



Durabilidad del concreto reforzado con agregados reciclados frente a procesos de carbonatación y cloruros.

Yazmin Andreina Molina Bolaños

Erika Maryuri Portilla Narváez

Directores:

William Gustavo Valencia Saavedra, Ph.D.

Ruby Mejía de Gutiérrez, Ph.D.

Grupo Materiales Compuestos, EIMAT

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Santiago de Cali

Diciembre 2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecerle a Dios por permitirnos terminar esta nueva etapa de nuestras vidas, también queremos agradecerles a nuestros padres por su amor, sacrificio y apoyo incondicional, a nuestros hermanos, familia y parejas. Sin ellos no habría sido posible llegar hasta aquí.

A nuestros compañeros de universidad, por su compañía, apoyo y ánimo durante estos años y por último a nuestros directores de tesis por su guía y apoyo durante este proceso de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. EL PROBLEMA	3
2.1 DESCRIPCIÓN	3
2.2 FORMULACIÓN	5
2.3 OBJETIVOS	6
3. MARCO DE REFERENCIA	7
3.1 ESTADO DEL ARTE	7
3.2 ANTECEDENTES	14
4. METODOLOGÍA	16
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	38
5.1 OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE ACTIVACIÓN ALCALINA	38
5.3 ENSAYOS DEL CONCRETO ESTADO FRESCO: ASENTAMIENTO	41
5.3 ENSAYOS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.....	43
7. BIBLIOGRAFÍA.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayo granulométrico del agregado grueso reciclado.	16
Tabla 2. Ensayo granulométrico del agregado grueso natural.	17
Tabla 3. Ensayo granulométrico del agregado fino natural.	18
Tabla 4. Porcentaje de humedad de los agregados.	20
Tabla 5. Resultados Masa unitaria suelta y compacta.	22
Tabla 6. Densidad y absorción del agregado grueso.	23
Tabla 7. Densidad y absorción del agregado fino.	25
Tabla 8. Selección del tipo de granulometría según la ASTM C 131	26
Tabla 9. Resultado coeficiente de los ángeles.	26
Tabla 10. Nomenclatura probetas.	28
Tabla 11. Dosificación concretos por metro cúbico.	29
Tabla 12. Relaciones mezcla óptima en pastas.	38
Tabla 13. Resultados de absortividad para cada tipo de mezcla.	47
Tabla 14. Tamaño de grieta ensayo voltaje impreso.	54
Tabla 15. Resultados de pérdida de masa en el acero.	54
Tabla 16. Resistencia a la compresión antes y después de cámara.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de corrosión más frecuentes en estructuras de hormigón armado. Tomada y modificada de (Duffó & Farina, 2023).....	9
Figura 2. Tamices agregado fino natural.....	18
Figura 3. Comparación de color del líquido del agregado fino natural.....	19
Figura 4. Masa unitaria suelta y compacta agregado fino.....	21
Figura 5. Masa unitaria suelta y compacta agregado grueso.....	21
Figura 6. Balanza hidrostática.....	23
Figura 7. a) Condición saturada y superficialmente seca, y b) masa del picnómetro con agua.....	24
Figura 8. Método Fuller y Thompson.....	29
Figura 9. Cilindros y cubos en curado.....	30
Figura 10. Ensayo tiempo de fraguado.....	31
Figura 11. Prensa hidráulica para ensayos de compresión uniaxial.....	32
Figura 12. Permeabilidad del ion cloruro.....	34
Figura 13. Varilla con recubrimiento epóxico.....	35
Figura 14. Montaje permeabilidad a los iones de cloruros.....	36
Figura 15. (a) Cámara y (b) revelación de carbonatación.....	37
Figura 16. (a) Cubos en la cámara, (b) Ensayo de Resistencia a la compresión ambiente carbonatado.....	37
Figura 17. Resultados de resistencia a la compresión para pastas con 10% de OPC.....	38
Figura 18. Resistencia a la compresión en pastas óptimas con 10, 15 y 20% de OPC.....	39
Figura 19. Ensayo de tiempo de fraguado.....	40
Figura 20. Resistencia a la compresión en morteros.....	40
Figura 21. Asentamiento de cada mezcla de concreto.....	41
Figura 22. Fotografía de ensayo de asentamiento (slump) para cada tipo de muestra.....	42
Figura 23. Resultados del ensayo de compresión axial.....	43
Figura 24. Superficies de contacto para la transferencia de carga.....	44
Figura 25. Falla de los cilindros de concreto a 28 días.....	45
Figura 26. Curvas de absorción.....	47
Figura 27. Permeabilidad del ion cloruro 28 y 90 días respectivamente.....	48
Figura 28. Curva de intensidad de corriente vs tiempo.....	50
Figura 29. Fallas en el hormigón debido al ingreso de iones de cloruro.....	52
Figura 30. Desgaste del acero.....	53
Figura 31. Carbonatación 7, 14, 28, 54, 80 Y 90 días.....	58
Figura 32. Profundidad de carbonatación y coeficiente de carbonatación.....	58

RESUMEN

El presente trabajo de grado tuvo como finalidad determinar la durabilidad de los concretos no convencionales expuestos a ambientes marinos “cloruros” y de carbonatación, en los cuales se utilizaron agregado grueso reciclado (AGR), obtenido a partir de residuos de construcción y demolición (RCD), y residuo de ladrillo como un remplazo parcial del material cementante, buscando con ello obtener un material más sustentable y utilizar los conceptos de la economía circular.

Para la evaluación se llevó a cabo la producción de un concreto convencional con diferentes porcentajes de remplazo en peso de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado (20% y 100%), adicionalmente se fabricó un concreto activado alcalinamente a base de residuo de ladrillo (RL) con 100% de AGR, los cuales fueron comparados con una mezcla de concreto convencional, para poder evidenciar la influencia de los agregados en las propiedades físico-químicas, mecánicas y de durabilidad del concreto. Los ensayos realizados incluyen resistencia a la compresión, capilaridad, permeabilidad a los cloruros, y carbonatación en cámara acelerada.

Los resultados demuestran que los concretos con incorporación de AGR presentan un buen desempeño, aumentando la resistencia a la compresión incluso en condiciones de carbonatación. En cuanto, a los ensayos relacionados con la durabilidad, se observó que el método de permeabilidad al ion cloruro en la mezcla activada alcalinamente no responde positivamente, a comparación de la prueba de voltaje impreso donde se demostró que el acero estructural embebido en este tipo de concreto presentó un menor deterioro comparado al equivalente en concreto convencional.

Palabras clave: durabilidad, agregados gruesos reciclados (AGR), procesos de carbonatación y cloruros, residuos de construcción y demolición (RCD).

1. INTRODUCCIÓN

El diseño del concreto convencional cuando se expone a condiciones severas como: alta presencia de cloruros, sulfatos, carbonatación, humedecimiento y secado, al igual que la abrasión, debe ser más riguroso porque se debe garantizar que la estructura sea durable, para ello el material debe conservar las propiedades físico-químicas y mecánicas que permitan su funcionalidad. En la actualidad se encuentran materiales que contribuyen a alargar la vida útil del concreto en los diferentes ambientes; por ejemplo, recubrimientos tales como los epóxicos que recubren las varillas de acero o el concreto, evitando su corrosión y degradación en ambientes marinos, o aditivos que incorporados en la mezcla mejoran el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido (incrementan la trabajabilidad, reducen el contenido de agua y en consecuencia la porosidad, reducen la segregación, incrementan la resistencia, entre otros factores) y permiten obtener un concreto con excelente manejabilidad, resistencia y durabilidad. También el uso de algunas adiciones en el concreto pueden contribuir a reducir porosidad y en consecuencia evitar la penetración de agentes agresivos incrementando por tanto su vida útil en ambientes agresivos.

Lo anterior, contribuye a la sustentabilidad del concreto. Sin embargo, deben tomarse en cuenta otros parámetros relacionados con las materias primas empleadas y su efecto al medio ambiente. Es el caso de la fabricación de cemento donde hay un consumo excesivo de recursos naturales (arcillas y calizas) y un alto consumo energético para su producción, además de que se genera aproximadamente el 5-7 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO_2). Al respecto se menciona que entre más dióxido de carbono hay en la atmósfera, más calor se acumula y este calentamiento provoca el cambio climático, (Concreto, 2022). En general, el sector de la construcción es

adicionalmente responsable de la generación de un nivel elevado de residuos, bien sea durante la construcción como en los procesos de demolición, estos son los denominados residuos de construcción y demolición (RCD) (residuos de concreto, ladrillo, cerámica, vidrio, entre otros).

La creación de políticas públicas para el manejo de un ambiente sostenible, como el relacionado con la disminución en la generación de CO₂, y la gestión y disposición de RCD ha motivado el desarrollo de cementantes alternativos, y a la reutilización de RCD, específicamente para la producción de agregados gruesos aptos para la producción de concreto. Aquí cabe mencionar las resoluciones 0472 de 2017 y la 1257 de 2021 expedidas por el Ministerio de Medio Ambiente, al igual que la expedición de las normas (NTC-6421 y NTC-6422 de 2021), las cuales se relacionan al uso de agregados reciclados en el concreto. Sin embargo, en cualquier caso, para recomendar la introducción de un nuevo material en la construcción o las modificaciones de los existentes es necesario conocer acerca de su desempeño a largo plazo, o mejor aún conocer acerca de su durabilidad en el tiempo.

En este sentido, en este trabajo se evaluó la durabilidad de un concreto producido con agregados reciclados obtenidos a partir de residuos de demolición y construcción e incorporados al diseño en diferentes porcentajes, así como de un concreto “geopolimérico” a base de residuo de ladrillos (igualmente obtenido de RCD), el cual se produjo empleando la tecnología de activación alcalina. El desempeño de estos materiales se comparó con el de un concreto convencional considerando como medios de exposición la carbonatación y la presencia de cloruros. Con este estudio se pretendió mostrar el potencial de uso de estos materiales reciclados en ambientes muy severos que se encuentran categorizados para concretos normales en el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10.

1. EL PROBLEMA

2.1 DESCRIPCIÓN

La generación de residuos sólidos crece de forma exponencial, en especial con las actividades de construcción, lo que ha provocado el surgimiento de muchas políticas nacionales y municipales para el manejo de residuos sólidos por parte de las instituciones estatales (Carneiro, et al., 2000).

En Colombia, se deben mencionar la resolución 0472 de 2017 y su correspondiente modificación, la 1257 de 2021, donde se definen mecanismos para la efectiva gestión de los residuos de demolición y construcción (RCD). En esta última resolución se establecen las metas de aprovechamiento que por parte de los grandes generadores (constructoras) deberá cumplirse, las cuales se incrementan porcentualmente en el tiempo.

Aprovechar los residuos de construcción con el fin de obtener agregado grueso reciclado se considera un método propicio para contribuir a reducir la contaminación ambiental y la extinción de los recursos naturales; (Kazmi, et al., 2020) afirman que, utilizando agregados reciclados, se puede reducir un 20% de la emisión de dióxido de carbono (CO₂) y un 60 % de consumo de agregados naturales.

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) en la NTC 6421:2021 especifica los requisitos de calidad y las directrices para el uso de árido grueso reciclado (AGR). En esta norma se recomienda utilizar en concreto estructural hasta un 20% de agregado grueso reciclado y en un concreto no estructural hasta el 100% de agregado grueso reciclado. Si se tiene en cuenta este criterio existe un mercado para los agregados reciclados a partir de los RCD, permitiendo el cumplimiento de la resolución anteriormente nombrada y promoviendo la reutilización de agregado grueso reciclado lo cual permite la

implementación del concepto de “economía circular” en el sector de la construcción.

Desde la aparición de los concretos con agregado reciclados, a mediados del siglo XX, en diferentes países se han estudiado las propiedades físicas y mecánicas de este tipo de concretos. En principio se asociaban estas propiedades físico-mecánicas a la durabilidad de los concretos, pero las experiencias prácticas y el avance de la investigación en este campo han demostrado que son estos aspectos necesarios, más no suficientes para obtener un concreto durable. En diferentes normas vigentes se ratifica la durabilidad de los concretos como propiedad fundamental para el diseño de estructuras. Instituciones de carácter normativo como el ACI (American Concrete Institute), ASTM (American Society for Testing and Materials), entre otras, le han dado la relevancia al diseño de estructuras bajo la óptica de la durabilidad como factor fundamental porque se refiere a la importancia de que las estructuras perduren y se comporten adecuadamente en función del entorno en el que se construye (Aycardi Barrero, et al., 2012). Por consiguiente, se debe valorar el ambiente al que se someten las estructuras de concreto, especialmente cuando la literatura nos ha mostrado casos vulnerables para el concreto base cemento portland con agregados naturales y reciclados, con el objetivo de no afectar la vida útil de los elementos estructurales de hormigón. En particular, la corrosión del acero se origina principalmente por el ingreso de iones cloruro y el de CO_2 (carbonatación) a través del concreto, y afecta la capa pasiva que se forma en el acero de refuerzo (Han, Park, & Yang, 2013).

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 en el capítulo C.4 “Requisitos de durabilidad” especifica las categorías y clases de exposición en las que se localiza el concreto convencional con agregados naturales, y recomienda cumplir ciertos requisitos de

acuerdo con el ambiente de exposición. Sin embargo, no existe una norma que especifique los parámetros de durabilidad que cumple un concreto con árido grueso reciclado, particularmente debido a que apenas en julio de 2021 fue expedida la norma NTC 6421 por parte del ICONTEC que posibilita el uso de estos.

Por lo anterior, se considera que el presente estudio aportará al conocimiento en este sentido y a generar en los potenciales usuarios mayor confianza en el uso de este tipo de agregados. Considerando la importancia que tiene crear un ambiente sostenible y sustentable para la construcción de tal forma que se cumplan las propiedades del concreto endurecido como son resistencia y durabilidad se plantea la siguiente pregunta de investigación.

2.2 FORMULACIÓN

¿Cuál es el efecto del uso de agregados reciclados en la durabilidad de concretos reforzados convencionales y no convencionales, cuando se exponen a ambientes ricos en cloruros y dióxido de carbono (carbonatación)?

2.3 OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar el efecto del uso de agregados reciclados en la durabilidad de un concreto convencional (basado en cemento Portland) y un concreto no convencional (basados en residuos de ladrillo), reforzados con acero, expuestos a procesos de carbonatación y presencia de cloruros.

Objetivos específicos:

- Diseñar y producir un concreto basado en cemento Portland y un concreto activado alcalinamente haciendo uso de agregado grueso reciclado.
- Evaluar las propiedades de los concretos expuestos a procesos de carbonatación y presencia de cloruros.
- Comparar que tan eficiente es la durabilidad de los concretos alternativos en ambientes agresivos: cloruros y dióxido de carbono.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 ESTADO DEL ARTE

2.1.1 Durabilidad

Capacidad de las estructuras de concreto reforzado de conservar intactas sus condiciones físicas y químicas durante su vida útil cuando se ven sometidas al desgaste por efectos de cargas y sollicitaciones mecánicas, que están previstas en su diseño estructural. El esquema estructural de un edificio de concreto reforzado, debe definir las medidas adecuadas para que éste alcance la vida útil establecida en el proyecto, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, climatológicas y el género de edificio a construir (Muñoz Salinas & Mendoza Escobedo, 2012).

3.2.2 Factores que afectan la durabilidad del concreto

Existen diferentes tipos de exposición de naturaleza como:

- **Física:** cambios volumétricos del concreto a causa de cambios de humedad, temperatura o masa.
- **Mecánica:** producidas por deformaciones, impactos, movimientos, sobrecargas y vibraciones excesivas.
- **Química:** se refiere al ataque de ácidos, formación de sales expansivas, efecto álcali agregado, lixiviación por aguas blandas, carbonatación y la corrosión del acero de refuerzo, esta última asociada a la presencia de cloruros y carbonatación (Silva, Omar Javier, 2022).

3.2.3 Corrosión de las armaduras en el hormigón

La corrosión de las armaduras en el hormigón es una de las causas más frecuentes de deterioro de las estructuras construidas con este material, que se origina principalmente por el ingreso de iones de cloruro y carbonatación.

Cloruros.

La presencia de ion cloruro no solo se encuentra en las estructuras en contacto con agua de mar, sino también en aquellas cercanas a las costas, ya que la brisa marina se encarga del transporte de estos; así mismo, es posible encontrar la presencia de cloruros, en zonas industriales, piscinas o plantas de tratamiento de agua expuestas a otras fuentes de cloruros (Aycardi Barrero, et al., 2012). Los iones de cloruro tienen la característica de deteriorar la capa pasiva formada sobre el acero, ocasionando un tipo de corrosión denominado picado.

Carbonatación.

Se produce debido a la exposición del concreto en ambientes con dióxido de carbono, el cual reacciona con la portlandita (producto de la hidratación del cemento portland) y produce carbonatos de calcio. El resultado puede ser favorable o nocivo, dependiendo del tiempo, la tasa y la extensión de la carbonatación y el medio ambiente al cual se expone el concreto. La carbonatación intencional, de carácter superficial, durante su producción puede mejorar la resistencia, la dureza y la estabilidad dimensional de los productos de concreto. Sin embargo, en otros casos la carbonatación puede causar deterioro y reducir el pH de la pasta cementicia, provocando la corrosión generalizada del acero cercano a la superficie, como lo define la ACI 201.2R-01 textualmente.

En la *Figura 1*, se puede diferenciar la corrosión del acero por

carbonatación (generalizada) y por iones de cloruros (picado).

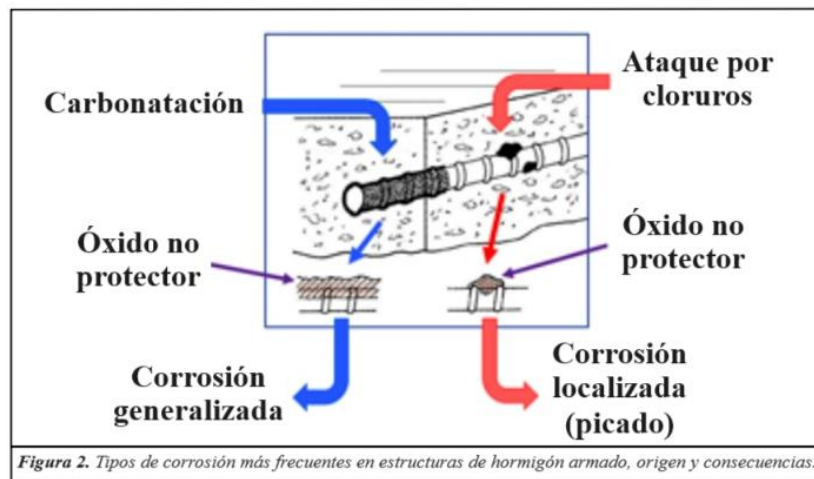


Figura 1. Tipos de corrosión más frecuentes en estructuras de hormigón armado.
Tomada y modificada de (Duffó & Farina, 2023)

3.2.3 Propiedades de una mezcla de concreto durable

(Silva, Omar Javier, 2022) afirma que el concreto se debe diseñar con una mezcla suficientemente compensada de tal manera que sea compacto, homogéneo, mínimamente poroso y resistente, definiendo así propiedades para el concreto durable.

- **Porosidad:** cantidad de espacios vacíos en la estructura interna de la masa de concreto, causados por la evaporación del agua libre de la mezcla, y del aire que queda naturalmente atrapado. Según su tamaño pueden ser poros de aire (macroporos), poros capilares, o microporos. Una porosidad alta significa disminución de la durabilidad del concreto.
- **Absorción:** relación entre la cantidad de agua que penetra los poros saturables y el peso seco de la muestra penetrada por el agua. Es un factor importante en el estudio de la durabilidad del concreto porque contribuye al traslado de sustancias nocivas (iones de cloruro, dióxido de carbono) o neutras hacia el interior del concreto.

- **Permeabilidad:** simplicidad con la que un fluido, a razón de diferentes presiones entre las superficies del material, logré atravesar la masa de concreto. La permeabilidad del concreto al agua depende de la permeabilidad y granulometría de los agregados y la permeabilidad de la pasta de cemento, y de los vacíos generados por procesos deficientes al momento de realizar la fundición del concreto.
- **Compacidad del concreto:** forma en la que se acomoda los ingredientes sólidos (cemento, grava y arena) que conforman el concreto, para ello es importante la dosificación y el control de calidad de los materiales, lo cual afecta la solidez del material.
- **Hermeticidad:** capacidad del concreto de conservar agua sin escapes visibles.

3.2.4 Cuidados en la elaboración de un concreto para que sea durable

(NTC 5551, 2007) define que para tener una expectativa de durabilidad conveniente de los elementos de concreto estructural, se deben identificar acciones que contrarresten en forma práctica y eficiente los mecanismos que se presenten sobre la estructura de concreto que afecten la durabilidad, como la intensidad de la exposición de los factores mencionados anteriormente. A continuación, se describen cuatro factores fundamentales que ayudan al aumento de la vida útil de la estructura:

- **Diseño de la estructura:** dimensionamiento, cálculo, valoración del tipo de agresores en el medio, definición del espesor de recubrimiento, determinación de los materiales, especificación del concreto durable frente al tipo de ataque y el tipo de protección adicional cuando es requerida, definición del tipo y frecuencia del mantenimiento.

- **Materiales:** uso de materiales adecuados y control de calidad.
- **Ejecución:** se requiere una buena práctica constructiva, se debe tener en cuenta que para lograr una baja permeabilidad se requieren métodos adecuados de colocación y consolidación, además de tener un vibrado adecuado.
- **Curado:** consiste en mantener unas condiciones de humedad y temperatura adecuada para que el concreto pueda mantener la tasa de hidratación requerida.

3.2.5 Generalidades del concreto

El concreto es un material que está conformado por cemento, agua, agregados y aditivos que representa una estructura plástica y moldeable, que luego adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes. Este material de construcción es el más utilizado debido a sus prestaciones mecánicas en estado fresco y endurecido, posee una alta resistencia, y puede ser moldeado para dar una gran variedad de formas y tamaños debido a su trabajabilidad (Aquino Castro, 2019).

- **Concreto reforzado:** Se permite únicamente en concreto de peso normal, dosificado, mezclado y muestreado, y evaluado, es decir que demuestre la calidad del concreto, colocado de acuerdo con la NSR-10. Al igual que el acero usado en el refuerzo para concreto compuesto por fibras dispersas de acero debe ser corrugado y cumplir con NTC 5214 (ASTM A820M).

3.2.6 Componentes del concreto

Cemento Portland.

- El cemento es un conglomerante hidráulico que tiene la propiedad de endurecerse después de ponerse en contacto con el agua. Este

se obtiene de pulverizar el Clinker Pórtland añadiendo el yeso o sulfato de calcio. Se permite adicionar otros productos siempre y cuando no afecten las propiedades del cemento resultante. Estos deben ser pulverizados juntamente con el Clinker (NTC 121, 1982).

Agua.

- El agua utilizada para la mezcla del concreto debe estar limpia y libre de sustancias que puedan ser perjudiciales para el concreto o el refuerzo como cloruros, ácidos, álcalis, aceites, sales, materiales orgánicos, entre otros. No se debe usar el agua si contiene sustancias que produzcan olor, color o sabor inusual, al menos que existan concretos elaborados con esta o indagación que indique que no afecta la calidad del concreto (NTC 3459, 2001).

Agregado natural.

- El agregado natural se origina de la explotación de fuentes naturales como depósitos de arrastres fluviales, glaciares, canteras de rocas y piedras naturales. Su aprovechamiento es en estado natural o luego de trituración para convertirlo en fragmentos más pequeños (Aquino Castro, 2019).

Agregado reciclado.

- El agregado reciclado procede de residuos de construcción y demolición (RCD), pero estos varían dependiendo de la estructura de la cual se originan. Según la NTC 6421 se permite usar agregado grueso reciclado (AGR) para concreto estructural en órdenes del 20%, y en concreto no estructural hasta un 100%.

Aditivos.

- Los aditivos se usan con el fin de modificar las propiedades del concreto, puede ser, en estado fresco, durante el fraguado o en estado endurecido, para ejecutarlo con buen rendimiento según la exigencia o trabajo dado, que cumpla los requisitos y determinaciones particulares de cada tipo de estructura. Por otros métodos o en forma muy económica, no es posible lograr los mismos rendimientos que nos ofrecen los aditivos como: mejorar el desempeño del concreto ante ciertas exigencias, garantizar la calidad del concreto en condiciones ambientales severas durante etapas como: mezclado, transporte, colocación y curado. Los aditivos químicos reductores de agua, acelerantes y retardantes deben cumplir los requisitos NTC 1299.

3.1.7 Cementantes alternativos y activación alcalina

La activación alcalina es un proceso químico mediante el cual materiales que pueden ser de origen natural (Metacaolín) o subproductos industriales (cenizas volantes, escoria de alto horno, desechos de ladrillos, puzolanas, metacaolín, entre otros), son utilizados para reemplazar el cemento Portland parcial (aproximadamente un 70%) o totalmente (un 100%). El aglutinante del geopolímero es un nuevo material cementante alternativo generado por la reacción de los materiales anteriores, denominados precursores, con un activador alcalino que pueden ser silicatos sódicos e hidróxidos, entre otros (Bendito Skariah, et al., 2022). El material endurece, generalmente a temperatura ambiente, y alcanza propiedades similares o inclusive superiores a las obtenidas con el cemento portland (Bendito Skariah, et al., 2022).

3.2 ANTECEDENTES

La durabilidad del concreto se define como la facultad para soportar el deterioro según el ambiente en el que se construya, con ello conservar las propiedades mecánicas en su expectativa de vida. Algunos estudios recientes relacionados a la durabilidad del concreto que contiene áridos reciclados provenientes de los residuos de demolición y construcción se describen a continuación:

(Thomas, Nazeer, & Wilson, 2018) estudian las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón que contiene 25 %, 50 % y 100 % agregado grueso de hormigón reciclado y reportan que el hormigón con áridos reciclados disminuye la durabilidad a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de AGR.

(Amorim Júnior, O.Silva, R. Díaz, & Ribeiro, 2019) realizaron el análisis de migración de cloruros en hormigón con 50 % y 100 % y reportan un aumento en la porosidad y en el coeficiente de absorción capilar, también la disminución de la resistencia a la compresión.

Debido a que la literatura muestra baja durabilidad cuando se usa agregado reciclado, (Kazmi, et al., 2020) estudiaron cinco métodos diferentes para el tratamiento de agregado reciclado, entre estos inmersión en ácido acético, carbonatación acelerada e inmersión en cal, los resultados muestran una zona de transición interfacial densa y porosidad mejorada, incrementando la durabilidad cuando se practica la inmersión en ácido acético y la carbonatación acelerada, técnicas respetuosas con el medio ambiente y eficaces para el rendimiento del hormigón con áridos reciclados.

(Amiri, Hatami, & Golafshani, 2021) con el fin de lograr un concreto ecológico reemplazaron el agregado grueso por reciclado en porcentajes de 25 % 50 %, y de manera simultánea utilizaron polvo de caucho residual en proporciones de 2.5 % y 5 % en peso de cemento, y

evaluaron las propiedades mecánicas y de durabilidad; sus resultados revelan que se reducen las propiedades mecánicas al aumentar las proporciones de ambos materiales reciclados, por otra parte la migración de los iones de cloruro en el hormigón disminuye cuando aumenta la proporción de polvo de caucho residual, en cambio el agregado de concreto reciclado influye de forma negativa en la durabilidad del concreto.

Un estudio realizado por (Bendito Skariah, et al., 2022) en concreto geopolimérico, fabricado con material cementante suplementario y sustitución completa o parcial con agregados reciclados provenientes de RCD, determinó que la trabajabilidad aumenta, pero a su vez aumenta la absorción de agua.

(Valencia Saavedra, Aguirre Guerrero, & Mejía de Gutiérrez, 2022) evaluaron cementos activados, los cuales fueron fabricados con un 80 % de material precursor y un máximo de 20 % de OPC mezclado con un activador alcalino. Realizaron ensayos de técnicas de corrosión acelerada (voltaje impreso) y pruebas electroquímicas tras inmersión en NaCl al 3,5%, al evaluar el avance del proceso corrosivo en el acero de refuerzo reportan que los aceros se mantienen en buen estado hasta el final de los ensayos a diferencia de los concretos de referencia, e indican que los criterios utilizados en las normas para concretos tipo portland convencionales no aplican a concretos geopoliméricos.

En otro estudio reciente se investigó el desempeño de durabilidad de mezclas de concreto activado con álcalis, donde se utilizaron como precursores cenizas volantes y cenizas de fondo de incineradores procedentes de desechos sólidos municipales. Se reporta mayor trabajabilidad, por lo tanto, al reducir el contenido de agua, se da lugar a una menor porosidad y aumento en la durabilidad, en comparación con las mezclas basadas en OPC (Miguel, de Brito, & Silva, 2023).

3. METODOLOGÍA

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Con el fin de definir las principales propiedades de los agregados utilizados en el concreto, se realizaron los ensayos recomendados en las normas para la caracterización del agregado grueso reciclado, agregado grueso natural y agregado fino natural. Los ensayos se ejecutaron en la Escuela de Ingeniería de Materiales en el laboratorio del Grupo de Materiales Compuestos (GMC) de la Universidad del Valle.

4.1.2 Granulometría (NTC 77)

Siguiendo los lineamientos de la NTC 77 se tomó una muestra, dependiendo del agregado y se secó en horno a una temperatura de 110 °C durante 24 horas, se colocó en una serie de tamices con aberturas cada vez más pequeñas para encontrar la distribución del tamaño de partículas que conforman el agregado.

- **Agregado grueso reciclado:** La muestra tomada fue de 2000 gr, y en la *Tabla 1*, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 1. Ensayo granulométrico del agregado grueso reciclado.

Abertura de tamiz [mm]	Nº de tamiz [in]	Peso retenido [gr]	% total retenido en cada tamiz	% retenido acumulado entre tamices	% total que pasa en cada tamiz
25,4	1	0	0	0	100
19,1	3/4	45,2	2,31	2,31	97,69
12,7	1/2	199,1	10,17	12,48	87,52
9,52	3/8	234,9	12,00	24,49	75,51
6,73	1/4	896,4	45,80	70,29	29,71
4,76	#4	293,1	14,98	85,27	14,73
2,38	#8	244,4	12,49	97,76	2,24
FONDO [gr]		43,9	2,24	100,00	0,00
TOTAL [gr]		1957	100,00		

El porcentaje de error por pérdida de material en el tamizaje fue de 0.26% y se obtuvo que el tamaño máximo nominal del agregado fue de 1/2".

- **Agregado grueso natural:** La muestra tomada fue de 2000 gr, se repite el mismo proceso mencionado previamente, en la *Tabla 2*, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2. Ensayo granulométrico del agregado grueso natural.

Abertura de tamiz [mm]	N° de tamiz [in]	Peso retenido [gr]	% total retenido en cada tamiz	% retenido acumulado entre tamices	% total que pasa en cada tamiz
19,1	3/4	0	0	0	100
12,7	1/2	274,8	13,91	13,91	86,09
9,52	3/8	984,3	49,83	63,74	36,26
6,73	1/4	657,1	33,27	97,01	2,99
4,76	#4	29,8	1,51	98,52	1,48
2,38	#8	11,2	0,57	99,08	0,92
FONDO [gr]		18,1	0,92	100,00	0,00
TOTAL [gr]		1975,3	100,00		

El porcentaje de error por pérdida de material en el tamizaje fue de 0.24% y se obtuvo que el tamaño máximo nominal 1/2".

- **Agregado fino natural:** La muestra tomada fue de 1000 gr, y se utilizaron los tamices #16, #30, #50, #100, #200 (*Figura 2*); en la *Tabla 3* se muestran los resultados obtenidos.



Figura 2. Tamices agregado fino natural.

Tabla 3. Ensayo granulométrico del agregado fino natural.

Abertura de tamiz [mm]	N° de tamiz [in]	Peso retenido [gr]	% total retenido en cada tamiz	% retenido acumulado entre tamices	% total que pasa en cada tamiz
2,38	#8	0	0	0	100
1,19	#16	180,3	18,38	18,38	81,62
0,6	#30	176,3	17,98	36,36	63,64
0,3	#50	427	43,54	79,90	20,10
0,15	#100	1,2	0,12	80,02	19,98
0,07	#200	195,1	19,89	99,92	0,08
FONDO [gr]		0,8	0,08	100,00	0,00
TOTAL [gr]		980,7	100		100

El módulo de finura fue de 2.15, el porcentaje de error por pérdida de material en el tamizaje fue de 1.21%.

Impurezas orgánicas del agregado fino (NTC 127)

Para la determinación de materia orgánica en el agregado, en un recipiente graduado especificado en la norma se introdujo el agregado fino hasta el nivel de 130 ml, luego se añadió solución de hidróxido de

sodio al 3% hasta 200 ml. Posteriormente, se tapa la probeta, se agita y se deja en reposo por 24 horas.

El color que se obtuvo de la muestra pasadas las 24 horas se muestra en la *Figura 3*.



Figura 3. Comparación de color del líquido del agregado fino natural.

Usando la comparación de la muestra con la escala de colores, se puede evidenciar que el líquido sobrenadante presenta una coloración similar al nivel 2, lo cual indica que el agregado fino no contiene compuestos orgánicos perjudiciales, por ende, es apto para utilizarse en concretos.

4.1.3 Contenido total de humedad de los agregados (NTC 1776)

Se tomó una muestra de agregado fino natural de 500 gr y una de agregado grueso natural y agregado grueso reciclado de 2000 gr en estado húmedo, luego se llevaron las muestras al horno por 24 horas a

una temperatura de 110 °C, obteniendo los porcentajes de humedad presentados en la *Tabla 4*, donde se evidencia que la mayor absorción la obtiene el AGR.

Tabla 4. *Porcentaje de humedad de los agregados.*

TIPO DE AGREGADO	% W
Fino Natural	1,08
Grueso Natural	0,72
Grueso reciclado	1,78

Es importante mencionar que este procedimiento se realiza un día antes de elaborar los concretos.

4.1.4 Masa unitaria suelta y compacta (NTC 92)

Con el fin de determinar la masa unitaria en estado compacto y suelta, al igual que el cálculo de los vacíos entre partículas, en los agregados fino, grueso natural y grueso reciclado se realizan los siguientes procedimientos.

- **Masa unitaria suelta:** Se tomó una muestra de agregado previamente seca en el horno por 24 horas, se vertió desde una altura la cual no sobrepasa los 50 mm sobre el borde del molde, se niveló y procedió a determinar la masa del molde con el contenido como se muestra en la *Figura 4*. Cabe resaltar que los moldes son diferentes, para agregado fino tiene una altura de 10 cm y 15 cm para grueso.
- **Masa unitaria compactada:** La muestra previamente seca en el horno durante 24 horas, se somete a el procedimiento de apisonamiento, que consistió en rellenar un tercio del molde y se compacta con 25 golpes uniformemente distribuidos en toda la superficie, sin permitir que la varilla de apisonamiento golpee el

fondo del molde, se repitió el mismo procedimiento para las dos capas restantes teniendo en cuenta que la varilla no debe penetrar la capa anterior. Finalmente, se nivela la superficie como se observa en la *Figura 5*.

De los procedimientos anteriormente mencionados se obtuvo los resultados presentados en la *Tabla 5*.



Figura 4. Masa unitaria suelta y compacta agregado fino.



Figura 5. Masa unitaria suelta y compacta agregado grueso.

Tabla 5. Resultados Masa unitaria suelta y compacta.

TIPO DE AGREGADO	Masa unitaria suelta [kg/m ³]	Masa unitaria compacta [kg/m ³]	% Vacíos entre partículas suelta	% Vacíos entre partículas compacta
Fino	1473,90	1705,20	42,60	37,88
Grueso natural	1524,11	1705,20	46,26	39,88
Grueso reciclado	1597,30	1694,26	36,59	32,74

Para el agregado grueso natural se obtuvo una masa unitaria suelta igual a 1524.11 kg/m³ y una masa unitaria compacta de 1705.20 kg/m³ aumentando su masa en 11.88%, obteniendo un comportamiento similar para AGR con un aumento de 6.07% una vez se compacta el material. Los resultados perciben que la masa unitaria del agregado en estado compacto es mayor al valor de la masa unitaria en estado suelto, esto ocurre porque la grava en estado compacto tiene un grado de acomodamiento de las partículas mayor al que se tiene en estado suelto, lo que hace que los espacios entre sus partículas sean menores. Así, el volumen que ocupa el agregado en estado suelto es mayor, en consecuencia, su masa unitaria es menor. Finalmente, los resultados de la masa unitaria del agregado en sus dos estados inciden directamente en los contenidos de vacíos en las muestras, obteniendo valores de 46.26 % y 39.88 % de contenidos de vacíos para el agregado grueso natural, en estado suelto y compacto respectivamente, también de 36.59 % y 32.74% para el agregado grueso reciclado en la misma lógica (véase *Tabla 5*). Cabe resaltar que el resultado de AGR en peso unitario suelto fue comparado con literatura, de la cual encontramos una tendencia similar de acuerdo con el artículo (Robayo Salazar, Valencia, & Mejía de Gutierrez, 2022).

Densidad y absorción de los agregados

Para determinar la densidad de agregados gruesos y finos se utilizaron las normas NTC 176 y 237, respectivamente.

Agregado grueso (NTC 176): Se secó la muestra al horno a 110° , luego se sumergió en agua durante 24 horas. Después de ello se realiza el secado superficial con un paño absorbente y se registra la masa en estado saturado (Masa de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca), con ella se procedió a poner en el contenedor con el valor de tara e inmerso en agua a una profundidad suficiente que cubra la masa de ensayo, se extrae el aire atrapado y se determina la masa aparente en el agua como se ve en la *Figura 6*, que equivale a la masa de la muestra de ensayo saturada. Finalmente, esa muestra es puesta en el horno para determinar el parámetro. Los resultados se reportan en la *Tabla 6*.



Figura 6. Balanza hidrostática.

Tabla 6. Densidad y absorción del agregado grueso.

	Agregado grueso natural	Agregado grueso reciclado
Densidad aparente (g/cm^3)	2,57	2,52
Densidad nominal (g/cm^3)	2,74	2,81
% Absorción	1,63	4,04

Los resultados de densidad aparente para el agregado grueso natural y reciclado fue de 2.57 y 2.52 g/cm³, respectivamente. La absorción del agregado grueso reciclado es superior a la del agregado natural, este resultado es válido, puesto que habitualmente el agregado grueso natural tiene una capacidad de absorción baja y el agregado grueso reciclado se compone de materiales absorbentes que son hormigón triturado y mortero. Los valores están en los lineamientos de la norma para el ensayo en curso, por ello se concluye que este agregado cumple con los requisitos establecidos para la fabricación del concreto.

Agregado fino (NTC 237): Después de saturado el agregado fino 24 horas, se procedió a aplicar una fuente de calor hasta alcanzar la condición de saturado y superficialmente seco, el cual se determina a través del cono y pisón, después de darle 25 golpes con el pisón dentro del agujero del cono, este se retira y se tiene que ver como la *Figura 7*, lo cual indica que está en la condición deseada. Se introdujo 500 gr de la arena en un picnómetro y se removió las burbujas de aire, se pesó la masa del picnómetro con agua hasta la marca de calibración como observamos en la *Figura 7*, finalmente se introdujo en el horno para evaluar su masa. Los resultados obtenidos se reportan en la *Tabla 7*.



Figura 7. a) Condición saturada y superficialmente seca, y **b)** masa del picnómetro con agua.

Tabla 7. Densidad y absorción del agregado fino.

	Agregado fino
Densidad aparente (g/cm ³)	2,57
Densidad nominal (g/cm ³)	2,74
% Absorción	2,35

4.1.5 Coeficiente de los ángeles (ASTM C131)

Este ensayo se realiza con el fin de comprobar la resistencia de la fragmentación por colisión en el agregado grueso, consiste en un cilindro hueco de acero puesto de forma horizontal, con una abertura que permite ingresar y retirar la muestra junto con las esferas que tienen como funcionamiento sacudir el agregado. A medida que el tambor gira, una placa recoge la muestra y las esferas de acero las traslada hasta el lado opuesto del tambor donde las deja caer, creando un efecto de impacto y trituración. El número de esferas depende de la granulometría de la muestra de ensayo. Previo al ensayo se prepara la muestra, primero se lava, y posteriormente se seca en el horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, luego según el tipo de granulometría de nuestro agregado, tenemos que determinar la masa del ensayo en los tamaños indicados en la norma.

En nuestro caso según la norma, la granulometría se clasificaba como tipo B, tal como evidenciamos en la *Tabla 8* por ello la masa de nuestro ensayo es de 5000 g, de los dos tamaños máximos pasantes, se clasifica 2500 g, como se observa en la *Tabla 8* al igual que sus resultados.

Tabla 8. Selección del tipo de granulometría según la ASTM C 131

Granulometría	N° de esferas	Masa de la carga [g]
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

Tabla 9. Resultado coeficiente de los ángeles.

AGREGADO GRUESO NATURAL		AGREGADO GRUESO RECICLADO	
Peso grava seca 1/2 [g]	2500	Peso grava seca 1/4 [kg]	2500
Peso grava seca 3/8 [g]	2500	Peso grava seca #4 [kg]	2500
Total muestra seca [kg]	5000	Total muestra seca [kg]	5000
Total muestra seca que paso por #12	4380	Total muestra seca que paso por #12	4145
Pérdida [g]	620	Pérdida [kg]	855
% Perdida	12,4	% Perdida	17,1

Los resultados indican que el agregado que tiene mayor porcentaje de pérdida es el AGR reciclado con una diferencia de 4,7%, estos valores se encuentran en un rango bajo y dentro de los parámetros de desgaste requeridos por la ASTM C131, lo que permite concluir que son aptos para producir los concretos.

4.2 PROCEDIMIENTO PARA OBTENCIÓN DEL MATERIAL CEMENTANTE

4.2.1 PASTAS

Con el fin de que el residuo de ladrillo se endurezca de tal forma que sus propiedades mecánicas y durabilidad sean similares o mejores en relación al cemento convencional, se utilizó una pasta cementicia basada en residuo de ladrillo como precursor y adicionada con un 10% de cemento portland ordinario, y como activadores silicato sódico e hidróxido de sodio. Las dosificaciones fueron evaluadas con el software

Minitab, utilizando la metodología de superficie de respuesta y como variables de estudio, la relación cementante/activadores ($RL+OPC/NaOH+Na_2SiO_3$) y la relación de $NaOH/Na_2SiO_3$. La optimización de las mezclas con respecto a la resistencia a la compresión a los 28 días permitió seleccionar la dosificación óptima a partir de lo cual se evaluó el efecto del aumento del porcentaje de OPC en un 15 y 20 %, en cuanto a resistencia mecánica y tiempo de fraguado, para así escoger la dosificación que se requería para el diseño de los concretos.

Para preparar la pasta cementicia se mezclan el material precursor (residuo de ladrillo) y OPC de forma homogénea en la mezcladora mecánica. Luego se prepara la disolución alcalina, la cual está compuesta de silicato de sodio (Na_2SiO_3), hidróxido de sodio ($NaOH$), para ello primero se disuelve el hidróxido de sodio en agua, se mezcla el silicato de sodio, se coloca la disolución en la mezcladora y se trabaja a dos velocidades: 2 minutos a velocidad lenta y 2 minutos velocidad rápida, posteriormente se moldearon en cubos de 2x2x2 cm y luego de 24 horas se desmoldan y se colocan en cámara de curado bajo condiciones controladas.

4.2.2 MORTEROS

Basado en la muestra óptima obtenida en pastas, se prepararon morteros y se evaluó diferentes proporciones de la relación pasta:arena (1:1, 1:2, 1:2,75). Se realizó el mismo procedimiento de moldeo, sin embargo en este caso las medidas del cubo son de 5x5x5 cm, luego fue curado y ensayo de resistencia a la compresión.

4.2.3 CONCRETOS

El procedimiento para determinar las relaciones de (arena, grava y agua) fue el recomendado en la norma ACI 211.1, y la condición para la cual se diseña este concreto es para ambientes de carbonatación y

cloruros. Para el estudio se elaboró un concreto de referencia considerando una resistencia mínima de 28 MPa y un asentamiento de 25 – 100 mm para garantizar la trabajabilidad de la mezcla y fácil encofrado. Se realizaron cuatro mezclas incluyendo la de referencia, la nomenclatura de cada una de las mezclas se presenta en la *Tabla 10*. La estimación de la combinación granulométrica ideal del concreto se determinó de la aproximación óptima del método Fuller-Thompson, siendo este ajuste granulométrico de 55 % grava y 45 % arena (ver *Figura 8*). Con el objetivo de evaluar el efecto del agregado grueso reciclado como remplazo parcial o total en las propiedades físicas y mecánicas, se realizó el diseño de mezclas con diferentes remplazos de agregado grueso reciclado (20 % y 100%) expresadas respecto al volumen de concreto en kg/m³ (*Tabla 11*). En total se produjeron cuatro mezclas; una mezcla de concreto de referencia con 100 % de agregados naturales y dos mezclas de concreto con remplazo parcial 20 y 100 % de agregado grueso reciclado. Finalmente, una mezcla con cemento no convencional activado alcalinamente que contiene únicamente agregado grueso reciclado.

Tabla 10. Nomenclatura probetas.

NOMENCLATURA	
CCAGN	Concreto convencional con agregado grueso natural
CC20AGR	Concreto convencional con 20% de agregado grueso reciclado
CC100AGR	Concreto convencional con 100% de agregado grueso reciclado
CN100AGR	Concreto no convencional con 100% de agregado grueso reciclado

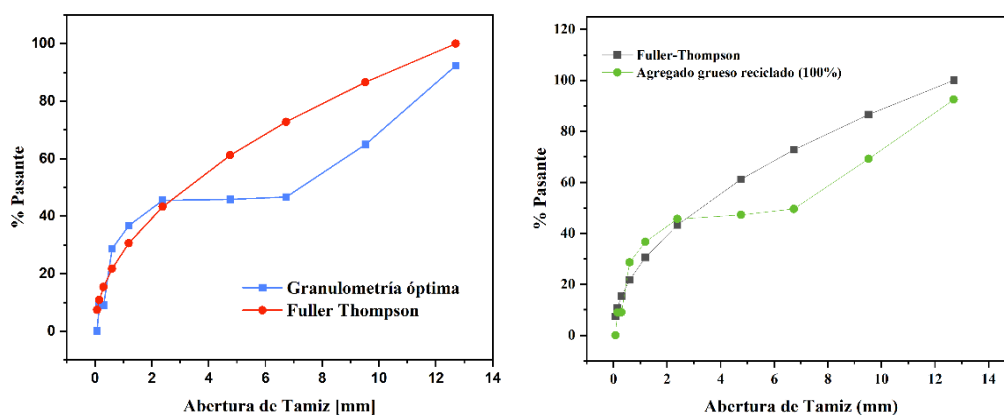


Figura 8. Método Fuller y Thompson.

Los diseños de mezcla para un metro cúbico de concreto, con las respectivas sustituciones de agregado grueso se presentan en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Dosificación concretos por metro cúbico.

	CCAGN	CC20AGR	CC100AGR	CN100AGR
% Reemplazo AGR	0	20%	100%	100%
Peso [Kg]				
Agua	235,3	231,0	248,6	127,3
Cemento	500,0	500,0	500,0	75,0
Grueso natural (AGN)	922,2	590,2	-	-
Fino natural	754,5	754,7	754,5	754,5
Residuo de ladrillo	-	-	-	424,9
Silicato de Sodio	-	-	-	160,0
Hidróxido de Sodio	-	-	-	40,0
Agregado grueso reciclado - AGR	-	147,6	922,3	732,4

Preparación del concreto

Con el fin de realizar los ensayos para evaluar el comportamiento del concreto, se produjeron 32 probetas de concreto (20 cilindros y 12 cubos).

Los moldes para las probetas de concreto disponibles en el laboratorio tienen las siguientes medidas:

- Cilindros: 8 cm de diámetro y 15 cm de altura.
- Cubos: 5 cm por lado.

Llenado de moldes, desmolde y curado.

Primeramente, se engrasan los moldes para que se facilite a la hora de desmoldar. Luego, con la ayuda de un palustre, se colocan tres capas para los cilindros y dos capas para los cubos, apisonadas cada una con 25 golpes, sin cruzarse con la capa anterior. Llenos los cilindros con las tres capas, se golpea con un martillo de goma las probetas con 25 golpes para deshacer algún vacío, se procede a enrasar y así termina el proceso de encofrado, después, se guardan las probetas en un lugar donde no cuenten con la luz directa del sol, y son desencofradas a las 24 horas próximas para ser colocadas en el sitio de curado y ensayar a los 7, 28 y 90 días (*Figura 9*).



Figura 9. Cilindros y cubos en curado.

Ensayos en el cemento:

Ensayos en estado fresco:

- **Tiempo de fraguado:** para encontrar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico se sigue la NTC 118, en la mezcladora mecánica se realiza la pasta cementante durante 4 minutos y se encofra con un molde adecuado para el ensayo como se muestra en la *Figura 10*. Utilizando el aparato de Vicat, se determinó la penetración de la aguja cada minuto, hasta encontrar el tiempo de fraguado inicial el cual está dado por una penetración de 25 mm, y el tiempo de fraguado final por 0 mm.



Figura 10. Ensayo tiempo de fraguado.

Ensayos en el concreto:

Ensayos en estado fresco:

- **Asentamiento:** Según la NTC 396. Se coloca el cono de Abrams en una superficie metálica rígida, pisando permanentemente las

agarraderas de abajo evitando el movimiento. Se llena mediante tres capas, apisonando cada una con 25 golpes con la ayuda de la varilla sin punta, sin perturbar la capa anterior. Terminadas las tres capas, se enrasa el concreto y se procede a retirar de forma uniforme el cono. Una vez retirado, se coloca el cono invertido junto a la muestra de concreto y se mide la diferencia de altura entre estos, obteniendo así, el asentamiento.

Ensayos en estado endurecido:

- **Resistencia a la compresión:** el ensayo de resistencia a compresión de las probetas de concreto (NTC 673). Los cilindros son retirados de la cámara de curado, mínimo una hora antes del ensayo para que se sequen al aire libre. Proceden a ser ensayados mediante la aplicación de una carga axial, a la velocidad 0.250 MPa/seg descrita en la norma, hasta que el cilindro falla (*Figura 11*). La resistencia se obtiene dividiendo la fuerza axial aplicada, sobre el área circular de aplicación de la fuerza.



Figura 11. Prensa hidráulica para ensayos de compresión uniaxial.

Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido:

Para determinar la gravedad específica, la absorción y los vacíos en el concreto endurecido se realiza según la ASTM C 642. Primero se cortaron los cilindros en la mitad, sus dimensiones son aproximadamente 7.5 cm altura y 8 cm de diámetro. Luego se someten las muestras al horno durante 24 horas a 110°C, se retiran y cuando se encuentren a temperatura ambiente se registra su masa. Se deja en agua las muestras durante 48 horas para alcanzar su condición de saturación, se seca superficialmente y se toma su peso. Posterior a ello, se hierve la muestra en un recipiente con agua que la cubra totalmente durante 5 horas, después, se deja reposar por 14 horas para que alcance una temperatura entre 20°C y 25°C, se seca superficialmente con una toalla y se registra su peso. Por último, se determina su masa en agua.

Absorción capilar: el ensayo para determinar la absorción por capilaridad se realiza siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C1585. Para este ensayo se cortan las muestras de concreto endurecido, las cuales tienen una forma cilíndrica, con 8 cm de diámetro y 6 cm de altura. Las muestras se dejan secando en horno a 50 °C por 48 horas, se sellan contra el agua en sus caras laterales mediante la aplicación de tres capas de acronal aplicadas cada 30 minutos y se repite el secado en horno a 40 °C por 48 horas. Una vez tengamos la muestra en esta condición, se escoge un recipiente y en el fondo se coloca una espuma saturada de agua de un grosor de 2 mm aproximadamente, encima de este se colocan las muestras y se toman las medidas de peso secándolas superficialmente en los tiempos determinados que indica la norma.

- **Ensayo de migración de Cloruros:**

Prueba rápida: para este ensayo se tiene en cuenta la norma ASTM C1202, se cortan cilindros de espesor de 5 cm, y se forran con cinta

para ductos de tal forma que no haya aberturas para que no entre el agua fácilmente, luego se sumergen estas muestras en agua cal (Ca(OH)_2) durante 48 horas, posterior a ello se monta la probeta en la celda y se cierra para verificar que no presente fuga debajo o hacia el otro lado de la celda, esto agregando solución Ca(OH)_2 saturada en uno de los lados y se espera por 30 minutos.

En seguida, se agregan 250 ml de solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3.5% en el lado correspondiente y se coloca un electrodo de acero inoxidable a cada lado de la celda, se procede a conectar cada electrodo respectivamente a los terminales, tal como se observa en la *Figura 12*.

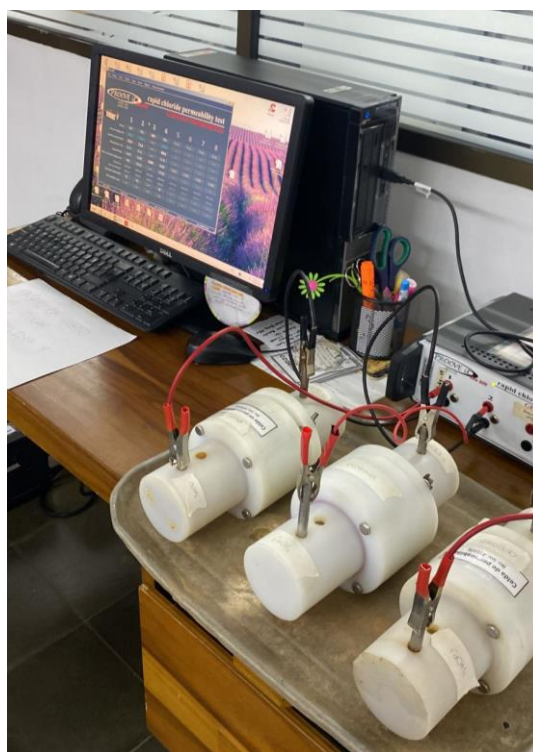


Figura 12. Permeabilidad del ion cloruro.

Voltaje impreso: La probeta para este ensayo es cilíndrica tiene con una varilla # 2 de 15 cm colocada a nivel central, a la cual se le aplica

un recubrimiento epóxico y es pesada previamente como se muestra en la *Figura 13*. Al momento del encofrado es importante que la parte sobresaliente de la varilla sea de 1 cm. Finalmente, se recubre la parte superior donde va la varilla con silicona para no permitir el ingreso de los cloruros.



Figura 13. Varilla con recubrimiento epóxico.

Para determinar la permeabilidad a los iones cloruro en cámara acelerada se tiene en cuenta la norma NT BUILD 356. Se miden 3 cm por debajo de la parte superior del cilindro, luego en un recipiente se sumerge la muestra parcialmente en una solución de NaCl al 3.5% por debajo estos y se coloca una placa de acero inoxidable aproximadamente de 200 x 300 mm. Se procede a conectar la lámina que es el electrodo negativo a una fuente de alimentación de voltaje constante de 5 voltios siendo la varilla de acero el electrodo positivo. Se debe tener en cuenta que el nivel de agua no debe bajar de los 3 cm, por lo que se debe llenar constantemente el recipiente (véase la *Figura 14*). Este procedimiento se hace hasta que la muestra presente una fisura en

la dirección del acero, por la cual permea los productos de corrosión. Se registra el cambio de corriente en el tiempo, y esta fisura corresponde a un incremento momentáneo de la corriente.



Figura 14. Montaje permeabilidad a los iones de cloruros.

- **Carbonatación:**

Perfiles de carbonatación: se somete un espécimen de concreto de medidas 8 cm de diámetro y 15 cm de altura, al cual se le pintaron sus extremos con acronal aplicando 3 capas uniformes, y se colocan en la cámara acelerada de carbonatación (*Figura 15 a*). Se corta cada 7, 14, 28, 42, 56 y 90 días con el fin de observar el avance de la carbonatación. Para ello se utiliza como revelador indicador fenolftaleína al 1 %, el concreto que no está afectado revela color morado y el lado carbonatado obtiene el color normal del hormigón (incoloro) (*Figura 15 b*).

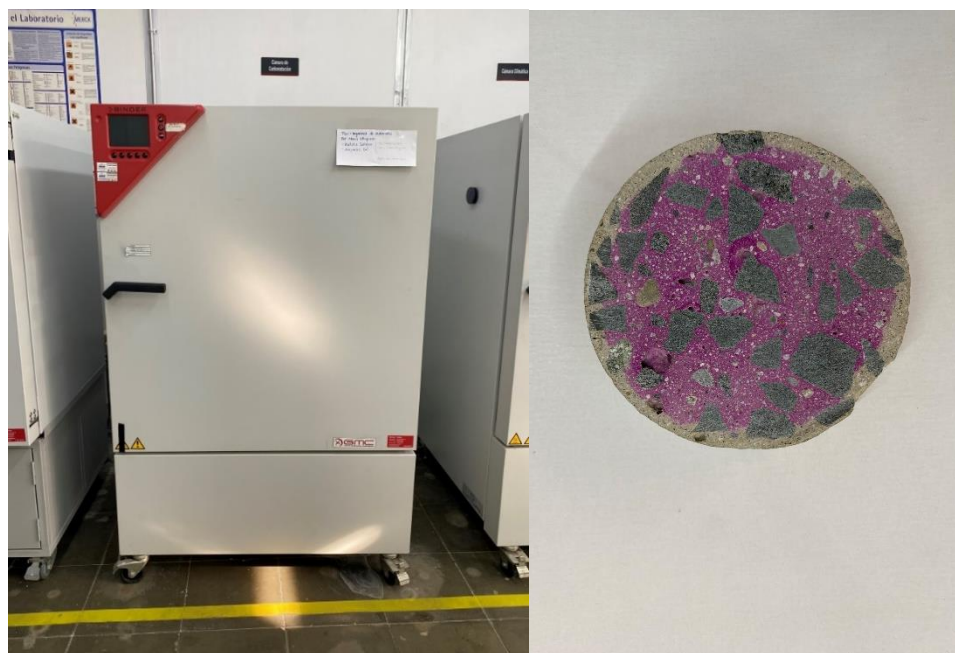


Figura 15. (a) Cámara y (b) revelación de carbonatación.

Resistencia a la compresión: se ensayaron dos cubos por mezcla antes de someterse al ambiente carbonatado, luego se colocaron en la cámara de carbonatación (Figura 16 a) y se hizo el ensayo de resistencia a la compresión a 7, 28 y 90 días de exposición (Figura 16 b).



Figura 16. (a) Cubos en la cámara, (b) Ensayo de Resistencia a la compresión ambiente carbonatado.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE ACTIVACIÓN ALCALINA

Los resultados de la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas se incluyen en la *Figura 17*, cabe anotar que estas pastas contienen 10% de OPC, y se varió con las relaciones de activadores vs cementante, $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{RCe} + \text{OPC}$, y de $\text{NaOH} / \text{Na}_2\text{SiO}_3$. En la figura 17, correspondiente al grafico de contorno se evidencia que los mejores resultados se obtienen cuando las relaciones de $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{RCe} + \text{OPC}$ y $\text{NaOH} / \text{Na}_2\text{SiO}_3$, están en rangos de 0,25 a 0,4 para las dos relaciones, por lo que se seleccionan 2 mezclas como óptimas (Tabla 12).

Tabla 12. Relaciones mezcla óptima en pastas.

Pasta	$(\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{RCe} + \text{OPC})$	$\text{NaOH} / \text{Na}_2\text{SiO}_3$
Optima 1	0,25	0,4
Optima 2	0,4	0,25

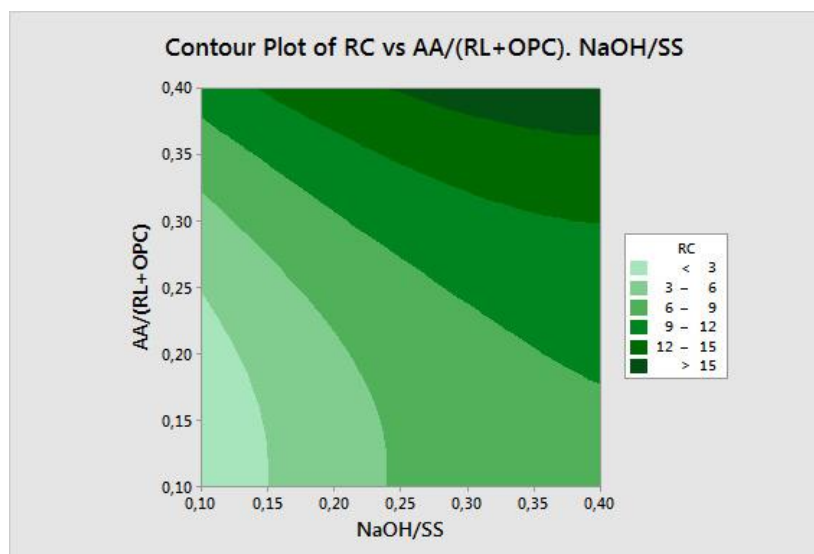


Figura 17. Resultados de resistencia a la compresión para pastas con 10% de OPC.

Las resistencias obtenidas para la mezcla óptima 1 fue de 14,65 MPa y de 19,24 MPa para la óptima 2. A continuación se realizó el estudio del contenido de OPC, para lo cual se incrementó a 15 y 20 %. Los resultados se incluyen en la *Figura 18*, donde se observa que el mejor comportamiento corresponde a la pasta activada alcalinamente con 15 % de OPC en las proporciones de la mezcla óptima 2, el aumento fue 12,84 % y el valor promedio obtenido fue de 21,71 MPa.

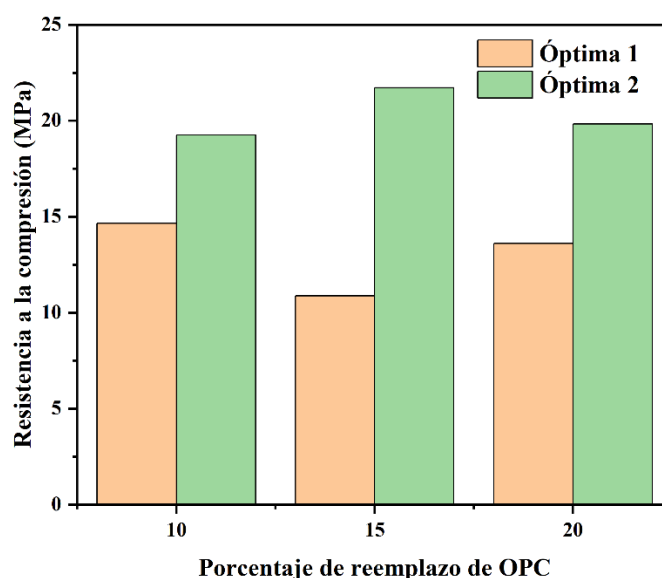


Figura 18. Resistencia a la compresión en pastas óptimas con 10, 15 y 20% de OPC

Tiempo de fraguado:

El resultado obtenido en este ensayo, evidencia que la pasta cementicia de activación alcalina tiene rápido fraguado, puesto que su tiempo inicial es de 30 minutos, este se obtiene cuando hay una penetración de 25 mm. Finalmente, cuando la aguja de Vicat no penetra la muestra, corresponde al tiempo de fraguado final que en este caso se dio en 76 minutos (1 hora y 16 min). En la *Figura 19* se puede observar este comportamiento.

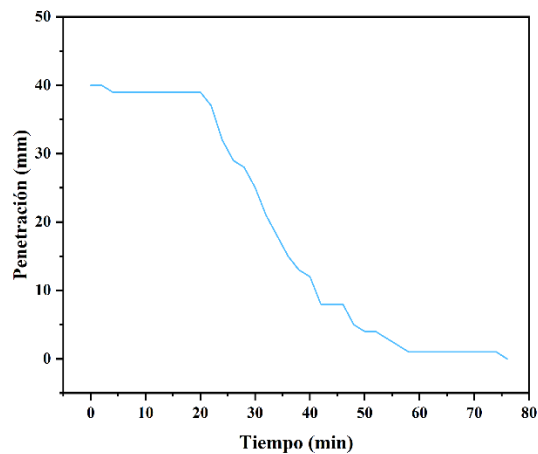


Figura 19. Ensayo de tiempo de fraguado.

5.2 MORTEROS

Con la mezcla cementicia óptima (mezcla 2), se ensayó diversas relaciones de cemento:arena para evaluar cómo afecta el incremento de arena en la resistencia a la compresión, definiendo así que la relación 1:1 es la que obtiene mayor resistencia a la compresión como se puede observar en la *Figura 20*. Estos resultados presentan comportamiento a los reportados por (Robayo Salazar, Valencia, & Mejía de Gutierrez, 2022).

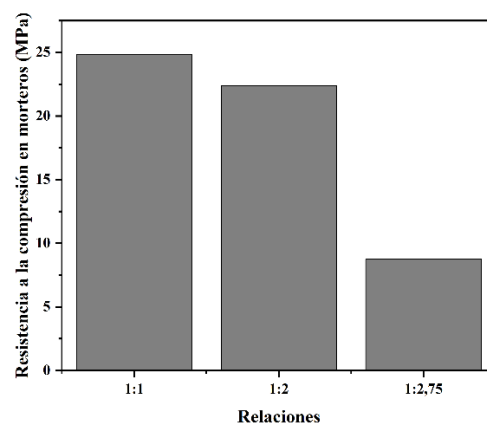


Figura 20. Resistencia a la compresión en morteros.

5.3 ENSAYOS DEL CONCRETO ESTADO FRESCO: ASENTAMIENTO

Los resultados de este ensayo mostraron tendencias crecientes al momento de incrementar el porcentaje de remplazo de agregado grueso reciclado en las mezclas de concreto. La mezcla de referencia tiene consistencia seca, mientras al incluir 100 % de agregado grueso reciclado la muestra es semiseca, y en el caso de la mezcla de activación alcalina y agregado grueso reciclado por el contrario es súper fluida, esto se atribuye a la presencia de los activadores alcalinos. En general, estos activadores alcalinos hacen que el concreto sea muy trabajable, como revela un estudio enfocado a trabajabilidad, aunque un aumento en la proporción de solución de NaOH puede disminuir la trabajabilidad de las mezclas (Ganesh, et al., 2023).

En la *Figura 21* se pueden observar los resultados de asentamiento obtenidos para las cuatro mezclas y en la *Figura 22* sus respectivas fotografías.

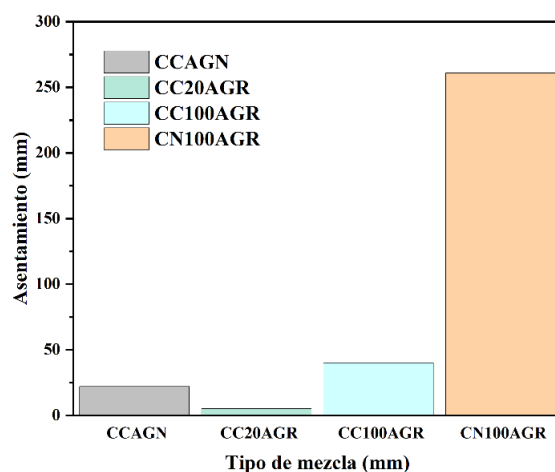


Figura 21. Asentamiento de cada mezcla de concreto.



A. CCAGN: 22 mm



B. CC20AGR: 5 mm



C. CC100AGR: 40 mm



D. CN100AGR: 261 mm

Figura 22. Fotografía de ensayo de asentamiento (slump) para cada tipo de muestra.

Se observa que al incorporar un 100 % de AGR en las mezclas de referencia se incrementa la trabajabilidad de los concretos, este comportamiento difiere con algunos reportes donde se considera que al absorber más agua el agregado reciclado la trabajabilidad de las mezclas podría ser inferior.

5.3 ENSAYOS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se ve beneficiada por el agregado grueso reciclado de manera positiva a medida que aumentan las edades de ensayo, dado que se hace visible un aumento en la resistencia con respecto a la mezcla patrón para edades prolongadas (Véase *Figura 23*).

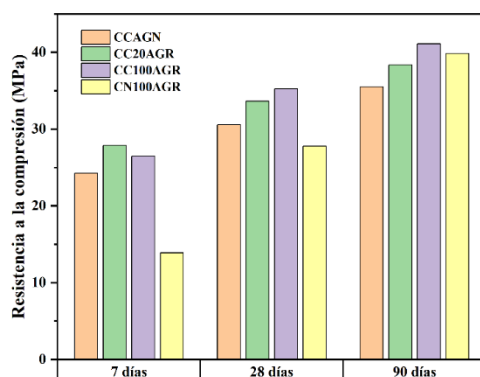


Figura 23. Resultados del ensayo de compresión axial.

Con relación al porcentaje de agregado grueso reciclado para las mezclas a base de OPC, en general, a las diferentes edades de exposición se evidencia un incremento de la resistencia a la compresión. Mientras, se evidencia un decaimiento de la resistencia a 7 días del orden de 4,91 % cuando la sustitución es de 100 %, a posteriores edades de curado, los incrementos de la resistencia a la compresión en comparación con la mezcla de referencia (CCAGN) son de 15.26 % a 28 días y 15.77 % a 90 días, así la mezcla con 100% de agregado grueso reciclado es la que posee mayor resistencia (40 MPa). Es importante mencionar que diversos estudios evidencian que a mayor porcentaje de reemplazo AGR menor resistencia de compresión, este factor no siempre es el predominante como observamos en este caso, la resistencia a la compresión también puede estar influenciada por la acomodación de los agregados. En el

concreto con agregado grueso reciclado, existen tipos adicionales de superficies de contacto para la transferencia de carga, que incluyen la superficie de contacto del mortero viejo con el agregado (Tipología A) y las superficies de contacto del mortero viejo con el mortero viejo, como se muestra en la *Figura 24*. (Tipología C) (Thomas, Nazeer, & Wilson, 2018).

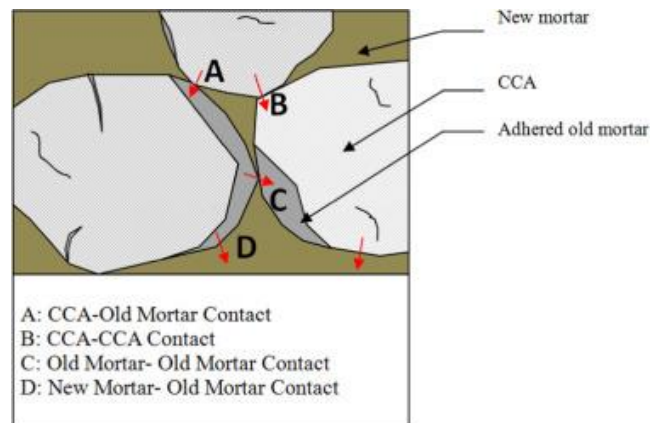


Figura 24. Superficies de contacto para la transferencia de carga.

La resistencia del hormigón aumenta a medida que crecen las edades de ensayo, independientemente de las combinaciones de mezcla. Se hace visible un aumento con respecto al concreto de referencia (CCAGN) para todas las mezclas con cemento convencional y agregado grueso reciclado. Sin embargo, la única mezcla que tiene menor resistencia que la CCAGN es la activada alcalinamente, en su edad de ensayo de 7 y 28 días. No obstante, se observa que para 90 días de curado la mezcla activada alcalinamente crece 43.66 % en paralelo a su resistencia a 28 días, obteniendo el mayor incremento en comparación de los demás concretos, el aumento de resistencia se debe a una zona interfacial más densa establecida entre el agregado y la pasta de geopolímero (Singh, Ishwarya, Gupta, & Bhattacharyya, 2015). Algunos autores comentan que la pasta/mortero altamente poroso adherido a los agregados reciclados podría reaccionar con la solución alcalina que conduce a la

geopolimerización de la ITZ original, lo que daría mejores propiedades al concreto geopolímero (Bendito Skariah, et al., 2022).

Los tipos de falla alcanzados en todos los cilindros fueron del tipo 4, según la norma NTC 673, que se refiere a una fisura diagonal a través de los extremos ver *Figura 25*.



A. Falla CCAGN



B. Falla CC20AGR



C. Falla CC100AGR

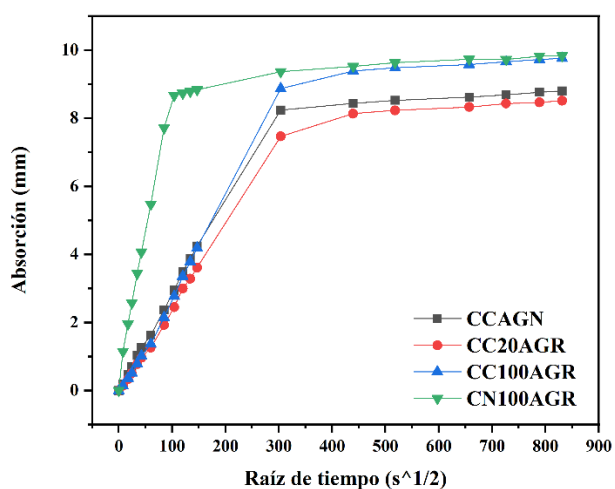


D. Falla CN100AGR

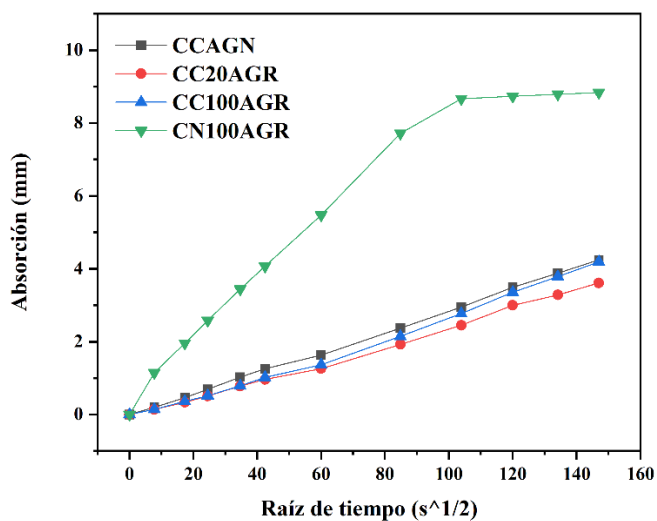
Figura 25. Falla de los cilindros de concreto a 28 días.

Absorción capilar

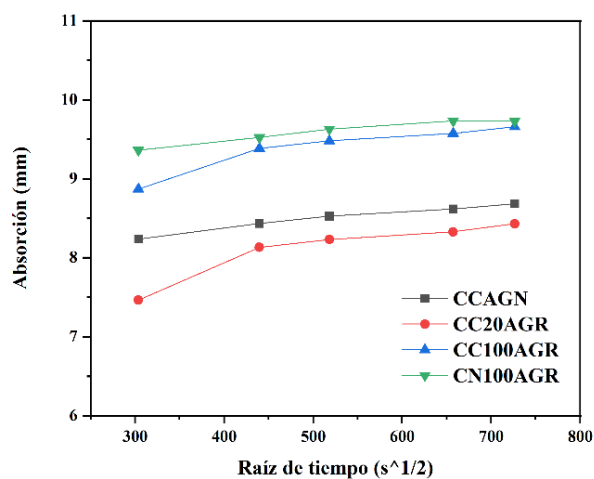
Para este ensayo se obtuvieron las curvas de absorción presentadas en la *Figura 26*. Respecto a los valores promedio de la tasa de absorción inicial y secundaria se puede evidenciar que a medida que aumenta el reemplazo de agregado grueso reciclado en el concreto, la absorción aumenta.



A. Curva de absorción completa.



B. Absorción inicial.



C. Absorción secundaria.

Figura 26. Curvas de absorción.

Los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 13*, donde se demuestra que los concretos con 100% de reemplazo de AGR, tienen mayor absorción inicial lo que da como resultado una relación directa entre estas dos variables.

Tabla 13. Resultados de absorción para cada tipo de mezcla.

	Tasa de absorción (mm/s ^{1/2})	
	Inicial	Secundaria
CCAGN	0,0273	0,0010
CC20AGR	0,0240	0,0020
CC100AGR	0,0287	0,0017
CN100AGR	0,0730	0,0009

Cloruros

• Prueba rápida

Los resultados de la penetración de los iones cloruros son similares para la mezcla de referencia y la del 20 % de agregado grueso reciclado, (ver *Figura 27*), los cuales se encuentran en un rango muy bajo para ingreso de cloruros a los 28 días de curado. Cuando se sustituye completamente el agregado natural por agregado grueso reciclado, los rangos se ubican en un nivel más alto donde los concretos son más susceptibles a la entrada de cloruros, se distingue que el concreto activado alcalinamente posee el valor más alto de permeabilidad a cloruros, sin embargo cabe notar que el aumento se debe a que el hormigón activado con álcali utiliza soluciones alcalinas altamente conductivas (ya que son ricas en OH⁻), el remanente del activador alcalino sin reaccionar puede dar una "falsa alarma", lo que lleva a la conclusión de que el hormigón activado con álcali es altamente permeable a los cloruros sin ser del todo absolutamente cierto (Miguel, de Brito, & Silva, 2023).

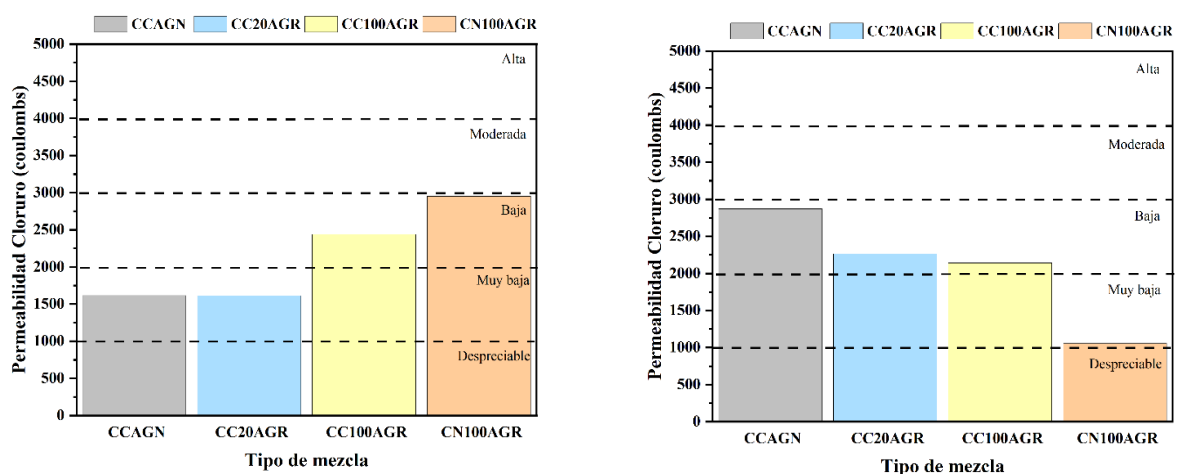


Figura 27. Permeabilidad del ion cloruro 28 y 90 días respectivamente.

Un ensayo realizado a mayor tiempo de curado (90 días) indica una disminución de la permeabilidad al cloruro para los concretos que tienen 100 % de agregado grueso reciclado donde CC100AGR reduce 12.16 % y CN100AGR 64.28 %. Sin embargo, no fue el caso de las mezclas que contienen agregado natural, porque aumentaron en 77.63 % la mezcla patrón y 40.71 % la del 20 % de AGR con respecto a los resultados obtenidos a 28 días (Véase la *Figura 27*). En conclusión, las muestras en estudio se encuentran generalmente en el rango de permeabilidad baja con respecto a los valores especificados en la norma ASTM C1202. Por otra parte, no se recomienda utilizar este ensayo para probar las mezclas activadas alcalinamente; independiente de que el resultado a 90 días mostró un resultado de permeabilidad despreciable. Si sólo se considera el paso de corriente, el ensayo es esencialmente una medida de la conductividad eléctrica del hormigón, que depende no solo de las características de la estructura porosa sino también de su composición química, y como se mencionó anteriormente la presencia de los grupos OH^- modifica los resultados (Miguel, de Brito, & Silva, 2023).

- **Voltaje impreso**

Los hormigones armados CCAGN, CC20AGR, CC100AGR y CN100AGR registraron corrientes máximas de 19.01, 25.69, 28.55 y 9.55 mA en tiempos de 208 h, 107 h, 225 h y 10 h respectivamente. En la *Figura 28* se indica el tiempo en el que aparece la primera grieta. Estos resultados expresan el tiempo necesario para que los iones de cloruros penetren a la varilla y la desgasten.

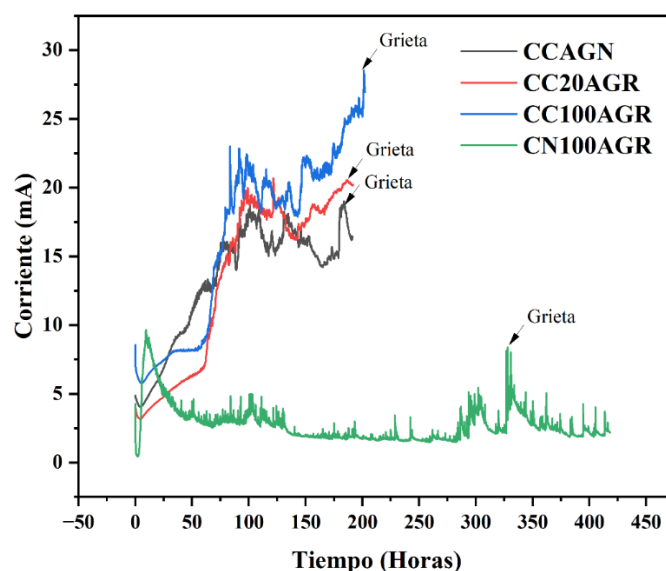


Figura 28. Curva de intensidad de corriente vs tiempo.

En otras palabras, este retraso es el tiempo que tarda el flujo de iones de cloruro en pasar del estado transitorio al estado estacionario; por lo tanto, con el uso del agregado reciclado, los cloruros tardan menos en saturarse y atravesar el espesor de recubrimiento del concreto (Amorim Júnior, O.Silva, R. Díaz, & Ribeiro, 2019). Debido a esto, se evidencia en la *Figura 28* que las corrientes máximas se registran para los concretos con AGR y OPC ya que, depende de la estructura de la red de poros en la matriz cementosa. También se evidencia que el concreto activado alcalinamente obtiene su corriente máxima al inicio, esto se atribuye a las altas concentraciones iónicas de Na^+ y OH^- presentes en la solución de poro de los concretos de activación alcalina, sin embargo, la aparición de la primera grieta tarda más tiempo en revelarse (Valencia Saavedra, Aguirre Guerrero, & Mejía de Gutiérrez, 2022). En la *Figura 29* se muestra las probetas y en la *Figura 30* los aceros, una vez finalizado el ensayo. Se

observa en la Figura 29 la menor afectación del material CN100AGR, mientras en las mezclas restantes es evidente la presencia de la grieta.



A. CCAGN



B. CC20AGR



C. CC100AGR



D. CN100AGR

Figura 29. Fallas en el hormigón debido al ingreso de iones de cloruro.



CCAGN 1



CC20AGR 1



CC100AGR 1



CN100AGR 1

A. Primeras probetas



CCAGN 2



CC20AGR 2



CC100AGR 2



CN100AGR 2

B. Réplicas

Figura 30. Desgaste del acero.

En la *Figura 29* se observan las grietas causadas por la perturbación del ensayo las cuales exteriorizan el ingreso de iones cloruros a las probetas, generando la corrosión del acero. Los aumentos de corriente repentinos indican reducción en la resistencia eléctrica del concreto produciendo los siguientes tamaños de grietas (véase *Tabla 14*) y afectando el volumen del refuerzo del concreto (véase *Tabla 15*).

Tabla 14. *Tamaño de grieta ensayo voltaje impreso.*

Probeta	Tamaño grieta [mm]
CCAGN	0,60
CC20AGR	0,91
CC100AGR	0,96
CN100AGR	0,46

Tabla 15. *Resultados de pérdida de masa en el acero.*

Probeta	Pérdida de masa [gr]
CCAGN	1,5
CC20AGR	3,7
CC100AGR	3,4
CN100AGR	2,7

La mayor cantidad de productos de corrosión se dio en el concreto con 20 % de agregado grueso reciclado, con una pérdida de masa en el acero de 3,7 gramos, a causa de que la mezcla alcanzó una corriente mayor que las demás, en menor tiempo, también porque la grieta presente en este concreto es de un tamaño significativo, facilitando el ingreso de iones, y afectando en gran medida al acero de refuerzo. La literatura nos explica que el posterior aumento en la intensidad de la corriente está directamente relacionado con el avance de la corrosión del acero y, por tanto, con la aparición de grietas como consecuencia de los esfuerzos de

tracción en la matriz endurecida debido a la presencia de los productos de corrosión (Valencia Saavedra, Aguirre Guerrero, & Mejía de Gutiérrez, 2022).

Finalmente, en el concreto activado alcalinamente presenta un comportamiento contrario a los que contienen únicamente OPC como cementante, ya que el sistema de activación alcalina está compuesto de materiales altamente conductores que generan un aumento repentino en las corrientes, pese a ello, este ensayo nos indica la corrosión del acero una vez se agriete la probeta y en este caso tardo aproximadamente 17 días para fallar, concluyendo que tiene mayor resistencia a los cloruros, a comparación a los concretos con OPC.

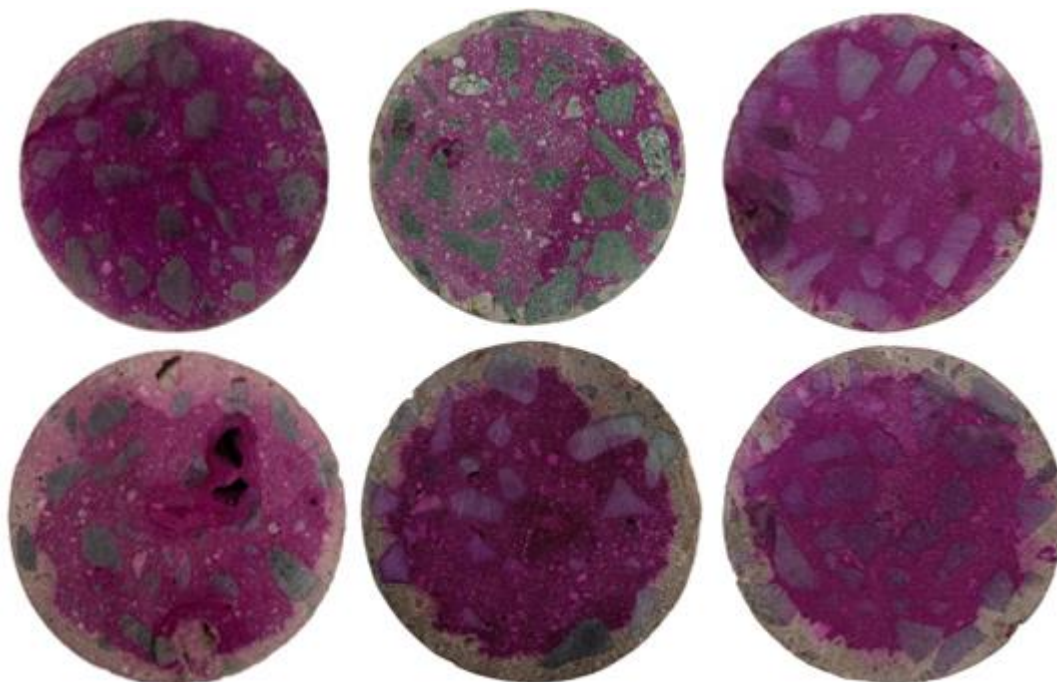
Carbonatación

- **Perfiles de carbonatación**

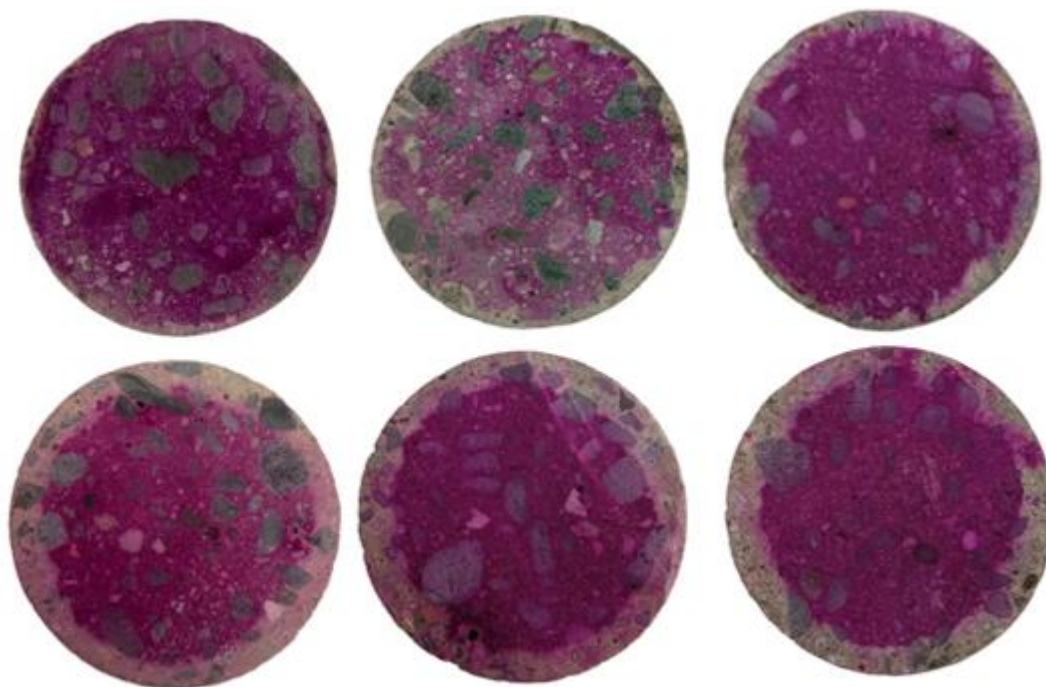
En la *Figura 31*, se presentan los resultados de 7, 14, 28, 54, 80 y 90 días de carbonatación para cada mezcla. Las muestras fueron curadas por un periodo de 28 días previamente y luego expuestas a CO₂ 1%. Para las diferentes mezclas, se tomaron medidas en diferentes direcciones en la zona carbonatada para obtener un promedio de la profundidad de carbonatación



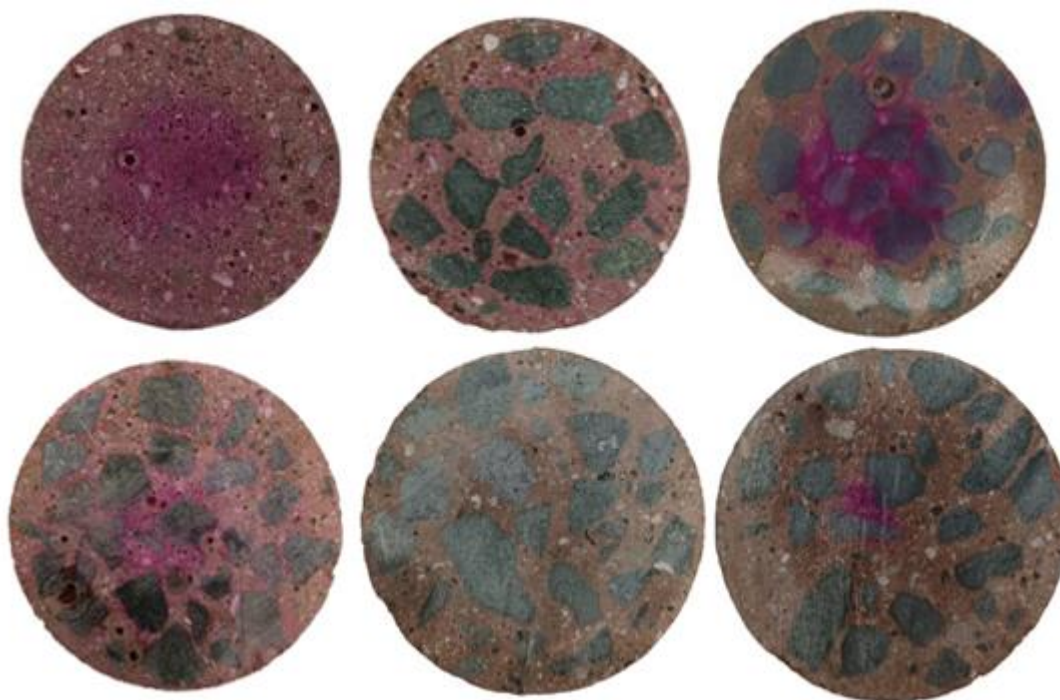
A. Carbonatación CCAGN 7, 14,28, 54,80,90 días.



B. Carbonatación CC20AGR 7, 14,28, 54,80,90 días.



C. Carbonatación CC100AGR 7, 14,28, 54,80,90 días.



C. Carbonatación CN100AGR 7, 14,28, 54,80,90 días.

Figura 31. Carbonatación 7, 14, 28, 54, 80 Y 90 días.

En general, se puede observar que a medida que aumenta la edad de exposición la profundidad de carbonatación aumenta y el incremento es menos notable en los especímenes que contienen OPC comparados con los correspondientes de activación alcalina.

En la *Figura 32* se muestra los resultados de profundidad de carbonatación para las cuatro mezclas a 7, 14, 28, 54, 80 y 90 días. Las mezclas que contienen OPC presentaron un aumento muy insignificante en la profundidad de carbonatación a tempranas edades, estas mezclas (CCAGN, CC20AGR y CC100AGR) evidencian un coeficiente de carbonatación que permanece casi constante (Miguel, de Brito, & Silva, 2023), como evidenciamos en la *Figura 32*, en el caso de la mezcla CN100AGR se observan valores de profundidad de carbonatación altos, sin embargo, es de aclarar que el revelado no es satisfactorio, por lo que se recomienda emplear otras técnicas en futuros estudios. El cálculo del coeficiente muestra, en general valores relativamente bajos.

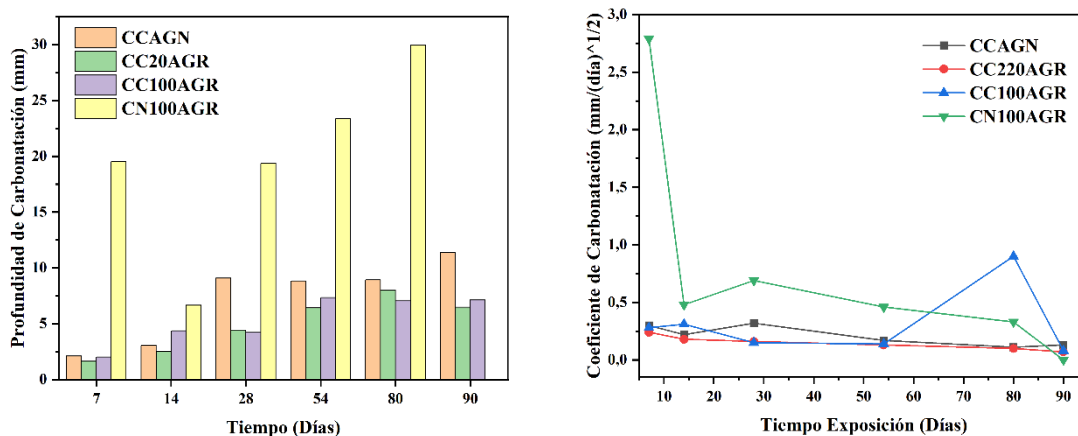


Figura 32. Profundidad de carbonatación y coeficiente de carbonatación.

Adicionalmente, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en cada mezcla luego de que los especímenes estuvieran expuestos a la carbonatación; los resultados obtenidos se incluyen en la *Tabla 16*.

Tabla 16. Resistencia a la compresión antes y después de cámara.

	Tipo de mezcla	Edades de ensayo antes y después de carbonatación			
		Antes de cámara	7 días en cámara	28 días en cámara	90 días en cámara
Resistencia a la compresión (MPa)	CCAGN	48,57	52,56	48,72	54,07
	CC20AGR	54,51	48,98	54,83	65,95
	CC100AGR	47,48	47,94	47,78	61,91
	CN100AGR	40,22	35,07	38,96	49,67

Considerando que la reacción de carbonatación avanza desde la superficie hacia el interior, se evidencia que en general hay un incremento resistente para todas las mezclas, probablemente atribuido a un taponamiento de poros por los productos de la reacción y la posible densificación.

5. CONCLUSIONES

El agregado grueso reciclado proveniente de residuos de construcción y demolición es un material, que después de realizarle un procedimiento de trituración es competente para usarse como agregado grueso en concretos, puesto que cumple con las exigencias de la norma NTC 174 (Especificaciones de agregados para concreto). Postulándose en un recurso aprovechable para el ámbito de la construcción, que al implementarse en mezclas de concreto en gran medida se estaría incorporando la economía circular en este campo, no solo al evitar elevada generación de residuos, sino también a evitar la extracción de grava que genera grandes impactos negativos en el medio ambiente, además del excesivo consumo de recursos no renovables.

La resistencia a la compresión de los concretos estudiados reportó valores entre 28 y 35 MPa a 28 días de curado, cumpliendo las especificaciones resistentes sugeridas por la normativa la ACI 211 para las estructuras sometidas ambientes agresivos.

De los resultados obtenidos de capilaridad, se concluye que el agregado grueso reciclado al momento de ser reemplazado en la muestra de concreto modifica la matriz debilitando la microestructura del concreto, lográndose así una mayor porosidad y absorción por parte de este, lo que le da una menor durabilidad. Pese a ello, los concretos en ensayos de durabilidad se comportan con un buen rendimiento, como se evidencia en el ensayo de carbonatación entre CCAGN Y CC100AGR, donde se demuestra que este último es más resistente a la carbonatación, también con el ambiente de cloruros.

En el ámbito de ensayos físicos, el concreto con material precursor de ladrillo y 15 % de OPC y 100 % AGR (concreto activado alcalinamente) aparentemente presenta una estructura más débil para el ensayo de carbonatación, aunque no es el caso de la resistencia a los cloruros, pese a que en el ensayo de Voltaje Impreso se registran valores altos, la

resistencia a la corrosión del acero en este ensayo nos muestra la alta resistencia de este concreto a los cloruros. Se corroboró que el ensayo ASTM C1202 (prueba rápida iones de cloruro) no es apto para determinar con exactitud sus propiedades, porque él determina el paso de corriente eléctrica y la presencia de Na^+ y OH^- nos pueden mostrar valores de corrientes elevados. Por otra parte, el ensayo de voltaje impreso, aunque se comporta diferente a los concretos con OPC, tienen la aparición de la grieta en mayor tiempo que los demás, lo que demuestra que este concreto es eficaz para estructuras cercanas a los mares y con alta concentración de sales en los suelos. Debido a esta contradicción de durabilidad en estos dos ensayos, se recomienda hacer estudios más detallados para determinar con exactitud qué problema se puede estar presentando en esta mezcla que tiene mayor velocidad de carbonatación o en particular identificar métodos apropiados para este tipo de materiales, ya que por ejemplo el ensayo de revelado empleando fenolftaleína no es el adecuado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Amiri, M., Hatami, F., & Golafshani, E. M. (2021). Evaluating the synergic effect of waste rubber powder and recycled concrete aggregate on mechanical properties and durability of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, e00639.
- Amorim Júnior, N. S., O.Silva, G. A., R. Díaz, C. M., & Ribeiro, D. V. (2019). Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test. *Construction and Building Materials*, 108-118.
- Aquino Castro, Y. J. (2019). Tesis: Estudio comparativo de la Influencia del plástico (PET) en la resistencia a la compresión y durabilidad del concreto reciclado y concreto convencional. *Universidad Nacional de Trujillo*.
- Aycardi Barrero, G., Aycardi Fonseca, L. E., Palomino Infante, A., Quiroga Saavedra, P., Rodríguez Pinilla, J. E., Segura Franco, J. I., . . . Escuela Colombiana de Ingeniería, P. d. (2012). *Guía Paz del Río para la supervisión, construcción y diseño de estructuras de concreto reforzado: Reglamento NSR-10*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Bendito Skariah, T., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., . . . Hamada, H. M. (2022). Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. *Cleaner Materials*, 100056.
- Carneiro, A. P., Cassa, J. C., de Brum, I. A., Vieira, A. M., Costa, A. D., Sampaio, T. S., & Alberte, E. P. (2000). Construction waste characterisation for production of recycled aggregate-Salvador/Brazil. *Waste Management Series*, 825-835.
- Concreto, R. 3. (2022). *Caracterización de impactos ambientales en la industria de la construcción*. Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/impactos-ambientales-en-la-industria-de-la-construccion/>
- Duffó, G. S., & Farina, S. B. (18 de Diciembre de 2023). *Repositorio Institucional CONICET Digital*. Obtenido de Repositorio Institucional CONICET Digital: <https://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2019/12/3-cei69-4-4.pdf>
- Elkhaldi, I., Roziere, E., Turcryc, P., & Lukili, A. (2022). Towards global indicator of durability performance and carbon footprint of clinker-slag-limestone cement-based concrete exposed to carbonation. *Journal of Cleaner Production*.
- Fiol, F., Revilla Cuesta, V., Thomas, C., & Manso, J. M. (2023). Self-compacting concrete containing coarse recycled precast-concrete aggregate and its durability in marine-environment-related tests. *Construction and Building Materials*, 131084.
- Ganesh, A. C., Kumar, P. S., Kapilan, S., Kumarb, A., Basha, S. N., & Tejaeswar, V. (2023). Effect of alkaline activator solution over GGBS based concrete under ambient curing. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier.

- Han, S.-H., Park, W.-S., & Yang, E.-I. (2013). Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbor concrete structures. *Construction and Building Materials*, 1045-1049.
- Kazmi, S. M., Munir, M. J., Wu, Y. F., Patnaikuni, I., Zhou, Y., & Xing, F. (2020). Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation. *Construction and Building Materials*, 120284.
- Miguel, F., de Brito, J., & Silva, R. V. (2023). Durability-related performance of recycled aggregate concrete containing alkali-activated municipal solid waste incinerator bottom ash. *Construction and Building Materials*, 132415.
- Muñoz Salinas, F., & Mendoza Escobedo, C. J. (2012). La durabilidad en las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 63-86.
- NTC 121, N. T. (1982). *Ingeniería civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC.
- NTC 3459, N. T. (2001). *Concretos. Agua para la elaboración de concreto*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC.
- NTC 5551, N. T. (2007). *Durabilidad de estructuras de concreto*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC.
- Robayo Salazar, R. A., Valencia, G. G., & Mejía de Gutierrez, R. (2022). Reuse of Powders and Recycled Aggregates from Mixed Construction and Demolition Waste in Alkali-Activated Materials and Precast Concrete Units. *Sustainability*, 8.
- Silva, O. J. (2022). *Generalidades tipos de aditivos para el concreto: según NTC 1299*. Retrieved from <https://360enconcreto.com/blog/detalle/generalidades-tipos-de-aditivos-para-el-concreto/>
- Silva, Omar Javier. (2022). *Durabilidad del concreto: definiendo la frase*. Retrieved from <https://360enconcreto.com/blog/detalle/durabilidad-del-concreto-definiendo-la-frase/>
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 78-90.
- Thomas, J., Nazeer, T. N., & Wilson, P. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 349-365.
- Valencia Saavedra, W., Aguirre Guerrero, A. M., & Mejía de Gutiérrez, R. (2022). Assessment of the Corrosion of Steel Embedded in an Alkali-Activated Hybrid Concrete Exposed to Chlorides. *Molecules*, 5296.