad de cloruros totales y para completar el estudio realizaron sesiones de microscopia electrónica que permite ver las consecuencias de este ataque con cloruros. Pudieron concluir que no ha habido evidencias que la presencia de áridos reciclados en los hormigones influya en su durabilidad, al permanecer constante la resistencia a la penetración de cloruros.³³

Un artículo arbitrario realizado por la empresa Ingeniería investigación y tecnología demuestra un sistema para monitorear la evaluación de corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro (proceso que se realizará en el presente estudio). En este artículo se sometieron las probetas de concreto reforzado a unas condiciones determinadas simulando el ambiente marino, el cual posee una saturación de 3.5% de ion cloruro. El sistema desarrollado se compone por un equipo que los integrantes del proyecto modificaron para realizar este experimento, encontraron que con este equipo se logra monitorear los potenciales de corrosión de forma remota y estable. El equipo es bastante versátil en cuanto a su lugar de ubicación. (Diseño de sistemas de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión

³² (FERNÁNDEZ LEDESMA, 2016)

³³ (VIDAL LESCUYER, 2015)

en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro, 2015).³⁴

Como podemos evidenciar existen diferentes estudios acerca del comportamiento mecánico de morteros y/o concretos haciendo uso de fracción fina de diferentes tipos de residuos de construcción y demolición. Pero aún existen brechas y pocas fuentes en el estudio del comportamiento químico de estos ante los diferentes ataques químicos existentes, como la implementación de otros métodos y la utilización de diferentes porcentajes de RCD para evaluar su comportamiento. Es por esto que este trabajo de investigación se basara en estudiar el comportamiento mecánico y químico de ataque por ion cloruro de morteros elaborados a partir de agregado fino a partir de residuos de construcción y demolición (RCD) procedente de residuos pétreos en diferentes porcentajes y haciendo uso de ensayos de laboratorio.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Determinar la influencia de los residuos de construcción y demolición (RCD) susceptibles de aprovechamiento provenientes de residuos pétreos no contaminados, más exactamente de concreto en el comportamiento mecánico y la durabilidad en relación a la penetración de cloruros en muestras de mortero.

1.5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los agregados a usar, provenientes de los residuos de construcción y demolición de concreto.
- Elaborar muestras con implementación de agregados RCD de concreto en el mortero, cada muestra con diferentes porcentajes en su estructura; para así identificar la influencia del agregado en su estructura.

³⁴ (Diseño de sistemas de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro, 2015)

- Evaluar las propiedades mecánicas, especialmente la resistencia a compresión que posea el mortero con los agregados reciclados.
- Evaluar las propiedades químicas que posea el mortero, específicamente al ataque de los iones Cloruro y velocidad de corrosión.
- Analizar los resultados obtenidos en el estudio y determinar el comportamiento de los agregados reciclados en el mortero.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.6.1 Alcances

El proyecto tiene como alcance el determinar el comportamiento de un mortero compuesto por agua, concreto hidráulico y agregados reciclados provenientes de los residuos de construcción y demolición (RCD). Se realizará la evaluación de propiedades mecánicas a las muestras del mortero anteriormente mencionado; enfáticamente en la resistencia a compresión. Por otra parte, las propiedades químicas que se evaluarán, serán las reacciones al ataque de los iones Cloruro y velocidad de corrosión, que son muy comunes en ambientes marítimos, como por ejemplo por el contacto con el agua del mar o simplemente con la brisa marina.

1.6.2 Limitaciones

Este proyecto está enfocado en el análisis del comportamiento del mortero con las especificaciones dadas, frente a las propiedades mecánicas en estudio como lo es la resistencia a la compresión, se evalúa solamente esta propiedad debido a que el tiempo de análisis es muy reducido por la situación de salud pública por la que se está pasando en este momento. Para la valoración de la influencia que poseen los RCD de concreto en las muestras del mortero que son sometidas a los ataques químicos de iones Cloruro, se deben realizar las pruebas en la Universidad Nacional de Colombia debido a que allí se encuentran las herramientas necesarias para llevar a cabo la prueba; y así tener resultados concisos y verídicos.

1.7 METODOLOGÍA

1.7.1 Fase I

Se inicia con la recopilación de la información y revisión bibliográfica del tema a tratar. Se continua con la obtención del cemento, la arena y los residuos de construcción y demoliciones (RCD) provenientes del concreto, los cuales son obtenidos en el *Centro de tratamiento, aprovechamiento y disposición final de RCD Cemex* ubicada en Bogotá, para la realización de las muestras de mortero.

1.7.2 Fase II

Una vez obtenidos los materiales se procede a realizar una caracterización de cada uno de estos (agregado fino, cemento y RCD), dentro de los ensayos para caracterizar los materiales encontramos granulometría, masa unitaria, densidad y absorción para los agregados finos y para el cemento densidad, consistencia normal, tiempos de fraguado y resistencia. Estos procedimientos se llevarán a cabo en los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia en la ciudad de Bogotá D.C.

Se procede a realizar un diseño de mezcla y las muestras con el porcentaje de agregado RCD de la siguiente manera:

1. Con 0% de agregado fino de RCD proveniente de concreto en reemplazo de arena.
2. Con 17% de agregado fino de RCD proveniente de concreto en reemplazo de arena.
3. Con 34% de agregado fino de RCD proveniente de concreto en reemplazo de arena.
4. Con 50% de agregado fino de RCD proveniente de concreto en reemplazo de arena.

Se escogieron estos porcentajes porque se conoce por antecedentes que al usar el agregado reciclado de RCD en un 100% la mezcla va a tener un comportamiento bastante deficiente.

Se elige que la muestra posea un máximo del 50% (correspondiendo a la proporción de 3/6) de agregado reciclado debido a que en este rango medio (0-50%) no se posee conocimiento claro del comportamiento del mortero con estas características. Las muestras 2 y 3 corresponden respectivamente a la proporción 1/6 y 2/6.

1.7.3 Fase III

Con las muestras necesarias se procede a realizar los siguientes ensayos:

- Resistencia a la compresión, para el desarrollo de este ensayo se tendrá en cuenta la NTC 220 *Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos*.
- Penetración de cloruros NT BUILD 492. Se realiza este ensayo para analizar el fenómeno de la corrosión tanto en concreto como en mortero, el interés en este ensayo se debe a que los iones cloruro están presentes abundantemente en la naturaleza limitando la vida útil de las estructuras.
- Resistencia a la polarización lineal donde se conocerá la velocidad de corrosión de cada una de las muestras.

1.7.4 Fase IV

Al finalizar las pruebas de laboratorio, con la recopilación de datos que se obtuvo de los ensayos mencionados anteriormente en la Fase III, se inicia la elaboración del análisis y la determinación del comportamiento e influencia del uso de los agregados reciclados de Residuos de Construcciones y Demoliciones (RCD) provenientes del concreto para ver cómo afectan los cloruros al mortero y en qué medida lo afectan.

2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Para la elaboración de las muestras de mortero, se empleó arena de río, cemento Argos y residuos de demolición y construcción provenientes de concreto obtenido del *Centro de tratamiento, aprovechamiento y disposición final de RCD Cemex*, en la ciudad de Bogotá, Colombia, los cuales fueron transportados y acopiados en la Universidad Católica de Colombia, para realizar la respectiva caracterización de cada uno de estos materiales y así, posteriormente realizar los respectivos ensayos.

2.1 AGREGADO FINO

Se procedió a lavar la muestra evitando la pérdida de material haciendo uso de una tara y agua hasta obtener una muestra libre de polvo o suciedad. Posteriormente se colocó la muestra húmeda en el horno durante 24 horas a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$ para su secado.

Imagen 2-1 Lavado de material.



Fuente: Elaboración propia.

2.1.1 Granulometría

La granulometría consiste en separar una muestra a través de una serie de tamices de aberturas que se van reduciendo para la determinar las cantidades y los tamaños de las partículas que conforman el material. Este ensayo se realizó según la NTC 77 *Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*.

El proceso adecuado del ensayo se realiza después de obtener una muestra del material seco pesada, pasando por diferentes tamices con diámetros de abertura cada vez menores, reteniendo cantidades del material pesado, para así determinar su caracterización y poder realizar una curva granulométrica como lo determina la norma.³⁵

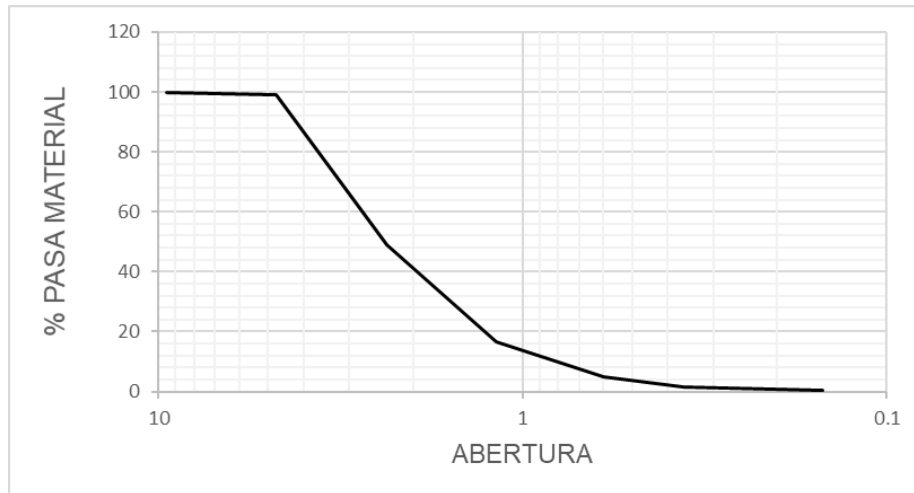
Tabla 2-1 Resultados análisis granulométrico agregado fino.

ANALISIS GRANULOMETRICO AGREGADO FINO					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	%Acumulado	% Pasa
3/8	9.52	0	0	0	100
4	4.76	3.23	1.09	1.09	98.91
8	2.36	148.322	49.95	51.04	48.96
16	1.18	95.7	32.23	83.27	16.73
30	0.60	34.64	11.67	94.94	5.06
50	0.36	10.12	3.41	98.35	1.65
100	0.15	3.3	1.11	99.46	0.54
Fondo		1.61	0.54	100.00	0.00
Total		296.922			

Fuente: Elaboración propia.

³⁵ (NTC 77, 2007)

Tabla 2-2 Curva de gradación agregado fino.



Fuente: elaboración propia

2.1.2 Masa unitaria

Permite determinar la masa unitaria compacta y la masa unitaria suelta. El procedimiento está descrito por la norma NTC 092 *Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados*, se basa en llenar una tercera parte del molde con la muestra y se debe apisonar con 25 golpes haciendo uso de una varilla de apisonamiento uniformemente sobre la superficie. Se realiza este mismo procedimiento llenándolo dos terceras partes del molde y por último se llena completamente y se nivela la superficie del agregado con una plantilla recta.³⁶ Se emplean las fórmulas que se presentan a continuación para determinar masa unitaria suelta y apisonada:

Ecuación 2-1

$$M = \frac{W_{mm} - W_m}{V}$$

Donde:

W_{mm} = Peso del material y el molde

W_m = Peso del molde.

³⁶ (NTC 92, 1995)

$$V = \text{Volumen del molde (0.00302 m}^3\text{)}$$

Tabla 2-3 Resultados masa unitaria suelta y compactada agregado fino.

Arena	
Volumen	0.00302 m ³
Masa Unitaria Compacta	1580,46 kg/m ³
Masa Unitaria Suelta	1389,07 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

2.1.3 Densidad y absorción

Una de las propiedades físicas de los agregados es la densidad. De acuerdo a los tipos de agregados se encontrarán partículas con poros saturables como no saturables que de acuerdo a su permeabilidad pueden estar vacíos parcialmente saturados o llenos de agua, generando una serie de humedad y densidad.

El procedimiento se realizó de acuerdo a la NTC 237 *Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino*, este ensayo consiste en secar una muestra de agregado fino en un recipiente hasta llevarla a una temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$. Se deja enfriar la muestra y se sumerge en agua durante $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$, pasado este periodo de tiempo; se decanta el exceso de agua evitando que se pierda material y se extiende sobre una superficie plana y no absorbente al aire libre con el fin de que el agregado llegue a un estado saturado superficialmente seco (SSS). Para corroborar que la muestra se encuentre en este estado, se emplea un cono con el diámetro superior hacia abajo en una superficie lisa no absorbente y se llena con el agregado en tres capas, por cada una realizando 25 golpes con el pisón. Se remueven los excesos de material en la superficie y se enrasa. Cuando se levante el cono y el agregado fino se asiente levemente esto indicara que ha alcanzado la condición superficialmente seca.

Teniendo la muestra superficialmente seca, se llena un picnómetro parcialmente con agua. Se introducen $500\text{ g} \pm 10$ del agregado y se llena con agua aproximadamente 90%, se deben sacar los vacíos del picnómetro. Se toma el peso del picnómetro con la muestra y el agua. Luego se vacía la muestra y es llevada al

horno a 110±5 °C durante 24 horas, pasado este tiempo se toma el peso en seco del material. Con los datos obtenidos se emplean las siguientes formulas:

Ecuación 2-2

$$D = 0.9975 * \frac{A}{(B + S - C)}$$

Donde:

D = densidad

A = masa en el aire de la muestra secada al horno.

B = masa del picnómetro lleno con agua.

S = masa de la muestra SSS.

C = masa del picnómetro con la muestra y El Agua.

Ecuación 2-3

$$Absorción \% = \left[\frac{(S - A)}{A} \right] * 100$$

Tabla 2-4 Resultados densidad y absorción agregado fino.

Resultados densidad y absorción	
Absorción (%)	2.12
Densidad (gr/cm3)	2.40

Fuente: Elaboración propia

2.2 CEMENTO

2.2.1 Densidad del cemento

Para obtener la densidad del cemento se realiza el ensayo descrito en la Norma Técnica Colombiana NTC 221 *Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico*. La finalidad de conocer la densidad del cemento es que, al combinar el cemento con otro material, se pueden obtener otro tipo de

características del mismo. Para realizar el ensayo se necesitan los siguientes datos de entrada: Peso de la muestra y temperatura ambiente.

La prueba comienza por verter un líquido en el que la densidad sea mayor a 0.73 g/cm³ en el frasco de Le Chatelier hasta el punto indicado que está entre cero y un milímetro. Este líquido debe estar a 21°C para alcanzarla, se realiza por el método baño de maría.

Se pesan 64 gramos de cemento y se agregan al frasco con Kerosene a la temperatura mencionada. Se toma la lectura del volumen desplazado después de agregar el cemento y se opera de la siguiente manera:

Ecuación 2-4

$$GE = \frac{m}{v}$$

Donde:

GE: Gravedad específica (g/cm³)

M: Masa del cemento (g)

V: Volumen desplazado (cm³)

$$GE = \frac{64}{21.2}$$

$$GE = 3.02 \text{ g/cm}^3$$

Tabla 2-5 Resultados densidad del cemento.

Prueba	1	2	3
Peso del cemento (g)	64	64	64
Volumen inicial líquido (cm ³)	0	0	0
Volumen final líquido (cm ³)	21,2	21,5	21
Temperatura (°C)	21	21	21
Densidad (g/cm ³)	3,02	2,98	3,05

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12-3 se plasman los resultados de la prueba de densidad del cemento, se realizaron tres veces el mismo ensayo para comprobar veracidad y similitud de los resultados. Se usa la media de estos ensayos:

$$D = 3.01 \text{ g/cm}^3$$

Y se halla la desviación estándar (σ) para identificar que tan dispersos están los datos de las pruebas respecto a la media:

$$\sigma = 0.036$$

2.2.2 Consistencia normal del cemento

Para conocer la consistencia normal del cemento con el que estamos trabajando, se realiza el procedimiento descrito en la NTC 110C *Consistencia normal del cemento hidráulico*. Se obtendrá por medio del aparato de Vicat.

La temperatura a la que se debe realizar el procedimiento debe estar entre los 20°C y 27°C, en el laboratorio la temperatura de ambiente era de 21°C, por lo tanto, se cumple en ese aspecto.

Se prepara la pasta de cemento con 650g de cemento. Comenzando con agregar agua al tazón de ensayo y luego se agrega el cemento, se espera un lapso de 30 segundos para que este logre absorber el agua y se comienza a mezclar.

Con las manos se toma la pasta de cemento lograda y se le da gorma de bola, se coloca en la base del molde hasta que esté lleno. Se retiran los excesos y se ubica en la base del aparato Vicat, la aguja del aparato debe estar en la superficie del cemento para ser soltada. Después de 30 segundos de haber sido soltada se toma la lectura. Se realizaron tres pruebas, cada una con diferente cantidad de agua para lograr el procedimiento de una mejor manera.

Los cálculos se realizan así:

Ecuación 2-5

$$P = Lf - Li$$

Donde:

P: Penetración (mm)

Li: Lectura inicial (mm)

Lf: Lectura final (mm)

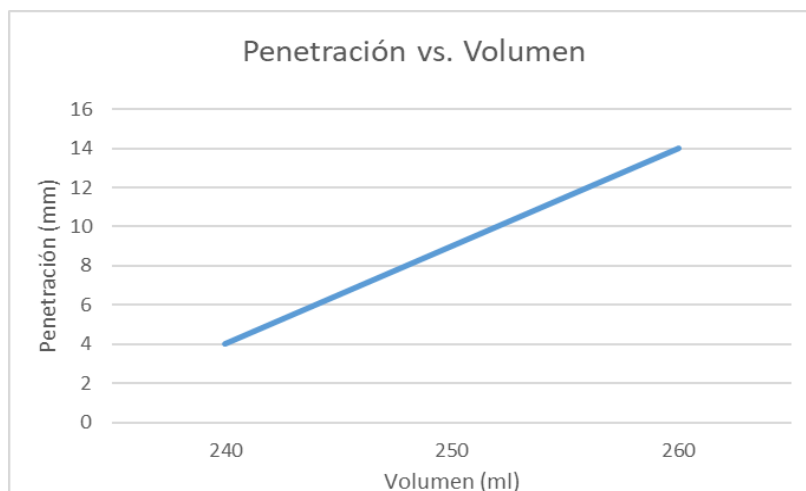
Tabla 2-6 Resultados consistencia del cemento.

Consistencia del cemento			
Prueba	1	2	3
Volumen de agua (ml)	240	250	260
Peso de agua (g)	240	250	260
Peso de cemento (g)	650	650	650
Lectura inicial, Li (mm)	0	0	0
Lectura final, Lf (mm)	4	9	14
Penetración (mm)	4	9	14

Fuente: Elaboración propia

Se grafica la relación volumen versus penetración para encontrar el valor del volumen para la penetración de 10 milímetros.

Gráfica 2-1 Penetración vs volumen.



Fuente: Elaboración propia

Se obtiene que para 10 milímetros de penetración se requiere 252 mililitros de agua. Se procede a obtener la relación agua-cemento:

$$\begin{aligned} \text{Relación agua cemento} &= \frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} \\ \text{Relación agua cemento} &= \frac{252}{650} \\ \text{Relación agua cemento} &= 0.39 \end{aligned}$$

A medida que la relación agua cemento sea mayor, mayor resistencia va a tener. Por lo tanto, el valor obtenido es un buen indicador.

2.2.3 Tiempos de fraguado del cemento

Los tiempos de fraguado del cemento se realizan bajo la indicación de la norma del Instituto Nacional de Vías INV E – 305 – 07, esta norma tiene como objeto establecer el método de ensayo para determinar el tiempo del fraguado del cemento mediante el aparato de Vicat también usado en el ítem anterior para la consistencia normal del cemento.

El procedimiento se debe realizar en una temperatura entre 20°C y 27°C, y en el laboratorio donde se realizó la prueba la temperatura ambiente era de 21°C dentro del rango. Se prepara la pasta de cemento de la misma manera que para la consistencia normal. La muestra se debe ingresar al cuarto húmedo a una temperatura de 23°C durante 30 minutos después de moldeada. La aguja debe tener un diámetro de 1 milímetro. Se dejará caer la aguja dejando que penetre por 30 segundos y se toma la lectura. Se continúa haciendo este proceso varias veces teniendo en cuenta que cada penetración debe hacerse a 6 milímetros de distancia mínimamente. Se toma nota de todas las penetraciones. Interpolando se determina el tiempo para una penetración de 25 milímetros, el cual indica el tiempo de fraguado.

Se obtuvieron los siguientes datos en el ensayo:

Tabla 2-7 Resultados tiempo de fraguado.

Tiempo de fraguado	
t (min)	Penetración (mm)
0	40
30	40
60	40
90	40
105	40
115	39
125	32
135	30
145	29.5
155	21.5
165	19.5
175	16
185	16
195	11
205	7
215	4.5
225	1.5
235	0

Fuente: Elaboración propia

Los 25 milímetros de penetración están entre los 145 y 155 minutos, por lo tanto, con estos valores se realiza la interpolación y se obtiene que: el tiempo del fraguado inicial del cemento se logra a los 150.6 minutos, es decir, a las dos horas y 50 minutos.

El tiempo de fraguado final del cemento se obtiene a los 235 minutos y el valor es 0.

2.2.4 Resistencia del cemento

La resistencia a la compresión de morteros de cemento se realiza bajo la guía de la NTC – 220 en la cual los especímenes de prueba son cubos de 50 milímetros de lado o de 50.8 milímetros.

Se comienza por formar la masa del mortero normal en la que, por una parte, de cemento, son 2.75 partes de arena seca y luego se procede a mezclarlas mecánicamente. Posteriormente llenan los moldes en dos capas de aproximadamente 25 milímetros, es decir, la mitad del molde y se apisona cada capa con 32 golpes del compactador manual, se alisa la superficie de los cubos en el molde con un palustre. Se llevan estos moldes a la cámara húmeda por un tiempo de 20 a 24 horas antes de ser desmoldados.

Se retiran del molde los cubos que van a ser ensayados en el momento, los que no deben almacenarse en el tanque de almacenamiento. Para la prueba a compresión se coloca el cubo en la prensa teniendo en cuenta algo muy importante: La superficie en la que se va a ejercer la presión deben ser las caras que estuvieron en contacto con las paredes del molde y se continúa la presión hasta que el cubo falle. Se toma lectura de esta carga y para obtener la resistencia a la compresión se realiza el siguiente cálculo para cada muestra:

Ecuación 2-6

$$FM = \frac{P}{A}$$

Donde:

FM: Resistencia a la compresión

P: Carga máxima registrada

A: Área de aplicación de la carga

Los resultados obtenidos en la prueba fueron plasmados en la siguiente tabla:

Tabla 2-8 Resultados resistencia a la compresión del cemento

Resistencia	
Resistencia a 3 días (MPa)	9.0
Resistencia a 7 días (MPa)	16.0
Resistencia a 28 días (MPa)	26.0

Fuente: Elaboración propia

2.3 AGREGADO FINO PROVENIENTE DE RESIDUOS DE DEMOLICIÓN Y CONSTRUCCIÓN (RCD)

2.3.1 Máquina de los ángeles

Para la obtención del material para el muestreo, se utilizaron residuos de la Planta de tratamiento *Centro de tratamiento, aprovechamiento y disposición final de RCD Cemex*; El tipo de material a utilizar era agregado fino, por lo cual como alternativa para la disposición del material que venía grueso, se utilizó la máquina de los ángeles para reducir el tamaño de la muestra a partir del roce continuo de las partículas y las esferas de acero y así obtener un material con las características y proporciones adecuadas para la investigación.

Imagen 2-2 Preparación de la muestra de RCD en máquina de los ángeles.



Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Granulometría

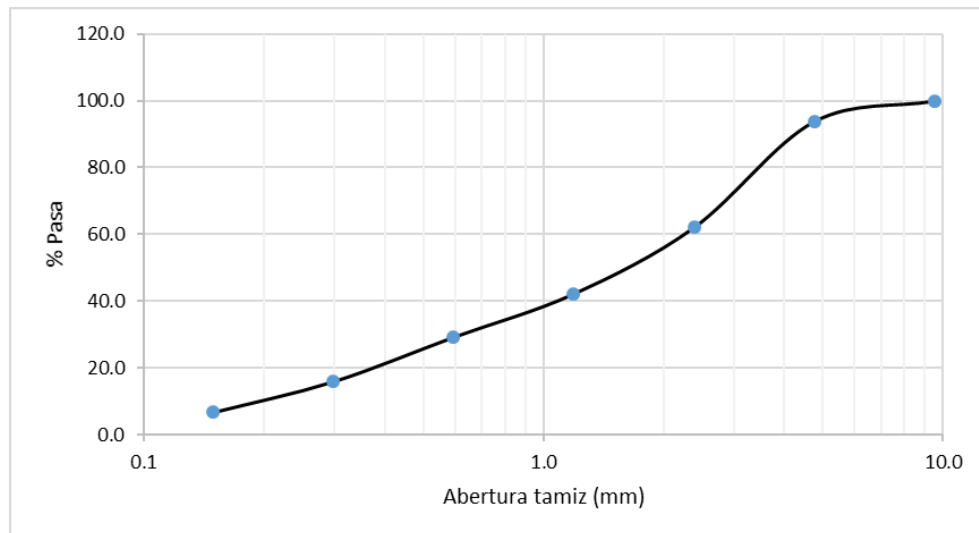
A continuación, se presenta el ensayo de granulometría para la muestra de agregado fino de residuos de construcción y demolición (RCD) provenientes de concreto.

Tabla 2-9 Resultados análisis granulométrico RCD.

ANALISIS GRANULOMETRICO RCD					
Tamiz	Abertura (mm)	Masa (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
3/8"	9.510	0.00	0.00	0.00	100.00
#4	4.760	54.50	6.17	6.17	93.83
#8	2.380	280.00	31.72	37.90	62.10
#16	1.190	175.30	19.86	57.76	42.24
#30	0.595	114.60	12.98	70.75	29.25
#50	0.297	117.70	13.34	84.08	15.92
#100	0.149	81.10	9.19	93.27	6.73
Fondo	-	59.40	6.73	100.00	0.00
Total		882.60	100.00		

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2-2 Curva de gradación RCD.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 Densidad y absorción

Para la muestra de RCD, los resultados de densidad y absorción de acuerdo a la NTC 237 *Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino* se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2-10 Resultados densidad y absorción RCD.

Densidad y abasorción	
Peso humedo (g)	989.4
Peso Seco (g)	910.2
Absorción(%)	8.70
Densidad (g/cm3)	2.08

Fuente: Elaboración propia.

2.3.4 Masa unitaria

Para la muestra de RCD, los resultados de masa unitaria suelta (MUS) y masa unitaria compacta (MUC) según la norma NTC 092 *Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados* se presentan a continuación:

Tabla 2-11 Resultados masa unitaria RCD.

Resultados masa unitaria suelta y compacta	
MUS (g/cm3)	1.23
MUC (g/cm3)	1.34

Fuente: Elaboración propia.

3 DISEÑO DE MEZCLA Y ELABORACIÓN DE MUESTRAS

Para la elaboración del diseño de mezclas y elaboración de probetas se partió de la norma NTC 220, en la cual se ven expuestas los requerimientos que fueron necesarios para los resultados obtenidos y su demostración.

3.1 DISEÑO DE MEZCLA

3.1.1 Composición

La elaboración de la muestra se da según las proporciones en masa indicadas en la norma NTC 220 *Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos*, para la elaboración de cubos de mortero de cemento hidráulico, las cuales son una parte de cemento por 2,75 partes de arena gradada normalizada seca. Una relación agua/cemento 0.485. Para los cementos la cantidad de agua de amasado debe ser la que produzca una fluidez de 110 ± 5 .

La determinación de la fluidez se realizó de acuerdo a la NTC 111 *Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico*, la cual consiste en poner un molde en el centro de una mesa de fluidez, posteriormente se ponen capas de 25 mm de espesor y se pisa 20 veces con el compactador hasta llenar el molde. Se retira el molde y utilizando el calibrador se toma tres mediciones del diámetro del mortero.

Imagen 3-1 Determinación de la fluidez del mortero.



Fuente: Elaboración propia

Para su dosificación se tuvieron en cuenta los materiales de la composición y su caracterización realizada permitió obtener los datos necesarios para ésta.

Para la adición de RCD, se tomaron proporciones del material en reemplazo de arena para cada una de las muestras, obteniendo cuatro tipos de diseño de mezcla en las cuales se parte de la sustitución de 0,0% - 16,7% - 33,3% y 50% de arena por RCD respectivamente, obteniendo siempre un mismo peso de 16,09kg para cada tipo, cada uno de estos porcentajes fue evaluado en tres muestras de sus tipologías.

De acuerdo a lo anterior el diseño de mezcla obtenido para cada tipo es el siguiente:

Tabla 3-1 Diseño de mezcla 1.

Diseño de mezcla 1	
0% RCD	
Material	Peso (kg)
Cemento	3.80
Agua	1.84
Arena	10.45
RCD	0.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-2 Diseño de mezcla 2.

Diseño de mezcla 2	
16.7% RCD	
Material	Peso (kg)
Cemento	3.80
Agua	1.84
Arena	8.67
RCD	1.78

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-3 Diseño de mezcla 3.

Diseño de mezcla 3	
33.3% RCD	
Material	Peso (kg)
Cemento	3.80
Agua	1.84
Arena	7.00
RCD	3.45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-4 Diseño de mezcla 4.

Diseño de mezcla 4	
50% RCD	
Material	Peso (kg)
Cemento	3.80
Agua	1.84
Arena	5.22
RCD	5.22

Fuente: Elaboración propia

3.2 ELABORACIÓN DE MUESTRAS

Las muestras se realizaron a partir de la norma NTC 220 *Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos* y para los cilindros de mortero se realizó a partir de la norma NTC 1377 *Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio*.

3.2.1 Cubos de mortero

Según la norma NTC 220, se realiza la mezcla de mortero según las proporciones específicas, a partir del procedimiento descrito se prepara mecánicamente; una vez se realiza el ensayo de fluidez se garantiza un flujo de 110 ± 5 en 25 golpes con la mesa de flujo, para poder realizar los cubos, se arrastra el mortero con la espátula al recipiente de mezcla hasta el fondo sin dejar excesos de mortero en la paleta, luego se mezcal durante 15s a velocidad media.

3.2.1.1 Llenado de los moldes

Para el llenado de moldes de 50mm x 50mm, se vertió inicialmente una capa de mortero en cada uno de los moldes con una altura aproximada de 25mm y se apisono con 32 golpes con el compactador como establece la norma NTC 220 en el ítem 10.3.3, de forma que el llenado fue uniforme en todos los moldes. Una vez terminado este procedimiento se eliminaron los excesos. Al finalizar esta operación se llenó con una segunda capa y se apisono igual que la primera. Las capas de los cubos se dejaron más altas que los bordes para poder con ayuda del definir la superficie. Posteriormente se ponen los moldes a cámara húmeda durante 24 horas teniendo la precaución de que las caras descubiertas estén protegidas y no tengan contacto con agua.

Imagen 3-2 Moldes para cubos.



Fuente: <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/concretos/molde-triple-cubos-cemento-mortero/>

3.2.2 Cilindros de mortero

Para las cantidades necesarias para la elaboración de las muestras, se partió del diseño de mezcla se tomaron los moldes de acero ajustándose a las dimensiones de 100mm de diámetro x 200mm de longitud. Teniendo los moldes fueron engrasados y se vertió el mortero en 3 capas a la misma altura, para cada una se apisono con el extremo redondeado de la varilla con 25 golpes, al finalizar se retiraron los excesos y se enraso.

Al terminar los procedimientos realizados anteriormente, las muestras se dejan fraguar durante 24 horas a una temperatura de 20°C, pasado este tiempo se

procede a desencofrar especímenes y ser sumergidos para así darle inicio el proceso de curado.

Imagen 3-3 Cilindros de mortero.



Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Proceso de curado

Para lograr el curado los especímenes fueron sometidos para que pudieran desarrollar una importante parte de su resistencia y consistencia. Este proceso duro 28 días, al someterlos a la acción del agua en una alberca, a un nivel de temperatura moderado con el propósito de conservar el calor generado por la hidratación de los especímenes, con el fin de que los espacios de cemento fresco que estaban llenos de agua fueran reemplazados por los productos de hidratación del cemento. Al pasar este tiempo, se sacaron las muestras y se dejaron secar al aire libre y posteriormente se realizaron los ensayos requeridos.

4 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS

4.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Para la preparación de las muestras para el ensayo de penetración de cloruros NT BUILT 492 se requiere de probetas cilíndricas de mortero de un diámetro de 100 mm y un espesor de 50mm, las cuales se obtienen haciendo cortes de los cilindros de 100mm de diámetro x 200mm de longitud.

4.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NTC 220

De acuerdo con la norma NTC 220 se realiza el ensayo de resistencia a la compresión que tiene como objetivo determinar la resistencia máxima a compresión de muestras (cubos de mortero 50x50mm) frente a una carga de tipo axial en la máquina universal; obteniendo así, los valores de esfuerzo a los 7 y 28 días de curado. Se realizaron 3 muestras para cada porcentaje de contenido de RCD.

Procedimiento

Se sacan los cubos de la alberca e inmediatamente se pasan a la máquina de ensayos. La superficie de los cubos debe estar seca, se debe verificar que no queden residuos de arena y debe comprobarse que las caras del cubo sean planas. Inmediatamente se colocan y se centran las muestras en la maquina universal teniendo en cuenta que las superficies sobre las que se va a ejercer la carga sean aquellas que estuvieron en contacto con las paredes del molde.

Imagen 4-1 Ensayo de compresión.



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la compresión con 0% de RCD

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras realizar el ensayo de compresión de cubos de mortero de 50x50 mm a los 7 y 28 días. Para cada porcentaje de contenido de RCD se realizaron 3 muestras.

Tabla 4-1 Resultados de resistencia a la compresión

Contenido de RCD	Resistencia la compresión (Mpa)							
	0%		16.70%		33.30%		50%	
Tiempo (días)	7 días	28 días	7 días	28 días	7 días	28 días	7 días	28 días
muestra 1	17.46	29.95	16.59	26.87	16.16	26.05	15.26	23.89
muestra 2	18.12	27.77	17.22	27.58	15.81	25.81	14.55	23.42
muestra 3	17.38	26.52	16.44	25.65	15.46	25.07	14.59	24.36
Media	17.65	28.08	16.75	26.70	15.81	25.64	14.80	23.89

Fuente: Elaboración propia

4.3 PENETRACIÓN DE CLORUROS NT BUILD 492

De acuerdo a la norma Nordtest NT Build 492 se realiza este ensayo que tiene como objetivo encontrar el coeficiente de migración de cloruro en materiales de reparación a base de cemento, en este caso para el mortero con agregado de RCD proveniente de concreto.

El coeficiente de migración de cloruro que se obtiene en esta práctica es un indicador de la resistencia que posee el material probado ante la penetración de cloruro, dicha penetración se puede dar con facilidad debido a que los iones cloruro están presentes en gran parte de la naturaleza siendo el mar la principal fuente ya que contiene cloruro de sodio, cloruro de magnesio o cloruro de potasio.

El coeficiente mencionado anteriormente no debe ser comparado con los coeficientes obtenidos de difusión de cloruro, porque este método provoca un comportamiento distinto al que se quiere observar, es decir, desplaza los iones de cloruro hacia el interior de la muestra de prueba.

Para esta prueba se requieren muestras de forma cilíndrica con diámetro de 10 centímetros y un espesor de 5 centímetros provenientes de cilindros ya fundidos de una longitud mínima de 10 centímetros, los usados tenían una longitud total de 20 centímetros. Se usan tres muestras para la prueba.

Este ensayo consiste en aplicar un potencial eléctrico externo de forma axial a la muestra, generando que los iones de cloruro presentes migren hacia la muestra. Luego de esperar un tiempo establecido. La muestra es dividida axialmente en dos partes, a una de estas se le aplica nitrato de plata para que haga visible la profundidad de penetración de cloruro con una tonalidad blanca. Esta profundidad ayudará a calcular el coeficiente de migración.³⁷

Para este ensayo se tomaron tres muestras de mortero para cada porcentaje de agregado de RCD elegido anteriormente, es decir, para 0%, 16.7%, 33.3% y 50%.

³⁷ (NT BUILD 492, 1999)

El valor absoluto de la tensión aplicada o voltaje es constante y es de 30 Voltios. Para la obtención del coeficiente de migración se utiliza la siguiente formula:

Ecuación 4-1

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 * (273 + T) * L}{(U - 2) * t} * \left(x_d - 0.0238 * \sqrt{\frac{(273 + T) * L * x_d}{U - 2}} \right)$$

Donde:

D_{nssm} : non-steady-state migration coefficient ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

U: Absolute value of the applied voltage (V)

T: Average value of the initial and final temperatures in the analyte solution ($^{\circ}\text{C}$)

L: Thickness of the specimen (mm)

X_d : Average value of the penetration depths (mm)

t: Test duration (hours)

Imagen 4-2 Ensayo NT Build - 492.



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se plasman los resultados obtenidos en laboratorio:

Tabla 4-2 Resultado ensayo NT Build-492

Muestra	Resultado ensayo penetración de cloruros											
	0% RCD			16,7% RCD			33.3% RCD			50% RCD		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
T (°C)	21			21			21			21		
L (mm)	50			50			50			50		
U (v)	30			30			30			30		
T (hr)	24			24			24			24		
xd (mm)	28.6	27.9	26.7	28.4	29.5	29.1	32.3	32.8	32.4	38.8	39.1	40.1
Dnssm x10 ⁻¹² m ² /s	13.4	13.3	12.5	13.3	13.9	13.7	15.3	15.5	15.3	18.5	19.0	19.2
Media	13.08			13.63			15.37			18.89		
D. estándar	0.52			0.28			0.13			0.34		

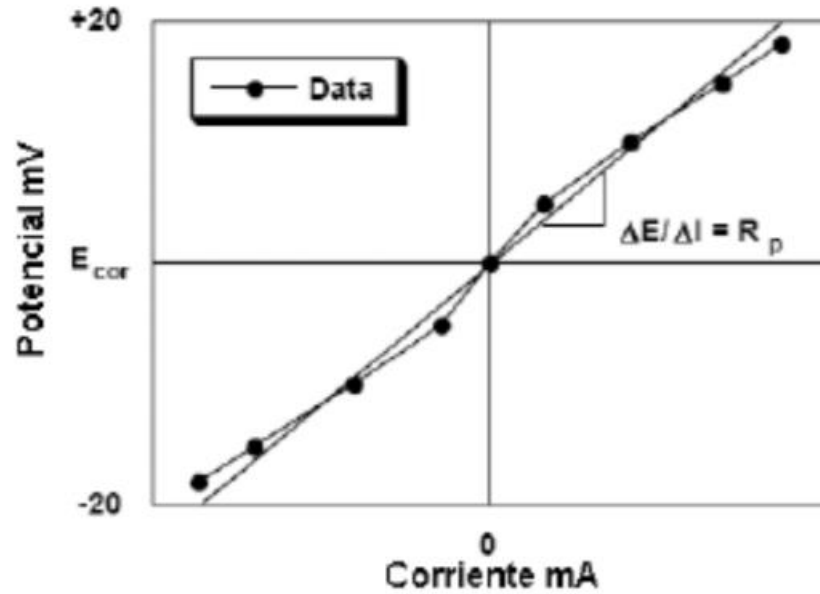
Fuente: Elaboración propia

4.4 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL)

El objetivo de esta técnica de monitoreo es obtener valores concernientes a la cinética de la corrosión determinando la velocidad de corrosión y se puede definir como la resistencia que tiene un material a la oxidación cuando se le aplica un potencial externo.

El ensayo de resistencia de polarización lineal (RPL) es una técnica que permite determinar la velocidad de corrosión instantánea. En esta práctica se aplica una pequeña polarización de ± 30 mV sin alterar la superficie del electrodo de trabajo (material de prueba) y se calcula con la pendiente de la región lineal de la curva $\Delta E/\Delta I$.

Gráfica 4-1 Diagrama de la resistencia a la polarización.



Fuente: Caracterización por sales fundidas de los recubrimientos metálicos
TRISTANCHO, José Luis. México. 2011.

Con las pendientes obtenidas y la resistencia a la polarización se procede a determinar la densidad de corriente de corrosión con la siguiente ecuación:

Ecuación 4-2

$$i_{corr} = 10^6 \frac{B}{R_p}$$

Donde:

Ecuación 4-3

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 (\beta_a + \beta_c)}$$

i_{corr} = Densidad de corriente de corrosión
 R_p = Resistencia a la polarización
 b_a = Pendiente anódica de Tafel (Voltios)
 b_c = Pendiente catódica de Tafel (Voltios)

Con los anteriores datos se determina la velocidad de corrosión con la siguiente ecuación:

Ecuación 4-4

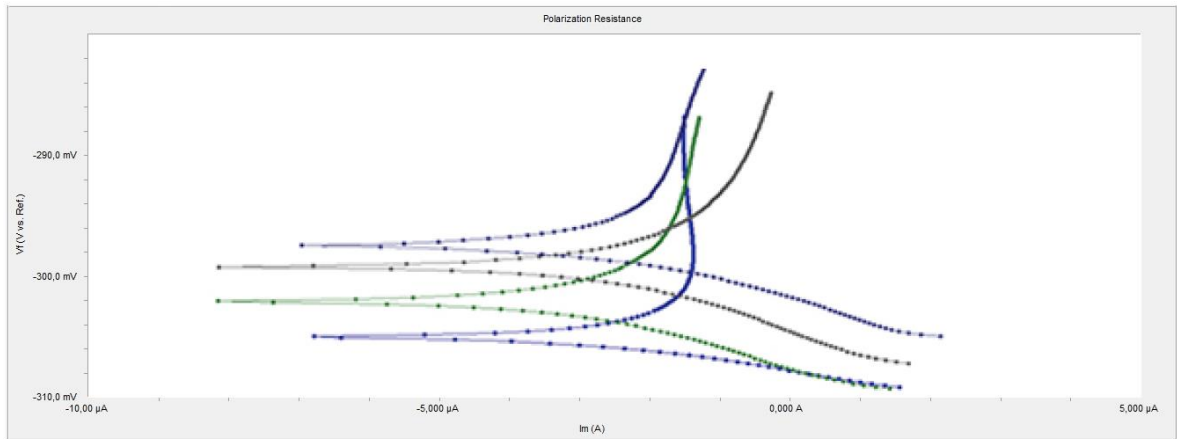
$$V_{corr} = 0,129 \times \frac{PE}{D} \times i_{corr}$$

Donde:

V_{corr} = Velocidad de corrosión (mpy)
PE = Peso equivalente
D = Densidad (g/cm³)
 i_{corr} = Densidad de Corrosión (A/cm²)

Para la caracterización del material, se utilizó el ensayo de resistencia a la polarización lineal, con el cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Gráfica 4-2 Resistencia a la polarización.



Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos para cada muestra, se obtuvieron los siguientes valores de corriente de corrosión (i_{corr}), Resistencia a la polarización lineal (RPL) y Velocidad de corrosión (V_{corr}) para cada porcentaje de RCD:

Tabla 4-3 Resultados resistencia a la polarización.

Contenido de RCD (%)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	B (mV)	RPL ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	V_{corr} (mpy)
0	6,5	26	4,00	0,839
16,7	7,2	26	3,61	0,929
33,3	8,3	26	3,13	1,071
50	8,8	26	2,95	1,135

Fuente: Elaboración propia

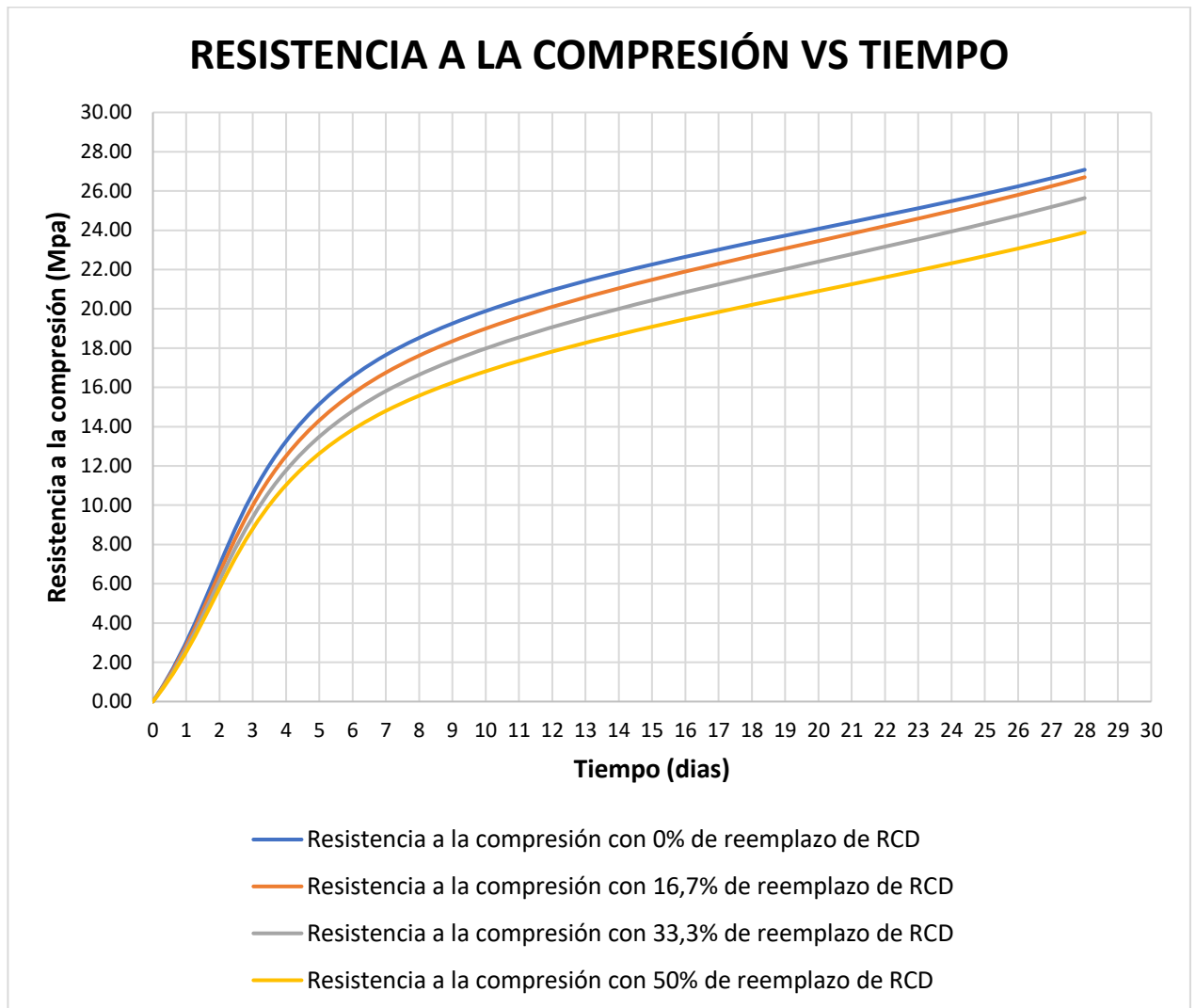
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar un análisis porcentual de los resultados obtenidos, se toma como muestra patrón la resistencia promedio de la muestra que contiene 0% de RCD proveniente de concreto y se asume que la muestra alcanzo su valor máximo de resistencia a la compresión de 27.08Mpa a los 28 días de curado, ya que en esta edad de curado se espera alcanzar el 90% de la resistencia total.

De este modo se comparan los resultados para cada una de las muestras con diferente contenido de RCD. La mezcla con 16,7% de contenido de RCD presento un resultado desfavorable con respecto a la muestra patrón, con una disminución de resistencia a la compresión de 1.4% es decir de 24.7 Mpa. Para la tercera muestra con 33.3% de contenido de RCD se evidencio el aumento en la disminución de la resistencia arrojando así 25.64 Mpa, es decir un 5.32% por debajo de la muestra patrón y finalmente, para la muestra con 50% de contenido de RCD se evidencia el mismo decrecimiento, con 11.77% menos de resistencia a la compresión con respecto a la muestra patrón y 23.89 Mpa a los 28 días de curado.

A partir de lo anterior, se considera que la resistencia a la compresión en las 4 mezclas evaluadas, para cada una de ellas el desarrollo de la resistencia disminuyo. Las muestras para los días evaluados, presentaron una resistencia optima, tanto para los 7 como para los 28 días, en ninguno de los casos se vio favorable el reemplazo de contenido de RCD. Adicionalmente, es evidente que la resistencia de las mezclas es inversamente proporcional, quiere decir que a menor porcentaje de RCD mayor resistencia.

Tabla 5-1 Resistencia a la compresión de las 4 mezclas con diferente contenido de RCD.



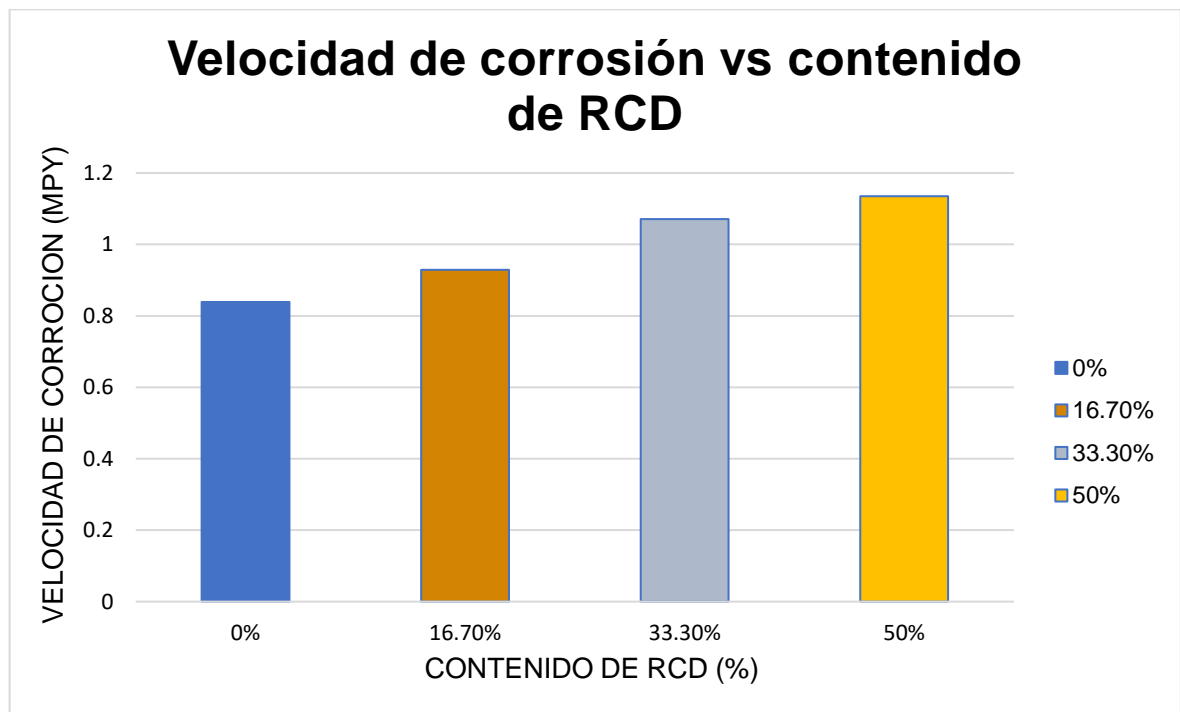
Fuente: Elaboración propia

En la anterior grafica podemos ver que para la mezcla con 0% de RCD encontramos una resistencia a la compresión mayor que las demás muestras que fueron sometidas a reemplazo de agregado fino por RCD y para la muestra con mayor porcentaje, es decir la mezcla con 50% de RCD, se obtiene la menor resistencia con respecto a la mezcla inicial, sin embargo, para todas las mezclas la resistencia aumento en función del tiempo, es evidente que ninguna mostro comportamiento

deficiente, pero respecto a los resultados obtenidos y la disminución de la resistencia, al aumentar el RCD presenta desmejoramiento en las mezclas luego de ser retirados de la cámara de curado.

Se realizó una gráfica para comparar las velocidades de corrosión frente a los diferentes tipos de mezclas de mortero de RCD provenientes de concreto, en esta, como se suponía se puede ver que el menor valor de resistencia a la polarización fue la que obtuvo mayor velocidad de corrosión, la cual fue la mezcla con 50% de contenido de RCD y la mezcla que obtuvo menor velocidad de corrosión fue la de 0% de contenido de RCD. Como se puede ver en los resultados obtenidos y de acuerdo a la bibliografía consultada en el ensayo a la polarización lineal, existe una relación inversa entre la densidad de corriente corrosión (I_{corr}) y la resistencia a la polarización (R_p), dicho de otra manera, con el aumento de la resistencia a la polarización se reduce la densidad de corriente.

Gráfica 5-1 Velocidad de corrosión para cada tipo de mezcla.

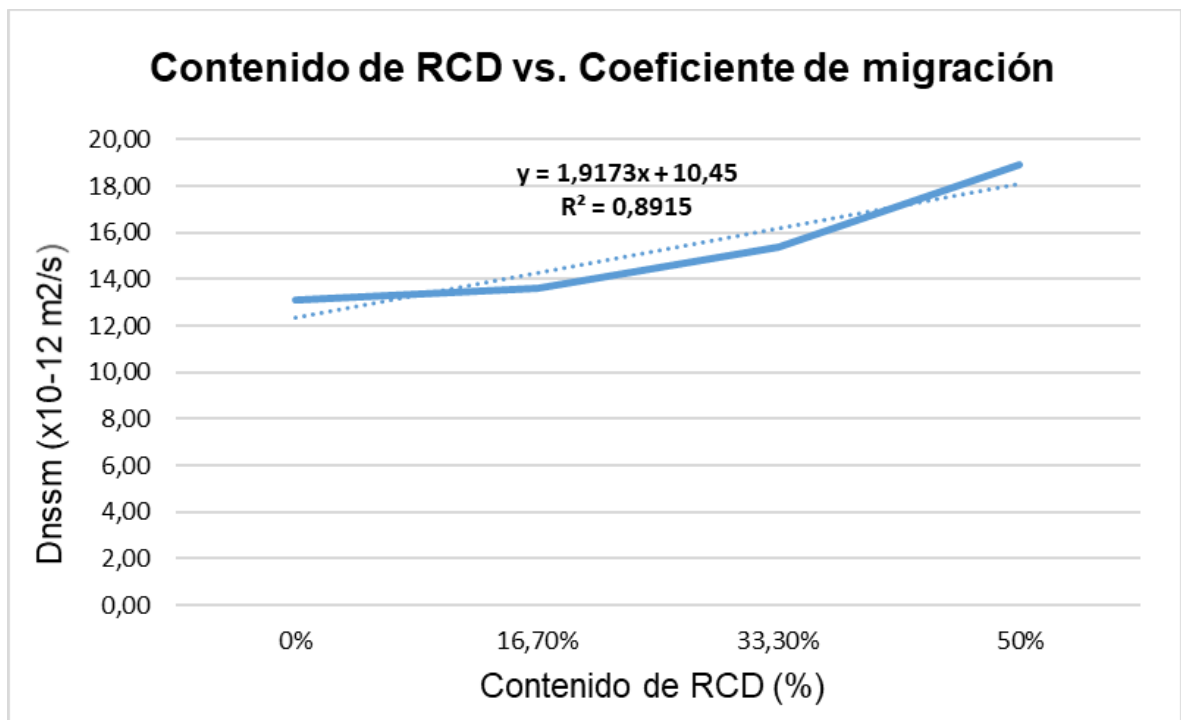


Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos, podemos observar en la gráfica el comportamiento de la velocidad de corrosión para cada una de las muestras analizadas. Se evalúa el aumento en la velocidad de corrosión con respecto al porcentaje de RCD para cada muestra. Para la primera, con 0% de RCD encontramos una velocidad de 0,839mpy y a partir de esta observamos el incremento desfavorable en la velocidad de corrosión a medida que aumenta el contenido de RCD.

Para identificar la reacción del mortero con agregado de RCD a la acción del ion cloruro, se realiza un análisis a una gráfica obtenida comparando dichos valores, así:

Gráfica 5-2 3 Contenido de RCD vs. Coeficiente de migración.



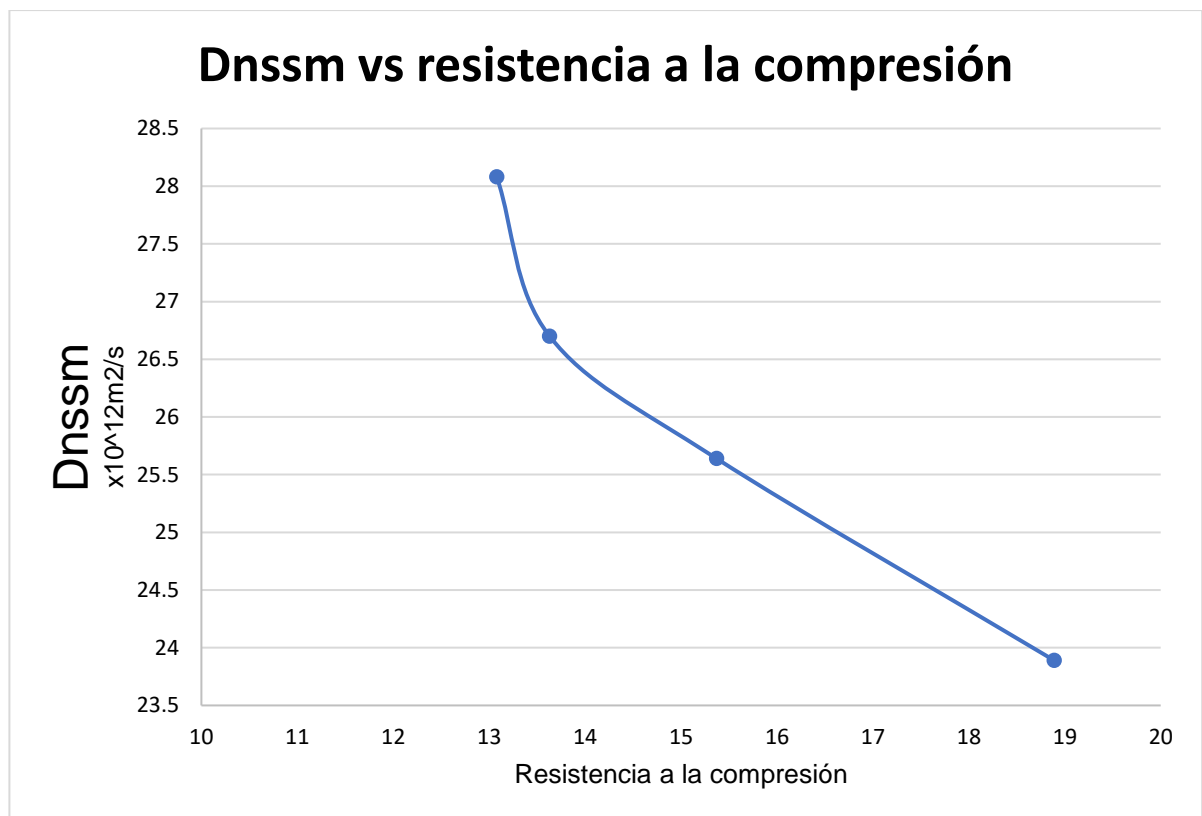
Fuente: Elaboración propia

El coeficiente obtenido en la prueba realizada donde se utilizaron muestras cilíndricas de 10 centímetros de diámetro, 5 centímetros de espesor y 20 centímetros de alto, es un índice de la resistencia que posee el material probado a la penetración de cloruro, que en este caso el mortero con diferente contenido de

agregado de RCD. Se considera una función lineal creciente respecto al contenido del agregado de RCD en el mortero.

Se observa que el mortero con 0% de agregado de RCD es quien tiene el menor valor del coeficiente de migración de cloruro, por consiguiente, su resistencia a este ensayo es mayor. De la tercera muestra la cual contiene un 33.3% de agregado a la cuarta muestra que contiene el 50% de agregado, la pendiente que representa el incremento de la resistencia ante la migración del cloruro es mayor en comparación a las anteriores, indicando una menor resistencia ante el ataque. Finalmente, la relación que existe entre el coeficiente de resistencia a la penetración de cloruro es directamente proporcional al contenido del agregado reciclado en el mortero. A mayor coeficiente de migración, la capacidad del material reduce ante los iones cloruros. Este comportamiento se observa creciente a medida en que la cantidad del agregado reciclado en el mortero es más abundante.

Gráfica 5-3 Dnssm vs resistencia a la compresión.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede ver la relación entre el coeficiente de migración ion cloruro (D_{nssm}) que se obtuvo mediante el ensayo NT Build-492 y la resistencia a la compresión de las 4 muestras de cubos de mortero de 50x50 mm con diferente contenido de RCD. Se puede observar que el coeficiente de migración (D_{nssm}) es inversamente proporcional a la resistencia última de los cubos de mortero con diferentes reemplazos de RCD. Es decir, para la muestra con menor porcentaje de RCD (50%) que tuvo una resistencia menor en comparación a las otras, su coeficiente de migración es mayor y para la muestra con mayor porcentaje de RCD (0%) que obtuvo la mayor resistencia su coeficiente de migración es menor.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

En la actualidad existen diferentes tipos de materiales que pueden ser reemplazados para la composición de las mezclas de concreto y/o mortero, siendo la elección de cada uno de ellos la función de varios factores, como el tipo de concreto requerido y la experiencia o las características generales establecidas. Sin embargo, la evolución del mercado hacia la producción de concreto ha generado que las plantas de prefabricación hayan desarrollado diferentes tipos de mezcla acorde a lo deseado, sobre todo para ser más competitivas y obtener el máximo ahorro en el consumo de cemento. Es por esto, que se decidió evaluar la sustitución del agregado fino por RCD y la influencia en las características más importantes del mortero.

En este sentido, el análisis del comportamiento de las muestras de mortero con diferente contenido de RCD en reemplazo de agregado fino y la influencia que sus materiales tienen en las propiedades más significativas en la práctica, a partir de los resultados obtenidos tras realizar los respectivos ensayos de laboratorio, se identificó una mejor influencia del agregado de RCD cuando el porcentaje de composición en la mezcla del mortero es menor.

Las propiedades mecánicas del mortero están directamente relacionadas con las propiedades de durabilidad obteniendo que a medida que el porcentaje de contenido de RCD en el mortero aumenta, la resistencia a la compresión disminuye en las muestras de mortero, pero manteniendo un comportamiento eficiente para la práctica.

De acuerdo al ensayo NT Build 492 se puede concluir que al aumentar el porcentaje de RCD en reemplazo de agregado fino en morteros se ve un aumento del coeficiente de difusión es decir que el ion cloruro penetra más de forma más rápida en las muestras de mortero, lo que podría significar un problema para estructuras con acero de refuerzo ya que deteriora la vida útil y se generarían problemas de corrosión.

Mediante la prueba de la resistencia a la polarización lineal (RPL) se encontró que el mayor valor de velocidad de corrosión se presentó cuando el porcentaje de RCD era mayor es decir con la muestra que contiene 50% de agregado reciclado

Se identificó con la prueba de polarización lineal que el menor valor de resistencia a la polarización corresponde al mayor valor de velocidad de corrosión y el mayor valor con la menor velocidad de corrosión

Los residuos de demolición y construcción (RCD) en altas cantidades no es un material óptimo para ser implementado como reemplazo de agregado fino en el sector de la construcción, debido a que disminuye las propiedades mecánicas y de durabilidad como lo es la resistencia a la compresión y la penetración del ion cloruro.

6.2 RECOMENDACIONES

En el desarrollo del presente trabajo de grado surgieron recomendaciones para la buena realización tanto de los ensayos como del análisis y deben ser tenidas en cuenta:

Se debe tener especial cuidado con la obtención del agregado reciclado como adición a la mezcla de mortero, ya que en algunas canteras suelen combinarse los RCD provenientes de distintas fuentes contaminándose y los resultados obtenidos en este estudio fueron para residuos de construcciones y demoliciones provenientes de concreto.

A la hora de realizar la granulometría del agregado reciclado ser un material bien gradado, de lo contrario, esto podría presentar alteraciones en los ensayos.

Para obtener resultados óptimos de los ensayos se deben realizar bajo la guía de las normas que establecen parámetros para la realización de las actividades en este caso estructurales para cada país y de personal capacitado tanto docentes como personal técnico del laboratorio.

7 BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA DE BOGOTÁ - SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. 2011. Política Pública de Edificaciones Sostenibles. *www.ambientebogota.gov.c.* [En línea] 2011. <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/politica-de-ecourbanismo-y-construccion-sostenible>.

AMADOR, A. 2014. Corrosión del acerp en el hormigon armado. [En línea] 2014. [Citado el: 03 de Mayo de 2020.] <https://masqueingenieria.com/blog/corrosion-acero-hormigon-armado/>.

ARGOS. ARGOS. *www.colombia.argos.co.* [En línea] [Citado el: 2 de septiembre de 2019.] <https://colombia.argos.co/Conoce-nuestros-productos/morteros-secos>.

ARTIGAS,Br.https://www.academia.edu/16921335/MORTEROS_EN_ESTADO_FRESCO. [En línea]

CASAS ARCHILA, Jhon Milton. 2010. *Evaluación de la corrosión mediante técnicas electroquímicas en el acero de refuerzo del concreto.* Santander : s.n., 2010.

CEMEX. CEMEX. <https://www.cemex.com>. [En línea] [Citado el: 2 de septiembre de 2019.] <https://www.cemex.com/es/productos-servicios/productos/cemento>.

Certificación, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y. 2007. *Concretos. Método de ensayo para el analisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.* Bogota : ICONTEC, 2007.

CONCEPTO-DEFINICIÓN . Concepto-definición. *www.conceptodefinicion.de.* [En línea] [Citado el: 2 de septiembre de 2019.] <https://conceptodefinicion.de/concreto/>. *Diseño de sistemas de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro.*

Ingeniería Investigación y Tecnología. 2015. 2015, Vol. XVI (NÚMERO 4).

FERNÁNDEZ LEDESMA, Enrique. 2016. *Aplicacion de residuos en la fabricacion de morteros industriales.* Cordoba : Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2016, 2016.

—. **2016.** *Use of industrial waste in masonry mortar manufacturing.* Cordoba : Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2016, 2016.

FERREX. *www.materialesdeconstruccion.com.mx.* [En línea] [Citado el: 2 de septiembre de 2019.] <http://www.materialesdeconstruccion.com.mx/productos-agregados.php>.

GUTIERREZ DE LÓPEZ, Libia. 2003. *El concreto y otros materiales para la construccion.* Manizales : Universidad Nacional, 2003.

Influencia de la penetracion de lones cloruros en el hormigon armado a diferentes relaciones agua/cemento y condiciones de exposicion.

CATAÑEDA VALDÉS, Abel, DÍAS BRITO, Nelson y GONZALES MELLOR, Eva. 2005. s.l. : Revista CENIC ciencias quimicas, 2005, Vol. 36.

ING. RIVERA L, Gerardo A. *file:///C:/Users/jeom1_000/Downloads/Tecnologia-Concreto-y-Mortero-Rivera.pdf.* [En línea]

JUSTE, Irene. 2018. Ecología verde. *www.ecologiaverde.com.* [En línea] 14 de agosto de 2018. <https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-visual-causas-consecuencias-y-soluciones-32.html>.

La adherencia en los morteros de albañileria. **CABRERA, Jorge Luis. 1995.** Cuba : s.n., 1995.

LOPES LIMA, Paulo Roberto y BAUTISTA LEITE, Monica. 2012. *Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar.* Feira de Santana, Brazil : s.n., 2012.

MINISTERIO DE AMIBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. 2017. [http://www.minambiente.gov.co.](http://www.minambiente.gov.co) [En línea] 3 de marzo de 2017. [Citado el: 2 de septiembre de 2019.] <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2681-minambiente-reglamenta-manejo-y-disposicion-de-residuos-de-construccion-y-escombros>.

NTC 77. 2007. *Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y grueso.* Bogota : ICONTEC, 2007.

NTC 92. 1995. *Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados.* Bogota : ICONTEC, 1995.

OBSERVATORIOS AMBIENTALES URBANOS. Glosario.
www.oau.colnodo.apc.org. [En línea] [Citado el: 3 de septiembre de 2019.]
<https://oau.colnodo.apc.org/glosario-r.php>.

Obtención de curvas galvanostáticas y ensayos de resistencia a la polarización en varillas de construcción ASTM A42 en solución de agua al 3.5% de cloruro de sodio.

CORTE MORQUECHO, Daniel y PEÑA ESTRELLA, Julian. 2017. Guayaquil, Ecuador : Revista tecnológica ESPOL, 2017.

PARRO. *www.parro.com.ar.* [En línea] [Citado el: 2 de septiembre de 2019.]
<http://www.parro.com.ar/definicion-de-fraguado>.

Revista ambiental catorce 6 . 2017. *www.catorce6.com.* [En línea] 17 de julio de 2017. <https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/habitat/12015-ciudades-llenas-de-escombros>.

RODRÍGUEZ MORA, Oscar. 2003. *Morteros guía general.* Madrid : AFAM, 2003.

SAIZ MARTÍNEZ, P, GONZALO CORTINA, M y FERNÁNDEZ MARTÍMEZ, F. *USE OF FINE RECYCLED AGGREGATES FORM CONSTRUCTION AND.* Madrid, España : s.n.

SALAMANCA CORREA, Rodrigo. 2001. *La tecnología de los morteros.* Bogota, Colombia : s.n., 2001.

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. 2011. Resolución 2397 - Tratamiento y aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital.
http://www.ambientebogota.gov.co. [En línea] 25 de abril de 2011.
<http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/RESOLUCI%C3%93N+2397+DE+2011.pdf>.

Secretaria distrital del medio ambiente.
<http://www.ambientebogota.gov.co/es/web/escombros/conceptos-basicos>. [En línea]


SERVICE CONTRACT ON MANAGEMENT OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE. **BIO INTELLIGENT SERVICE S.A.S.** 2011. Paris : s.n., 2011.

VEGA GARCÍA, Johao Ariel. 2012. Gestión y Control de los Residuos de la Construcción y Demolición. <http://ambientebogota.gov.co>. [En línea] CEMEX, 4 - 6 de diciembre de 2012. <http://ambientebogota.gov.co/documents/664482/0/Johao-Ariel-Cemex.pdf>.

VIDAL LESCUYER , Claire. 2015. *Estudio de la fijacion de cloruros de los RCD.* Cataluña : s.n., 2015.




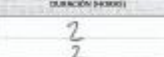




8 ANEXOS

Anexo 1. Acta de inicio y compromiso proyectos de investigación

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia Vigilada Mineducación</p> <p>Dirección de Investigaciones</p>	<p>ACTA DE INICIO Y COMPROMISO PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN CONVOCATORIA INTERNA 2019</p>	<p>Enero/2019</p> <p>VERSIÓN: 1</p>
--	--	--

Acta de Inicio y compromiso para proyectos de Investigación			
Información General sobre el Proyecto			
Título del proyecto:	EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE MIGRACIÓN DEL ION CLORURO EN CONCRETOS DE DIFERENTES CARACTERÍSTICAS		
Nombre de la Universidad financiadora	Universidad Católica de Colombia		
Nombre de las Universidades participantes			
Facultad / Departamento	Ingeniería		
Investigador Principal	HÉCTOR CAMILO HIGUERA FLÓREZ	Documento Identidad	1.016.014.601
Valor aprobado por el Comité Central de Investigaciones.	\$ 41.684.615		
Valor contrapartida otras instituciones o entidades			
Valor total del proyecto	\$ 41.684.615		
Fecha de inicio del proyecto	14 de enero de 2019		
Fecha de avance	21 de junio de 2019		
Fecha de entrega final	22 de noviembre de 2019		
Equipo responsable del proyecto			
Nombre de los Coinvestigadores	Documento Identidad	Unidad Académica /Facultad	Institución a la que pertenece
SAID STEWARD RODRÍGUEZ LOAIZA	93.415.427	Ingeniería	Universidad Católica de Colombia
JHON WILMAR CÁRDENAS PULIDO	1.015.422.488	Ingeniería	Universidad Católica de Colombia
Responsabilidades del investigador principal y co-investigadores del proyecto			
<p>a) Cumplir con los objetivos, general "Evaluar el coeficiente de migración al ion cloruro en concretos de diferentes características." y específicos del proyecto.</p> <p>b) Presentar a la Dirección de Investigaciones los informes de avance en las fechas establecidas por el Comité Central de Investigaciones; y el informe final al terminar la ejecución del proyecto, siguiendo los instrumentos aprobados por el Comité Central de Investigaciones de la Universidad Católica de Colombia.</p>			

Anexo 2. Formato estimación de consumo de laboratorios

 UNIVERSIDAD CATÓLICA <small>de Chile</small> FACULTAD DE INGENIERÍA LABORATORIOS		Formato Estimación de Consumo de Laboratorio para Proyectos CÓDIGO: F-053 LI 111 Versión 1.0
PROGRAMA:	Ingeniería Civil	
TÍTULO DEL PROYECTO:	Influencia de los RCD provenientes de concreto en el comportamiento mecánico y ataque de cloruros en mortero	
NOMBRE ESTUDIANTE:	Danna Camila Fojas S.	CÓDIGO: 506586
NOMBRE ESTUDIANTE:	Julio Enrique Olavea M.	CÓDIGO: 506219
NOMBRE DOCENTE A CARGO:	Camilo Figueroa Flores	
		LABORATORIO SOLICITADO: Suelos, concretos
		FIRMA: 
		FIRMA: 
		FIRMA: 
CONTENIDO	ACTIVIDAD (S) ANALIZADA(S) A REALIZAR	DURACIÓN (HORAS)
1	Caracterización de cemento	2
2	Caracterización de arena	2
3	Caracterización de RCD	4
4	Elaboración muestras de mortero	8
5	Ensayo resistencia a compresión	2
6	Ensayo resistencia a flexión	2
TOTAL:		
 Nombre y firma del jefe		Danna Fojas  Julio Olavea  Nombre y firma de los estudiantes
		Dr. Figueroa  Nombre y firma de la Coordinación de laboratorios
NOTA: Recuerde que copia de este formato, totalmente diligenciado y firmado, debe ser anexado a la Propuesta de Proyecto de grado. NOTA 2: Otros aspectos a considerar: Vistas técnicas, tiempos de fabricación, cantidad de muestras, cantidad de ensayos, espacio de almacenamiento, disponibilidad de equipos, EPP, etc.		
F-053 LI 111 RE Consumo Laboratorios Proyectos - 04/01		1 de 1