

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

---

---

**TEMA:**

EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE AGREGADOS Y CONCRETOS ELABORADOS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN DIFERENTES CICLOS.

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA

**JONATHAN MISAEL QUEZADA CAB**

DIRECTOR

**DR. JOSÉ ANTONIO DOMÍNGUEZ LEPE**



Chetumal, Quintana Roo, **28/abril/2023**

OFICIO: W-122/2023  
ASUNTO: Autorización de impresión.

**C. JONATHAN MISAEL QUEZADA CAB**

Habiendo cumplido con los requisitos para obtención del grado de MAESTRO EN CONSTRUCCIÓN, establecidos en los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado del Tecnológico Nacional de México y que competen a la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunico que:

SE LE CONCEDE LA AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE LA TESIS

**"EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE AGREGADOS Y CONCRETOS ELABORADOS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN DIFERENTES CICLOS."**

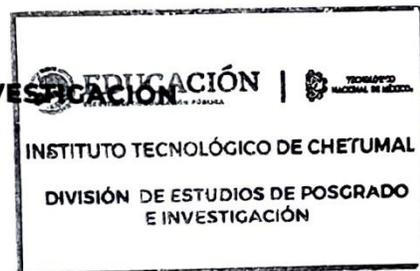
Sin otro particular quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica ®  
Cultura, Ciencia y Tecnología para la Superación de México ®*

  
**DRA. ALICIA CARRILLO BASTOS**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.c..p. Minutario.  
ACB\*Gaby



## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y AUTENTICIDAD

Por medio de la presente, **JONATHAN MISAEL QUEZADA CAB**, declaro que el trabajo de investigación titulado “**EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE AGREGADOS Y CONCRETOS ELABORADOS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN DIFERENTES CICLOS**” y dirigido por **JOSÉ ANTONIO DOMÍNGUEZ LEPE** como tema de tesis para la obtención del Título de **MAESTRO EN CONSTRUCCIÓN**, es original. El presente trabajo de investigación es el resultado de mi trabajo personal, el cual no ha sido copiado de investigaciones previas publicadas en medios digitales y/o impresos. Las ideas, definiciones y/o ilustraciones tomadas de trabajos previos han sido citadas de la manera correcta para dar crédito a los autores originales. Declaro que el presente trabajo de investigación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título, y tampoco ha sido publicado en sitio alguno. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y cometer plagio es objeto de sanciones legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el presente documento, así como de los derechos sobre la obra presentada. Asimismo, me hago responsable ante el Instituto Tecnológico de Chetumal o terceros de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar por el incumplimiento de lo declarado. De identificarse falsificación, plagio, fraude, o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, responsabilizándome por todas las cargas pecuniarias o legales que se deriven de ello y sometiéndome a las normas vigentes del Instituto Tecnológico de Chetumal y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

ATENTAMENTE



JONATHAN MISAEL QUEZADA CAB

Chetumal, Quintana Roo, a 27 de marzo del 2023.



## DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en este documento titulado “EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE AGREGADOS Y CONCRETOS ELABORADOS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN DIFERENTES CICLOS” proviene de las actividades de investigación durante el periodo que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis dentro del programa de MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN en el Instituto Tecnológico de Chetumal del Tecnológico Nacional de México y que dicha información le pertenece en términos de la Ley de Propiedad Industrial, por lo que no me reservo ningún derecho sobre ello.

ATENTAMENTE



---

JONATHAN MISAEL QUEZADA CAB

Chetumal, Quintana Roo, a 27 de marzo del 2023.



## AGRADECIMIENTOS

**A mis padres:** Por todo el apoyo y la motivación brindada durante este proceso y por haber sido el mejor ejemplo que un hijo podría tener, enseñándome así a visualizar y cumplir siempre mis metas y objetivos.

**A mi hermano:** Por ser un gran compañero de vida y estar en los momentos buenos y también en los malos.

**A mi novia:** Por creer en mí y por apoyarme incondicionalmente en todas las cosas que hago, demostrándome que es posible vencer cualquier obstáculo que se presente en la vida.

**A mi director:** Por toda la ayuda proporcionada y por estar siempre atento con cada una de las dudas o preguntas que tenía referentes a esta investigación, ya que de lo contrario no habría sido posible su desarrollo.

**A mis profesores:** Por todo el conocimiento impartido y por los buenos momentos que pasamos durante mi estancia en el Instituto Tecnológico de Chetumal.

**A mis amigos:** Que me brindaron sus consejos, experiencias y me ayudaron cada que lo necesité.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS .....	2
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Planteamiento del problema .....	10
1.3 Revisión de la literatura.....	11
1.4 Justificación.....	17
1.5 Pregunta de investigación.....	19
1.6 Hipótesis.....	19
1.7 Objetivos .....	20
1.7.1. Objetivo general .....	20
1.7.2. Objetivos particulares.....	20
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	17
2.1 Metodología .....	22
2.1.1 Diagrama metodológico .....	22
2.1.2 Procedimiento y descripción de las actividades realizadas .....	23
CAPÍTULO 3. INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL .....	20
3.1 Comportamiento mecánico de tres generaciones de concreto elaborado con 100% de agregado grueso reciclado. ....	26
3.1.1 Metodología aplicada .....	26
3.1.2 Consideraciones .....	28
3.1.3 Composición de la mezcla.....	29
3.1.4.1 Propiedades de los agregados.....	30
3.1.4.2 Propiedades de los concretos.....	32
3.1.4.2.1 Propiedades del concreto en estado fresco .....	32

3.1.4.2.2 Propiedades del concreto en estado endurecido .....	33
3.2 Propiedades físico-mecánicas del concreto multi-reciclado proveniente de la industria de concreto prefabricado.....	37
3.2.1 Metodología aplicada .....	38
3.2.2 Consideraciones .....	39
3.2.3 Composición de la mezcla.....	40
3.2.4 Resultados y discusión .....	41
3.2.4.1 Propiedades de los agregados.....	41
3.2.4.2 Propiedades de los concretos.....	41
3.2.4.2.1 Propiedades del concreto en estado fresco .....	41
3.2.4.2.2 Propiedades del concreto en estado endurecido .....	42
3.3 El efecto del reciclaje múltiple en el desempeño mecánico del concreto elaborado con agregado grueso reciclado. ....	45
3.3.1 Metodología aplicada .....	45
3.3.2 Consideraciones .....	46
3.3.3 Composición de la mezcla.....	47
3.3.4 Resultados y discusión .....	49
3.3.4.1 Propiedades de los agregados.....	49
3.3.4.2 Propiedades de los concretos.....	51
3.3.4.2.1 Propiedades del concreto en estado fresco .....	51
3.3.4.2.2 Propiedades del concreto en estado endurecido .....	51
3.4 Evaluación de la durabilidad de tres generaciones de concreto elaborado con 100% de agregado grueso reciclado repetidamente.....	55
3.4.1 Metodología aplicada .....	55
3.4.2 Consideraciones .....	57

3.4.3 Composición de la mezcla.....	58
3.4.4 Resultados y discusión .....	59
3.4.4.1 Propiedades de los agregados.....	59
3.4.4.2 Propiedades de los concretos.....	62
3.4.4.2.1 Propiedades mecánicas.....	62
3.4.4.2.2 Propiedades de durabilidad .....	63
3.5 Macro y micro propiedades del concreto elaborado con agregados multi-reciclados.....	68
3.5.1 Metodología aplicada .....	68
3.5.2 Consideraciones .....	70
3.5.3 Proporciones de la mezcla.....	70
3.5.4 Resultados y discusión .....	72
3.5.4.1 Propiedades de los concretos.....	72
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>67</b>
4.1 Resultados .....	75
4.1.1 Generalidades.....	76
4.1.2 Agregados.....	81
4.1.2.1 Densidad aparente .....	81
4.1.2.2 Absorción de agua.....	82
4.1.3 Concretos en estado fresco .....	83
4.1.3.1 Asentamiento.....	83
4.1.3.2 Contenido de aire .....	85
4.1.4 Concretos en estado endurecido .....	86
4.1.4.1 Absorción de agua.....	86
4.1.4.2 Resistencia a la compresión .....	87
4.1.4.3 Resistencia a la tracción .....	91

4.1.4.4 Módulo de elasticidad .....	92
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>100</b>
5.1 Conclusiones .....	96
5.2 Recomendaciones.....	98
5.3 Referencias.....	99

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de los términos utilizados en la investigación 1.....	27
Tabla 2. Composición de la mezcla.....	30
Tabla 3. Propiedades de los agregados.....	30
Tabla 4. Propiedades de los concretos en estado fresco.....	33
Tabla 5. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.....	35
Tabla 6. Lista de los términos utilizados en la investigación 2.....	38
Tabla 7. Proporciones de la mezcla.....	40
Tabla 8. Propiedades del agregado grueso.....	41
Tabla 9. Propiedades del concreto en estado fresco.....	42
Tabla 10. Densidad y absorción del concreto en estado endurecido.....	43
Tabla 11. Resistencia a la compresión promedio.....	43
Tabla 12. Lista de los términos utilizados en la investigación 3.....	47
Tabla 13. Composición de la mezcla.....	48
Tabla 14. Propiedades del agregado grueso.....	50
Tabla 15. Densidad y asentamiento de las mezclas de concreto.....	51
Tabla 16. Resistencia a la compresión de los concretos.....	52
Tabla 17. Resistencia a la tracción de los concretos.....	52
Tabla 18. Desgaste por abrasión de los concretos.....	53
Tabla 19. Módulo de elasticidad de los concretos.....	54
Tabla 20. Lista de los términos utilizados en la investigación 4.....	56
Tabla 21. Proporciones de la mezcla del concreto natural y los concretos reciclados.....	59
Tabla 22. Propiedades físicas del agregado grueso.....	60
Tabla 23. Flujo eléctrico y coeficientes de permeabilidad al ion cloruro del CAN y los CAR a los 28 días.....	66
Tabla 24. Lista de los términos utilizados en la investigación 5.....	70
Tabla 25. Proporciones de la mezcla.....	71
Tabla 26. Propiedades físicas y mecánicas del concreto de origen y los CAR.....	73
Tabla 27. Glosario de términos utilizados en el Capítulo 4.....	76
Tabla 28. Densidad aparente de los agregados.....	81
Tabla 29. Absorción de agua de los agregados.....	82

Tabla 30. Asentamiento para los concretos.....	84
Tabla 31. Contenido de aire en los concretos.....	85
Tabla 32. Absorción de agua de los concretos. ....	86
Tabla 33. Resistencia a la compresión a la edad de 28 días. ....	87
Tabla 34. Resistencia a la compresión a la edad de 28 días con una sustitución del 25% de AGR.....	90
Tabla 35. Resistencia a la tracción. ....	91
Tabla 36. Módulo de elasticidad. ....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 .Jerarquía de disposición de materiales de residuos de construcción y demolición.....	6
Figura 2. Modelo conceptual del Sistema para la prevención y gestión de los RCD.....	8
Figura 3. Diagrama de la clasificación de los agregados reciclados. ....	12
Figura 4. Diagrama metodológico.....	22
Figura 5. Metodología del proceso de reciclaje utilizado en la investigación 1.....	28
Figura 6. Proceso de trituración de los cilindros de concreto reciclado.....	29
Figura 7. Vista microscópica de los diferentes tipos de agregados estudiados antes y después de cada ciclo de reciclaje (AGN-a, AGR1-b, AGR2-c y AGR3-d). ....	31
Figura 8. Resistencia a la compresión de varias mezclas de concreto. ....	33
Figura 9. Resistencia a la tracción.....	36
Figura 10. Esquema metodológico del proceso de reciclaje de la investigación 2. ....	39
Figura 11. Módulo de elasticidad estático y dinámico de diferentes concretos. ....	44
Figura 12. Metodología de los ciclos de reciclaje implementados en la investigación 3 para dos porcentajes diferentes de sustitución.....	46
Figura 13.Morfología de los agregados. a-AGN, b-AGCR1, c-AGCR2 y d-AGCR3.....	49
Figura 14. Diagrama metodológico de tres generaciones de concreto elaborado con agregado grueso reciclado empleado en la investigación 4.....	57
Figura 15. Imágenes ópticas (1) e imágenes de la microscopía electrónica de barrido (2). a-AGN, b-AGR1, c-AGR2 y d-AGR3. ....	61
Figura 16. Resistencia a la compresión de los concretos. ....	62
Figura 17. Resistencia a la tracción por hendimiento. ....	63
Figura 18. Módulo de elasticidad dinámica relativa (a) y tasa de pérdida de masa (b) del CAN y los CAR después de ciclos de congelación-descongelación. ....	64
Figura 19. Imágenes de la MEB del CAR1 y CAR2 después de diferentes números de ciclos de congelación-descongelación: (a) 100 ciclos; (b) 400 ciclos y (c) 800 ciclos. ....	65
Figura 20. Profundidades de carbonatación del CAN y los CAR con diferentes tiempos de carbonatación. ....	66
Figura 21. Diagrama metodológico de la investigación 5.....	69
Figura 22. Esquema de un ciclo completo de reciclaje de los RCD.....	77
Figura 23. Datos generales de las investigaciones que conforman la sección documental.....	79

## **RESUMEN**

Los residuos de construcción y demolición (RCD) se empezaron a reciclar después de la segunda guerra mundial, pero con el paso de los años esta actividad ha incrementado y evolucionado notablemente en diferentes partes del mundo. Actualmente en los países desarrollados es común el reciclaje de los RCD, surgiendo nuevos materiales a raíz de este procedimiento, entre los que destacan los agregados y los concretos, no obstante, la información acerca de sus propiedades y de su potencial vida útil todavía presenta muchas incógnitas en el hemisferio occidental, por lo que es de suma importancia ampliar y darle mayor exposición a la información que se tiene acerca de esta temática. Esta investigación tiene como objetivo evaluar las alteraciones que experimentan las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos elaborados con residuos de construcción y demolición en diferentes ciclos de reciclaje, mediante una consulta exhaustiva del estado del arte. La metodología que se utilizó para el desarrollo de este estudio incluyó inicialmente una amplia revisión de la literatura a nivel general sobre los RCD y posteriormente un análisis detallado de cinco investigaciones en las que se trabajó exclusivamente con el multireciclaje de agregados y concretos elaborados con estos residuos, con la finalidad de comparar los valores que se obtuvieron para cada una de las propiedades estudiadas. En los resultados se presentaron índices y porcentajes máximos de degradación, que determinaron en que magnitud se deterioró cada propiedad según el ciclo de reciclaje realizado, así como también la explicación científica de porque ocurren estas degradaciones. Se pudo concluir que casi todas las propiedades presentaron degradaciones constantes con cada nuevo proceso de reciclaje, salvo por un par de excepciones, sin embargo, en algunos casos se pudieron observar tendencias que indicaban la estabilización de la propiedad conforme transcurrían los ciclos de reciclaje.

## **ABSTRACT**

Construction and demolition waste (CDW) began to be recycled after the Second World War, but over the years this activity has increased and evolved remarkably in different parts of the world. Currently in developed countries the recycling of CDW is common, emerging new materials as a result of this procedure, among which aggregates and concrete stand out, however, the information about their properties and their potential useful life still presents many unknowns in the Western Hemisphere, so it is extremely important to expand and give greater exposure to the information that is available on this subject. This research aims to evaluate the alterations experienced by the physical and mechanical properties of aggregates and concrete made with construction and demolition waste in different recycling cycles, through an exhaustive consultation of the state of the art. The methodology used for the development of this study initially included an extensive review of the literature at a general level on CDW and later a detailed analysis of five investigations in which work was done exclusively with the multi-recycling of aggregates and concrete made with these residues. , in order to compare the values obtained for each of the properties studied. In the results, maximum degradation indices and percentages were presented, which determined the magnitude of each property deteriorated according to the recycling cycle carried out, as well as the scientific explanation of why these degradations occur. It was possible to conclude that almost all the properties presented constant degradation with each new recycling process, except for a couple of exceptions|, however, in some cases trends could be observed that indicated the stabilization of the property as the recycling cycles passed.

## INTRODUCCIÓN

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son materiales de desecho, generados en las actividades referentes al sector de la construcción, estos residuos son considerados en su mayoría como materiales no peligrosos, debido a que no presentan grandes reacciones físicas o químicas, sin embargo, es importante el impacto que pueden llegar a generar en el medio ambiente y en la sociedad, ya que contaminan severamente el medio natural y una mala gestión de estos residuos puede derivar en posibles focos de infección cercanos a las zonas urbanas. Los RCD son el residuo sólido más contaminante del mundo debido al gran volumen que se produce anualmente, afortunadamente estos residuos poseen una alta susceptibilidad para ser aprovechados en actividades como el reciclaje, surgiendo una gran cantidad de nuevos materiales, como los agregados, concretos, morteros, pavimentos, bloques, ladrillos, adocretos, celosías, entre otros, pero los más destacados son el agregado grueso reciclado (AR) y el concreto elaborado con agregados reciclados (CAR) debido a los usos potenciales que se les puede dar. En la actualidad existen diversos estudios e investigaciones referentes a la gestión exitosa y al reciclaje de los residuos de construcción y demolición, aunque sin duda es un tema extenso del que todavía faltan conocer muchas cosas y un ejemplo de ello son las propiedades de los materiales producidos con RCD, principalmente por la cantidad de variables que existen para la conformación de los residuos o de los materiales producidos con estos residuos. Algunas de estas variables pueden ser; la zona geográfica donde se produce el residuo, el tipo de edificio de proveniencia, los años de vida del residuo o al porcentaje de sustitución del RCD para elaborar un material nuevo, pero existen muchas otras variables, lo que vuelve a esta temática muy compleja y vasta. De acuerdo a lo anterior, con esta investigación se pretende continuar expandiendo la información acerca de los materiales elaborados con RCD y es por ello que se evaluará un tema muy importante y específico como lo es la degradación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados y el concreto elaborado con AR, por lo que se incorporarán ciclos de reciclaje para evaluar la degradación y determinar qué tan prolongada es la vida útil de estos materiales, así como la viabilidad para realizar esta actividad con los materiales que se encuentran en la región de la península de Yucatán.

---

# CAPÍTULO 1

## FUNDAMENTOS

---

## **1.1 Antecedentes**

### **Generalidades**

Debido a la alta demanda de vivienda, servicios y espacios recreativos, la tasa de urbanización a nivel global ha crecido considerablemente en los últimos años, alcanzando un 54.3% para el 2016 (Ángel, 2012 citado en Aslam et al., 2020) y un 55% en el 2018. Además, se proyecta que para el 2050 un 68% de la población mundial, será urbana (ONU, 2019). Este fenómeno ha ocasionado que el sector de la construcción sea una de las industrias con un mayor crecimiento, incrementando sus actividades diariamente, las cuales derivan en la generación de grandes volúmenes de residuos de diferentes tipos, denominados residuos de construcción y demolición (RCD).

Se define como RCD a todos los desechos que surgen de las actividades relacionadas con la construcción, incluidas la excavación o formación de terrenos, la construcción civil y de edificios, la limpieza del sitio, las actividades de demolición, las obras viales y la renovación de edificios (Shen et al., 2004). Los sobrantes procedentes de la fabricación de materiales destinados a la edificación o a la obra civil y los residuos de canteras, graveras y otros puntos de extracción de agregados destinados a la construcción, también se consideran como RCD (Santos et al., 2013). Tansel , Whelan y Barrera (1994) agregan a este concepto a los residuos de producidos por desastres ambientales como terremotos, huracanes, tornados e inundaciones.

Los componentes típicos de los residuos de construcción y demolición incluyen concreto, asfalto, madera, metales, yeso, cerámicos o baldosas, tejas, ladrillos y vidrios (Mercante, 2007). Según Kartam et al (2004) los desechos de C & D pueden considerarse materiales inofensivos que no causan ningún problema, sin embargo, una mala gestión o disposición final puede ocasionar diversos problemas sociales o de salud.

Los RCD son considerados como uno de los residuos más pesados y voluminosos, así como uno de los más contaminantes, representando entre un 25% a un 30% de la cantidad total de residuos sólidos producidos en el mundo (Domínguez et al., 2016). Los países desarrollados son los que suelen generar más escombros, según Akhtar & Sarmah (2018) la generación total de residuos de C & D en 40 países de todo el mundo alcanzó más de 3.000 millones de toneladas anuales

en el 2012 y esta tendencia aumenta constantemente. Dentro de los países que más RCD producen al año, China lidera la lista, ya que para el 2015 se generaron aproximadamente 2400 millones de toneladas de estos desechos (Duan et al., 2019). Estados Unidos es el país más cercano a la cifra del gigante asiático, dado que en la última estimación, realizada en el 2017, se calcula que el país norteamericano generó 569 mdt de residuos de C & D (U.S. EPA, 2019). En cuanto a otros continentes y países, Ganga et al (2020) señalan que en la Unión Europea se produjeron alrededor de 924 millones de toneladas de RCD en el 2016. En tanto que, Menegaki y Damigos (2018) mencionan que en Brasil y Australia se generaron cerca de 45 mdt y 19.5 mdt respectivamente.

En México se estima que la generación anual de residuos de C & D para el 2011 fue de 6 millones de toneladas, lo que significa una generación diaria cercana a las 17,000 toneladas. Mientras que para el año 2018 la generación estimada de RCD fue de entre 9.2 a 9.9 mdt, lo que equivale aproximadamente a 25,000 toneladas al día. De acuerdo al documento “Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generados por las actividades de construcción en México (SEMARNAT, 2009), la generación de los residuos de construcción, representan en peso, el 17.5 % de los residuos sólidos urbanos (RSU).

Como resultado de las grandes cantidades de residuos que se producen en el país, en el 2011 se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, misma que se fue modificando hasta el 2013 y que establece los criterios para clasificar a los residuos. En esta norma los residuos de construcción y demolición son considerados como residuos de manejo especial, por lo que deben de estar sujetos a un plan de manejo.

Se puede clasificar a los RCD de muchas maneras, Fatta et al (2003) los clasifica según su origen, obteniendo cuatro diferentes tipos de materiales, que son los materiales de excavación, materiales de planificación y mantenimiento vial, materiales de demolición y materiales de desechos de obra.

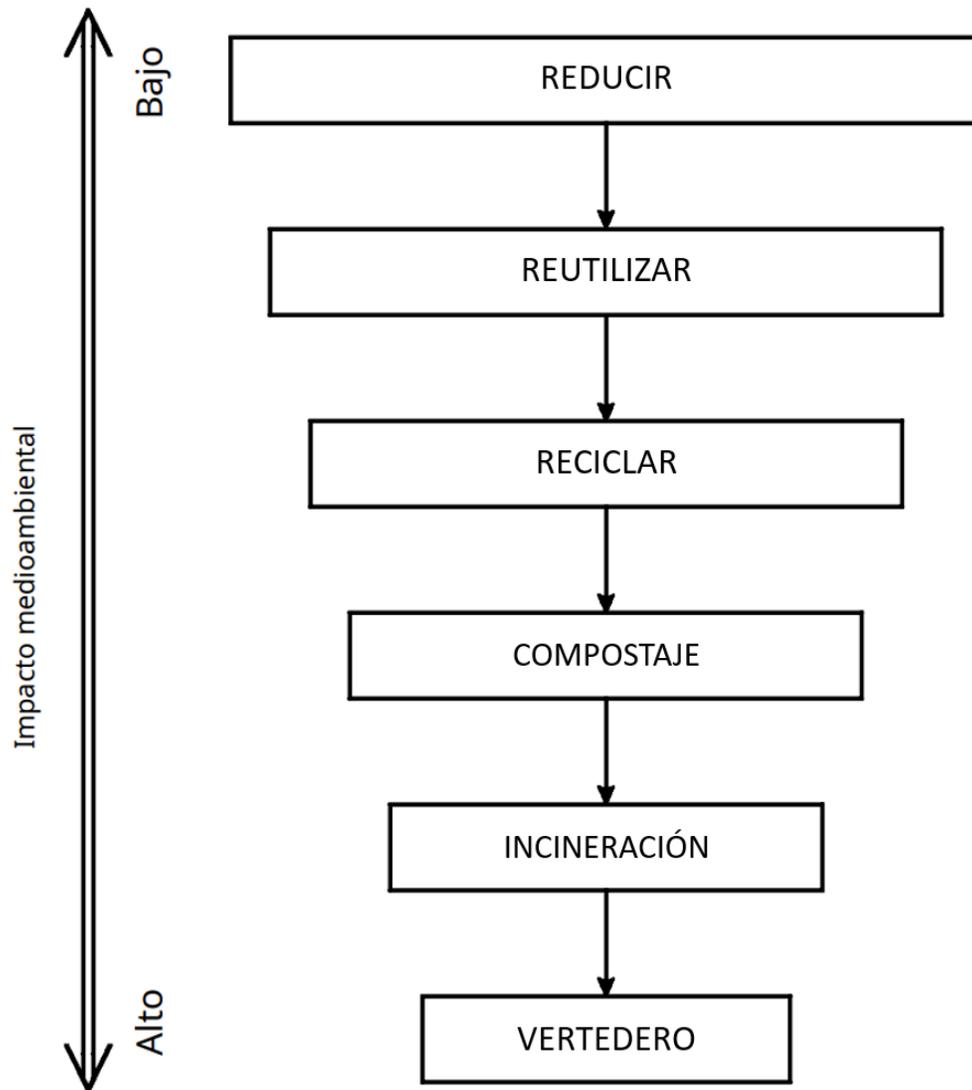
- **Materiales de excavación:** esta categoría incluye suelo excavado, arena, grava, rocas, arcilla y todos aquellos materiales que se originen a partir de las excavaciones. Surgen casi en todas las actividades de construcción y especialmente durante las construcciones

subterráneas y las obras de ingeniería geotécnica. Estos materiales también pueden surgir de fenómenos naturales como desbordes de arroyos, deslizamientos de tierra, etc. La síntesis química de estos materiales depende de sus características geológicas.

- Materiales de planificación y mantenimiento vial: Estos materiales pueden ser asfalto y todos los materiales de pavimentación tales como; arena, grava, metal y material proveniente del desmantelamiento y renovación de carreteras. También pueden generarse durante las instalaciones hidráulicas y eléctricas subterráneas en las ciudades, así como en las actividades de reparación.
- Materiales de demolición: escombros: estos materiales consisten en tierra, grava, piezas de concreto, cal, ladrillos, placas de revestimiento, yeso, arena, piedra labrada, porcelana, etc. No son homogéneos y surgen de la demolición de edificios u otras obras civiles. Su composición varía según el tipo, la edad, la forma, el uso y el tamaño del edificio, mientras que al mismo tiempo el valor histórico, cultural y económico del edificio son factores muy importantes para las características de calidad de los materiales de demolición.
- Materiales de desecho de obra: Estos materiales consisten en madera, plástico, papel, vidrio, metal, alambres, pigmentos, esmaltes, cubiertas, pegamentos y todo aquel material proveniente de la operación de las actividades de construcción, reparación, apuntalamiento, acrecentamiento, ampliación o renovación de una obra.

Existen muchas opciones para deshacerse de los RCD pero Peng, Scorpio y Kibert (1997) proponen una jerarquía para su disposición, que se basa en la minimización tanto del consumo de recursos como del daño ambiental, los dos pilares de la sostenibilidad en la construcción. Esta jerarquía se presenta en la Figura 1 a través de un esquema en donde se ordenan los impactos en orden descendente de menor a mayor. De acuerdo a estos autores la reducción es el mejor método para minimizar la generación de residuos de C & D. En segundo lugar, se encuentra la reutilización, ya que mover materiales de una aplicación a otra, es la opción más deseable después de la reducción porque se logra un mínimo de procesamiento y uso de energía. El reciclaje es la tercera mejor opción, pero una de las más importantes, debido a que el procesamiento de los residuos para elaborar nuevos materiales siempre se debe considerar como

alta prioridad, aunado a que esta actividad muchas veces trae beneficios económicos. Finalmente, en los últimos tres lugares quedan las acciones que no consideran un uso del residuo como tal, sino más bien su eliminación, estas son el compostaje, la incineración y el vertedero.



**Figura 1 .Jerarquía de disposición de materiales de residuos de construcción y demolición.**

Fuente: (Peng et al., 1997)

Los residuos de construcción y demolición poseen diversas características que les permiten ser aprovechados en actividades como el reciclaje, en virtud de que pueden servir para desarrollar distintos productos según el procesamiento que se les dé. Los primeros registros de la

reutilización de este tipo de materiales datan del siglo XIX, ya que la primera mezcla registrada de ladrillo triturado con cemento portland para la fabricación de concreto fue en Alemania en 1860 (Hansen, 1992).

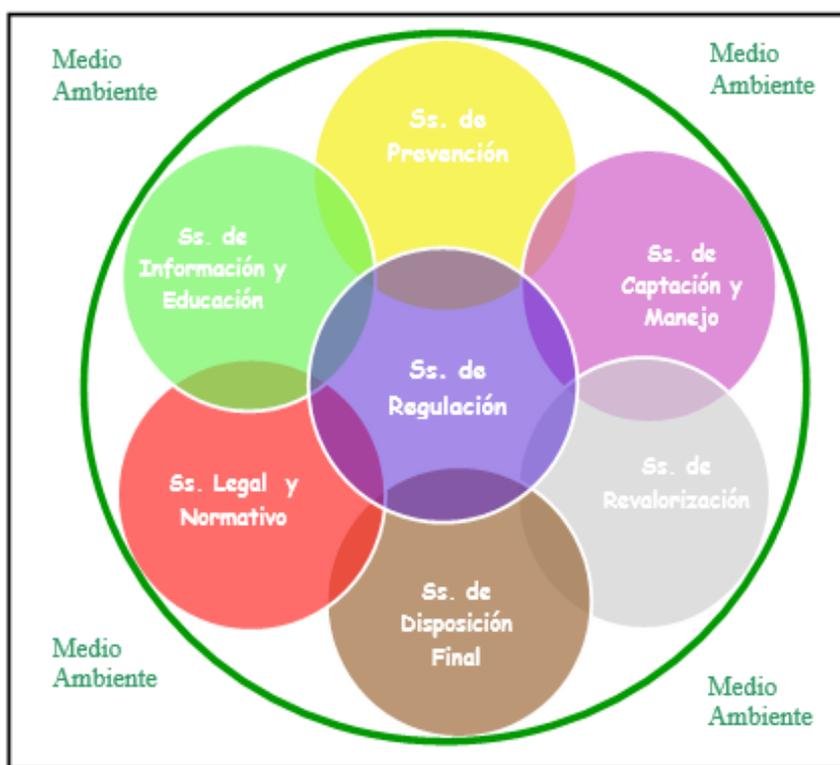
De acuerdo a Khalaf y DeVenny (2004) el reciclaje de los RCD como actividad recurrente ocurrió después de la segunda guerra mundial, igual en Alemania, debido a que empezó el periodo de reconstrucción en aquel país, por lo que era necesario satisfacer una enorme demanda de materiales pero también era necesario retirar los escombros de las ciudades más destruidas. Por tales motivos surge la iniciativa de utilizar los escombros para la fabricación de nuevos materiales, reduciendo los costos de limpieza y cumpliendo con la gran demanda de materiales.

Después de la postguerra se siguió trabajando con el reciclaje de los RCD porque se descubrió el gran potencial que tenían estos desechos para la elaboración de nuevos materiales, entre los que destacan los agregados, concretos, morteros, pavimentos, bloques, entre otros. El reciclaje de los residuos de C & D no es una labor que vaya en función con la cantidad de desechos que se producen en un determinado espacio geográfico, un ejemplo de esto son los países de Estados Unidos y China, ya que a pesar de que la cantidad de residuos generada en los EE. UU. es mucho menor que la generada en China, la tasa de reciclaje del primer país es más alta que la del país asiático (Huang et al., 2018).

Actualmente los agregados son el material más común que se produce con estos residuos, principalmente porque son la materia prima para poder fabricar otros materiales. El reciclaje de los RCD como agregados es una práctica relativamente difundida en los países desarrollados, para prevenir la contaminación ambiental y disminuir el impacto de la extracción de agregados vírgenes (Castaño et al., 2013). Esto quiere decir, que encima de aprovechar los residuos de construcción y demolición incorporándolos nuevamente en el sector de la construcción, también se genera un impacto positivo en el medio ambiente. En algunos países donde el procesamiento de los RCD es una actividad recurrente, existen sitios autorizados que comercializan productos granulares obtenidos a partir del escombros, siempre y cuando cumplan con la normatividad para su uso en construcción.

El segundo material derivado de los RCD que más se produce es el concreto, específicamente porque se puede elaborar concreto de buena calidad con el agregado grueso reciclado, siempre y cuando se utilicen las cantidades adecuadas (Í. Topçu & Şengel, 2004). Además de que el concreto prácticamente se utiliza para cualquier construcción hoy en día.

A nivel local, también se ha trabajado con los residuos de construcción y demolición. Domínguez Lepe (2006) desarrolló un Sistema Estratégico para la Prevención y Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición para el Estado de Quintana Roo, con un enfoque basado en la Teoría General de Sistemas, en donde construyó un modelo teórico compuesto por los subsistemas de: prevención (SSPV), de captación y manejo (SSCM), revalorización (SSRV), disposición final (SSDF), de información y educación (SSIE), legal y normativo (SSLN) y de Regulación (SSRG), en cual se toman en cuenta los factores sociales, económicos, políticos, culturales y tecnológicos del entorno.



**Figura 2. Modelo conceptual del Sistema para la prevención y gestión de los RCD.**

Fuente: (Domínguez Lepe, 2006)

A partir del sistema estratégico para la prevención y gestión de los RCD se han desarrollado múltiples estudios con el objetivo de ampliar la información de cada uno de los subsistemas que conforman este modelo teórico. Dentro de las investigaciones referentes a este tema podemos encontrar el trabajo de Cortés (2008) titulado “Propuesta de plan específico para la gestión de residuos de construcción y demolición en el Estado de Quintana Roo” en donde trabajó con los subsistemas de captación y revalorización de los residuos de construcción y demolición, buscando poder reincorporar los RCD al ciclo de vida de las construcciones y con ello contribuir al cuidado del medio ambiente. A su vez Borjas (2008) en su investigación denominada “Diagnóstico para determinar las características y disposición de los Residuos de Construcción y Demolición en Quintana Roo” estudió a fondo ciertos elementos de los RCD del estado, por ejemplo, sus orígenes, los volúmenes que se manejan, sus características y su disposición actual. Por otro lado Escudero (2016) en su estudio “Análisis costo-beneficio de los subsistemas de captación y revalorización de los RCD en Chetumal y su Área Metropolitana” actualizó y completó los subsistemas de captación y revalorización de los RCD en Chetumal y su área metropolitana para después realizar el análisis costo beneficio de la implementación de estos subsistemas, en donde, concluyó que serían necesarios 58.90 m<sup>3</sup> de RCD para que durante el horizonte de evaluación del proyecto se tenga una VAN positiva de 3, 780,195. Sin embargo, la TIR siguió resultando negativa, de -25.75%, lo que nos indica que no es rentable el proyecto durante el horizonte de evaluación. Siendo necesario contar con una generación de RCD de 147.25m<sup>3</sup> para que el proyecto resulte rentable con una VAN de 16, 939,489 y una TIR de 6.22%. Finalmente, De Dios (2018) en su investigación titulada “Plan de gestión de residuos de construcción y demolición en obras de edificación adaptado a los materiales y procesos constructivos de la región” desarrolló un plan de gestión compuesto por dos programas; el de generación de RCD y el programa de almacenamiento temporal y traslado, buscando crear un instrumento que ayude a los constructores, contratistas, trabajadores de la construcción y autoridades a dar cumplimiento a la normativa establecida por la ley general de equilibrio ecológico y medio ambiente del estado de Quintana Roo.

## **1.2 Planteamiento del problema**

El sector de la construcción ha crecido de manera importante en las últimas décadas debido a la alta demanda de viviendas, servicios públicos y espacios recreativos, por lo que cada día se desarrollan nuevas edificaciones u obras civiles para satisfacer las distintas necesidades de la población. Esto tiene un impacto considerable para el medio ambiente, ya que una obra tiene un ciclo de vida y durante este ciclo se realizan diferentes actividades, que van desde la construcción y restauración, hasta la demolición, de manera que en cada uno de estos procesos se generan desechos conocidos como residuos de construcción y demolición (RCD).

Estos residuos generalmente no tienen una buena gestión, por lo que son depositados en vertederos, tiraderos clandestinos o zonas marginadas, ocasionando una problemática notable que afecta a las personas y al medio natural. El estado de Quintana Roo, al ser un estado joven y en crecimiento, está experimentando un incremento significativo en las actividades relacionadas con la industria de la construcción, por lo que también se ve afectado por los RCD.

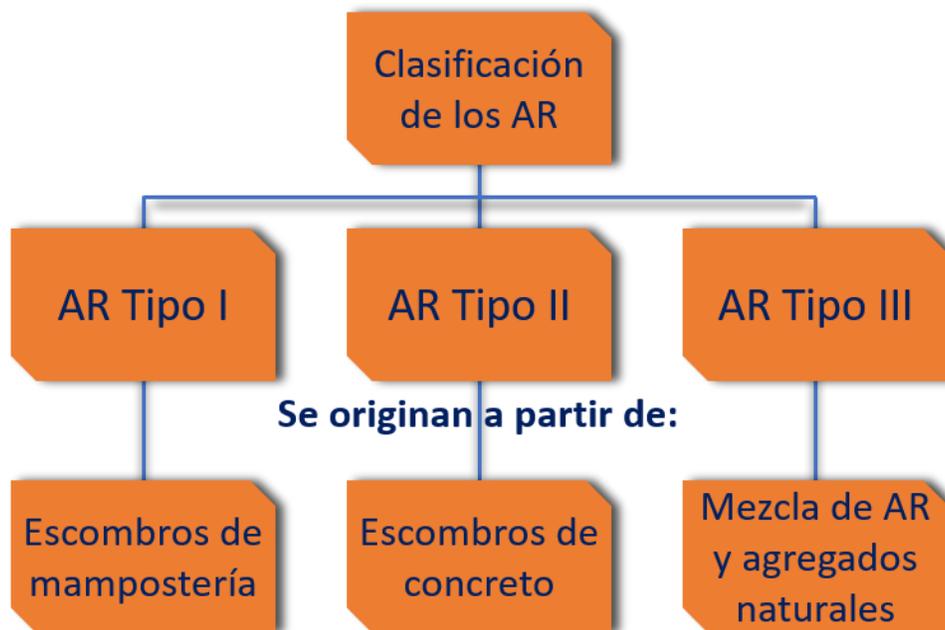
Debido al impacto que ha generado este problema en todo el mundo, actualmente es un tema muy estudiado en diversos países, donde el objetivo principal es reciclar los residuos de construcción y demolición en la mayor medida posible, surgiendo como producto de esto los agregados y concretos elaborados con RCD, sin embargo, hasta el día de hoy no se ha realizado una investigación a nivel nacional o regional que evalúe la degradación de las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos elaborados con RCD en ciclos consecutivos de reciclaje, por lo que es necesario el desarrollo de esta investigación para seguir conociendo cómo funcionan los materiales reciclados y para conocer más acerca de sus propiedades.

### **1.3 Revisión de la literatura**

Los materiales elaborados con residuos de construcción y demolición que más repercusión tienen son los agregados y los concretos. Actualmente, existen una gran cantidad de investigaciones referentes al reciclaje de los RCD, cuyo fin son la obtención de agregados reciclados o la obtención de concretos elaborados con AR. En este apartado se van a exponer algunos de los estudios y datos más relevantes acerca estos materiales, buscando entender que particularidades hay en sus propiedades y como es su funcionamiento. Es importante considerar que los agregados reciclados tienen diferentes características que varían de acuerdo a su lugar de origen, ya que en cada región se utilizan distintos materiales constructivos, que generalmente se fabrican con las materias primas que abundan en el sitio, por lo tanto, los resultados entre una y otra investigación pueden tener algunas diferencias significativas.

Uno de los primeros aportes sobre los materiales reciclados lo hizo la Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, Sistemas y Estructuras de Construcción (RILEM, por su nombre en francés) (1994), dado que, esta asociación desarrolló un documento denominado, “Guía para la demolición y reutilización de concreto y mampostería. Especificaciones para concreto con agregados reciclados”, en donde incluye información y especificaciones para el uso adecuado de los agregados reciclados, con el fin de aprovechar al máximo todo el potencial que este material puede ofrecer. Dentro de los datos más importantes que se mencionan en este documento, están la clasificación de los AR, su campo de aplicación y como considerarlos en un diseño de mezclas.

La clasificación de los AR está compuesta por tres categorías, que incluyen a los agregados reciclados de tipo I, tipo II y tipo III, tal y como se puede observar en la Figura 3. Un dato muy importante que se precisa para los agregados de tipo III (mezcla de AR y agregados naturales), es que para esta mezcla de agregados se deben considerar algunos requisitos adicionales, por ejemplo, el contenido mínimo de agregados naturales (AN) y el contenido máximo de agregados reciclados. El RILEM señala que la cantidad mínima de AN deberá ser de por lo menos un 80% del total de la mezcla y la cantidad máxima recomendada de AR deberá ser de un 10% para los agregados tipo I y un 20% para los agregados tipo II.



**Figura 3. Diagrama de la clasificación de los agregados reciclados.**

Fuente: Elaboración propia con información obtenida de la “Guía para la demolición y reutilización de concreto y mampostería. Especificaciones para concreto con agregados reciclados” del RILEM, 1994.

En cuanto al campo de aplicación de los AR, se menciona que estos agregados se pueden emplear en concreto simple y también en concreto reforzado, sin embargo, se debe poner atención a los aspectos de durabilidad del concreto reforzado, ya que la velocidad de carbonatación y de ingreso de cloruro puede ser mayor que en los concretos convencionales. Para la elaboración de concretos elaborados con agregados reciclados, se aplican los mismos principios de diseño y reglas de aplicación que para el concreto convencional, aunque se recomienda tomar en cuenta la posible influencia de la densidad de los agregados en las características de resistencia y deformación del concreto.

Mas adelante, En Turquía, Topçu y Günçan (1995), realizaron una investigación titulada “Utilización de residuos de concreto como agregado” en la cual recolectaron escombros de edificios viejos y los procesaron para obtener agregados reciclados, que posteriormente usaron para elaborar concretos. Para la preparación de los concretos se utilizaron diferentes porcentajes de sustitución, que fueron del 30, 50, 70 y 100%, mientras que la relación agua-cemento fue de 0.6 y se mantuvo constante, independientemente del porcentaje de sustitución. Se evaluaron las

propiedades mecánicas del concreto a los 28 días. Dentro de los resultados obtenidos se pudo demostrar que la densidad del concreto elaborado con AR era menor a la del concreto tradicional, también se confirmó que los agregados reciclados presentaron un alto porcentaje de absorción, lo cual puede influir en el diseño de la mezcla. Además, se determinó que en los concretos a medida que aumenta la cantidad de agregados reciclados, algunas propiedades como la densidad, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, disminuyen.

Sagoe-Crentsil, Brown y Taylor (2001) en su trabajo denominado “Comportamiento del concreto fabricado con agregado grueso de concreto reciclado producido comercialmente” realizado en el país de Australia, señalan que, aunque muchos investigadores determinaron una reducción de la resistencia en el concreto elaborado con AR, debe tenerse en cuenta que el grado de reducción está relacionado con parámetros como el tipo de concreto utilizado para hacer los AR (resistencia alta, media o baja), el porcentaje de sustitución de AR, la relación agua/cemento y la condición de humedad del agregado reciclado.

Por su parte, En Israel, Katz (2003) realizó un estudio nombrado “Propiedades del concreto elaborado con agregados reciclados a partir de concreto viejo parcialmente hidratado” donde descubrió que el contenido de aire del concreto elaborado con AR es ligeramente superior (del 4% a 5,5%) al del concreto elaborado con agregados naturales, utilizando un porcentaje de sustitución del 100%. Esto es debido a que los agregados reciclados presentan una mayor porosidad. De igual forma se determinó que con una relación agua/cemento alta (entre 0.6 y 0.75), la resistencia del concreto elaborado con agregados reciclados es comparable a la del concreto de referencia incluso con un reemplazo del 75%.

De acuerdo a Topçu y Şengel (2004), en su investigación “Propiedades de los concretos elaborados con agregados de residuos de concreto”, realizada en Turquía, la viabilidad de un concreto elaborado con AR para el mismo contenido de agua que un concreto tradicional, es menor según lo informado por muchos investigadores, especialmente cuando los niveles de reemplazo superan el 50%, es por esto que, para mejorar la trabajabilidad, se han sugerido algunas medidas como cambiar la condición de humedad de los AR.

Por otro lado, Rao, Jha y Misra (2007) en su investigación titulada “Uso de agregados reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición para elaborar concretos”, realizada en la India, encontraron que la resistencia del concreto de referencia y el concreto elaborado con agregados reciclados (CAR) es comparable incluso con un reemplazo del 100%, siempre y cuando la relación agua/cemento sea superior a 0.55, sin embargo, a medida que la relación a/c se reduce a 0.40, la resistencia del concreto elaborado con AR sólo alcanza un 75% en comparación con el concreto de referencia. También mencionan que el módulo de elasticidad para el CAR está en el rango de 50 a 70% con respecto al concreto tradicional, dependiendo de la relación agua-cemento y el nivel de reemplazo de AR.

Domínguez y Martínez (2007), en su trabajo “Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas”, realizado en el estado de Quintana Roo, trabajaron con el reciclaje de los residuos de construcción y demolición de esta región. Este proyecto se desarrolló en varias etapas, que iban desde la recolección del escombros hasta el procesamiento de estos residuos para fabricar elementos constructivos como; bloques, mosaicos y adoquines, así como concretos simples reciclados. En los apartados de calidad y resistencia, los resultados obtenidos con los materiales reciclados fueron en su mayoría positivos, salvo por algunos datos técnicos como el incremento en el porcentaje de absorción de los agregados, así como una resistencia ligeramente menor para el concreto fabricado con agregados reciclados, sin embargo, la resistencia obtenida estuvo arriba de la resistencia requerida.

Más adelante, Huda y Alam (2014) en su investigación “Comportamiento mecánico de tres generaciones de concreto elaborado con 100% de agregado grueso reciclado”, fueron pioneros en estudiar la evolución de las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos elaborados a partir de materiales reciclados en diferentes ciclos de reciclaje. En este trabajo primero se recolectaron residuos de construcción y demolición en un depósito, para después procesarlos y elaborar agregados reciclados. Con los AR posteriormente se elaboraron concretos y repitieron ese ciclo en 3 ocasiones, obteniendo agregados y concretos de primera, segunda y tercera generación. Los agregados sufrieron degradaciones en cuanto a su calidad, las cuales se reflejaron en las propiedades mecánicas de los concretos.

Moretti, Sales, Almeyda, Rezende y Gromboni (2016) en su estudio denominado “ Uso conjunto de residuos de construcción y arena de ceniza de bagazo de caña de azúcar para elaborar concretos” desarrollaron una investigación en donde combinaron RCD con otro material para elaborar concretos. En este caso, el otro material fue la ceniza de bagazo de caña y se utilizó específicamente como agregado fino, empleando un porcentaje de sustitución del 30%. En cuanto a los residuos de construcción y demolición, después de un proceso de trituración y caracterización, estos se utilizaron como agregado grueso, utilizando porcentajes de sustitución del 30 y 50%. Para el concreto reciclado se hicieron diversas pruebas como la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la relación de vacíos, la densidad aparente en seco, la absorción de agua y la profundidad de carbonatación del concreto producido con diferentes contenidos de estos residuos. Los resultados de este proyecto arrojaron que sustituyendo un 30% el agregado fino, como el grueso, se alcanzó una resistencia a la compresión del 93% con respecto al concreto de referencia. También se determinó que, si se aumenta la cantidad de residuos de construcción, disminuye el módulo de elasticidad y aumenta la cantidad de agua necesaria para mantener la trabajabilidad de la mezcla.

En Portugal, Abreu, Evangelista y De Brito (2018) realizaron una investigación titulada “El efecto del reciclaje múltiple en el desempeño mecánico del concreto elaborado con agregado grueso reciclado” en donde evaluaron los resultados de incorporar AR de varios ciclos de reciclaje en mezclas de concreto. Los agregados iniciales no se obtuvieron a partir escombros, sino a partir de la trituración de un concreto de referencia de origen controlado para tener menos variables en cuanto a la procedencia del residuo. El propósito principal de esta investigación fue estudiar el comportamiento mecánico del concreto diseñado con la incorporación de agregado grueso reciclado de tres ciclos sucesivos de reciclaje, además en esta investigación se utilizaron dos porcentajes de sustitución, que fueron del 25% y 100%. Los resultados de los AR y concretos elaborados con AR se compararon con los materiales de referencia. Para este proyecto se evaluaron distintas propiedades de los agregados como; la densidad, absorción de agua, desgaste de los Ángeles e índice de forma, mientras que para los concretos se evaluaron la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, resistencia a la abrasión y el módulo de elasticidad a los 7, 28 y 56 días de curado. Los resultados obtenidos para los agregados

reciclados demostraron que, con el aumento del número de ciclos de reciclaje, se produce una disminución en su calidad que afecta el comportamiento mecánico del concreto, no obstante, ese desempeño mecánico decrece asintóticamente con el número de ciclos de reciclaje, tendiendo a un valor final representativo de la estabilización de la propiedad. Las únicas dos propiedades que no desarrollaron tal tendencia fueron el índice de forma y la densidad aparente del material, ya que no presentaron una tendencia específica para sus valores.

A pesar del gran número de investigaciones que existen hasta la fecha acerca de los RCD, no hay ningún registro a nivel nacional o regional de alguien que haya evaluado la degradación de las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos elaborados con los residuos de construcción y demolición de esta región en diferentes ciclos de reciclaje. Asimismo, las investigaciones referentes al reciclaje repetido de los RCD para la elaboración de nuevos agregados y concretos, hoy en día, presentan algunas contradicciones y muchas incógnitas todavía, por tal motivo, es de suma importancia seguir explorando a fondo las características de estos materiales, buscando ampliar la información con respecto a esta temática para aprovechar todo el potencial de los materiales reciclados.

#### **1.4 Justificación**

La generación de residuos de construcción y demolición se ha vuelto un problema constante y acreciente que impacta severamente al medio natural y a la sociedad. Este fenómeno, ha despertado un gran interés por parte de la comunidad científica, los constructores y las autoridades para crear estrategias que mitiguen los impactos que producen estos desechos, siendo las más destacadas los modelos de gestión y los procesos de reciclaje, por lo resulta importante seguir trabajando con los RCD y con los materiales elaborados a partir de estos residuos para conocer más sobre sus particularidades y para adoptar mejores medidas de mitigación.

Actualmente el reciclaje se ha vuelto una actividad compleja que incluye procesos más elaborados y que requiere de amplios conocimientos, buscando siempre obtener el mayor provecho de los materiales reciclados, sin embargo, todavía quedan muchas cosas por conocer. El desarrollo de esta investigación es importante porque conociendo más a fondo las propiedades de los agregados y concretos elaborados con RCD se puede saber hasta dónde podemos llegar con estos materiales en cuanto a sus potenciales aplicaciones, además de que sería uno de los primeros antecedentes acerca de esta temática a nivel regional y nacional.

Este trabajo pretende explorar el estado del arte de las investigaciones que han llevado al límite a los agregados y concretos elaborados con RCD a través del proceso de multi-reciclaje para evaluar las magnitudes de degradación y determinar si en algún ciclo específico dichos materiales dejan de ser aprovechables o si bien, existe una estabilización de la propiedad que indique cual es el umbral máximo para cada característica.

La presente investigación traerá distintos beneficios sociales directos e indirectos, entre los que se encuentran el aprovechamiento regular de los residuos de construcción y demolición, la reducción de contaminación en zonas urbanas y zonas rurales, la creación de programas gubernamentales para la gestión de RCD y la apertura de la compra-venta de RCD y materiales elaborados a partir de estos desechos.

En el aspecto económico, el multi-reciclaje podría cambiar la percepción de los RCD como problemática, convirtiéndola ahora en una oportunidad para ganar o ahorrar dinero. Con los procesos frecuentes de reciclaje, surgiría un nuevo esquema de negocios que giraría entorno a los materiales reciclados, derivando en la comercialización al por mayor de los productos reciclados y en la reducción de los costos de transporte. Desde el punto de vista del constructor, los materiales obtenidos a partir de los RCD pueden significar un ahorro considerable, puesto que si se hace un análisis calidad-precio, estos materiales son una opción muy viable, porque cumplen con los requerimientos constructivos y porque generalmente son más baratos, reduciendo notablemente los costos de obra.

Desde el punto de vista ambiental, el reciclaje siempre ha sido una actividad favorable para el planeta, en este caso en particular, se obtendrán beneficios importantes, entre los que destacan la reducción de las áreas de explotación donde se extraen agregados vírgenes, la recuperación de espacios contaminados con RCD, una menor disposición en rellenos sanitarios, el aprovechamiento de los residuos de C & D en distintos ciclos de reciclaje, un consumo de energía inferior y un ahorro de combustible en el transporte.

Por otro lado, esta investigación servirá como referencia para el desarrollo de nuevos estudios relacionados con el reciclaje repetido en los que se consideren otras variables, contribuyendo así con la expansión de la literatura existente e incentivando a seguir con la exploración de las propiedades de los materiales elaborados con RCD.

### **1.5 Pregunta de investigación**

¿En qué magnitud se degradan las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos elaborados con RCD en diferentes ciclos de reciclaje?

### **1.6 Hipótesis**

Durante cada ciclo de reciclaje las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos elaborados con RCD se degradarán de un 3% a un 15% con respecto al ciclo anterior.

## **1.7 Objetivos**

### **1.7.1. Objetivo general**

Evaluar la degradación de las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos elaborados con residuos de construcción y demolición durante diferentes ciclos de reciclaje.

### **1.7.2. Objetivos particulares**

- Realizar una amplia revisión de la literatura acerca de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados.
- Realizar una amplia revisión de la literatura acerca de las propiedades físicas y mecánicas de los concretos elaborados con agregados reciclados.
- Analizar a partir de la búsqueda bibliográfica, las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos elaborados con RCD en diferentes ciclos de reciclaje.
- A partir del estado del arte, determinar en qué magnitud se degradan las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos elaborados con RCD en diferentes ciclos de reciclaje.

---

**CAPÍTULO 2**

**DISEÑO DE LA**

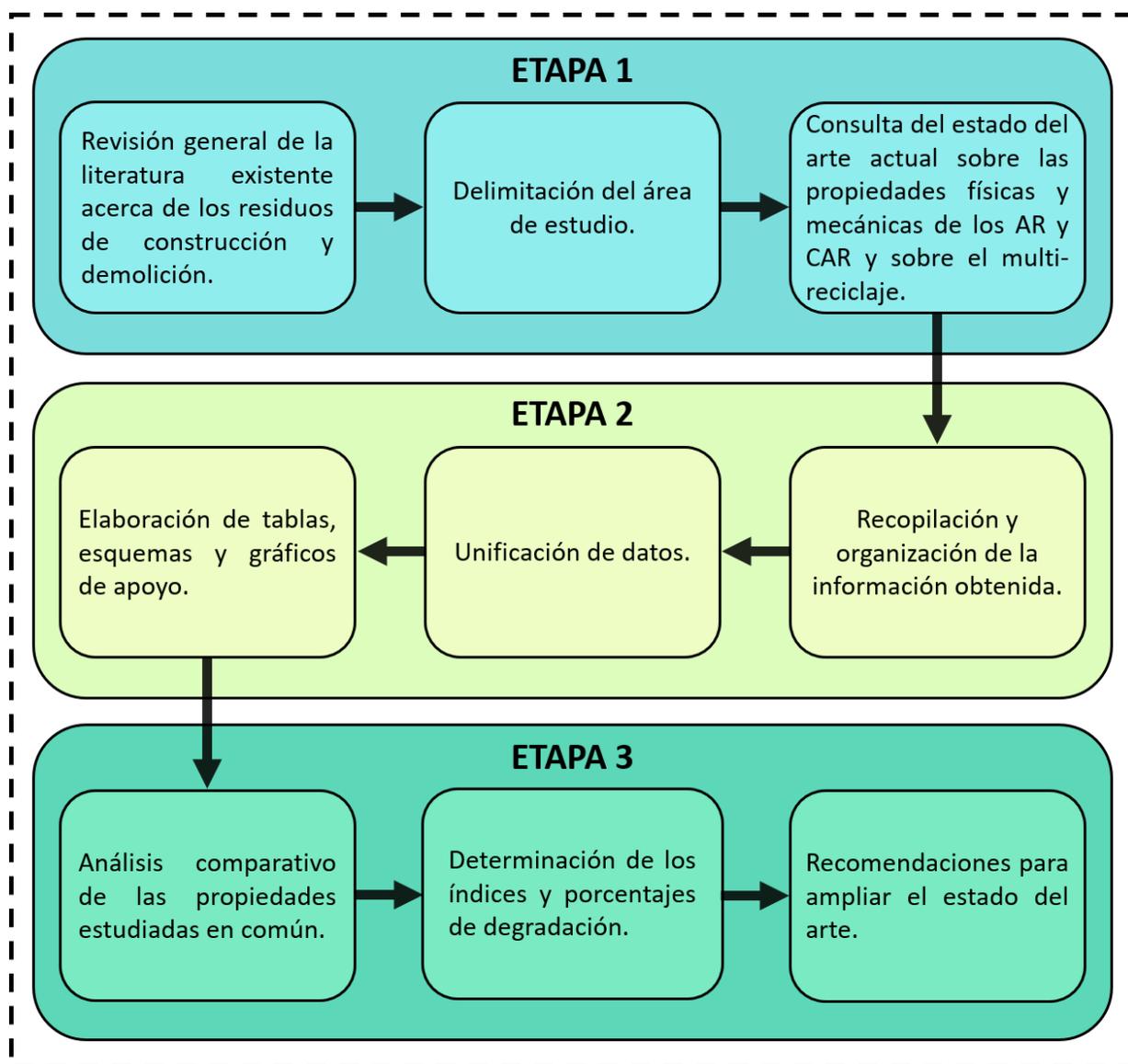
**INVESTIGACIÓN**

---

## 2.1 Metodología

### 2.1.1 Diagrama metodológico

Para el desarrollo de la presente investigación es necesario implementar una metodología que permita cumplir con cada uno de los objetivos, es por ello, que a continuación se presenta en la Figura 4, un esquema metodológico compuesto por 9 actividades principales, divididas en tres etapas, las cuales serán descritas a detalle posteriormente.



**Figura 4. Diagrama metodológico.**

Fuente: Elaboración propia.

Cada una de las tres etapas que componen el diagrama metodológico, incluyen 3 actividades estratégicas que sirven para el desarrollo óptimo de esta investigación. La etapa 1 está enfocada en una consulta extensa de la literatura con información que va desde lo general hasta lo particular, incluyendo datos a nivel mundial, a nivel nacional y a nivel local. La etapa 2 se centra en la organización, unificación y estructuración de la información para su posterior análisis, ayudándose de herramientas gráficas y tablas de datos. En cuanto a la etapa 3, esta se caracteriza por incluir el proceso analítico comparativo, así como las conclusiones y las recomendaciones.

### **2.1.2 Procedimiento y descripción de las actividades realizadas**

- **Actividad 1.** Para el desarrollo de esta actividad se realizó una investigación documental general acerca de los residuos de construcción y demolición, en donde se definió que son los RCD, cómo es su composición, cuál es su producción anual a nivel mundial y nacional, cómo se clasifican, que opciones existen para su disposición final, como ha evolucionado el proceso de reciclaje de los RCD y que se ha hecho con respecto a esta temática a nivel local.
- **Actividad 2.** En la segunda actividad se hizo una delimitación del área de estudio, que en este caso fue sobre las propiedades físicas y mecánicas de los agregados y concretos fabricados a partir de los RCD, y sobre el proceso de multi-reciclaje para agregados reciclados y concretos elaborados con AR, creando así un estado del arte sólido y basto que permite tener las bases para un análisis más detallado.
- **Actividad 3.** Después de delimitar el área de estudio y de establecer cual es el estado del arte actual con respecto al multi-reciclaje para AR y CAR, se estudiaron a fondo las investigaciones más relevantes y con mayor potencial para determinar que es lo que ocurre con las características físicas y mecánicas de los materiales reciclados luego de la implementación del reciclaje repetido.
- **Actividad 4.** Cuando se obtuva toda la información correspondiente, esta se procesó y organizó para la interpretación de datos y para su posterior análisis. De cada una de las investigaciones estudiadas se obtuvieron datos claves como su título, la metodología aplicada, las consideraciones, la composición de la mezcla para los concretos y los resultados obtenidos para todas las propiedades estudiadas.

- **Actividad 5.** Con la información bien organizada se procedió con la unificación de datos (términos y unidades de medida), ya que en cada investigación se utilizaron distintos conceptos para referirse a algo en específico, así como distintas unidades de medida para representar los resultados obtenidos. Esta actividad se realizó con el fin de desarrollar un análisis más práctico y eficiente.
- **Actividad 6.** Una vez que la información estuvo bien estructurada y que se unificaron todos los datos, se elaboraron tablas y gráficas comparativas para el análisis detallado de las propiedades físicas y mecánicas de agregados y concretos reciclados que fueron estudiadas en dos o más investigaciones. Las tablas incluyeron los valores que se obtuvieron en cada trabajo y los porcentajes o índices de degradación.
- **Actividad 7.** Luego de la elaboración del material de apoyo, inició el proceso de análisis comparativo de las propiedades en común estudiadas en las investigaciones. En esta actividad se mencionaron las magnitudes de degradación o de incremento para cada características después del ciclo de reciclaje correspondiente realizado.
- **Actividad 8.** Para la presente actividad se describieron los resultados y las conclusiones, en donde se indicaron cuales fueron los datos obtenidos para cada una de las propiedades estudiadas, que fue lo que ocurrió en cada trabajo, si los resultados fueron similares entre una u otra investigación, cuál fue el valor máximo de degradación para cada propiedad y la explicación técnica para las alteraciones que experimenta cada característica en los ciclos de reciclaje, sustentado con base en la literatura y en la explicación de los autores de cada estudio.
- **Actividad 7.** Finalmente se dieron las recomendaciones para seguir con el estudio de esta temática y expandir el estado del arte, sugiriendo que estudios se pueden realizar y que variables se recomienda tomar.

---

**CAPÍTULO 3**  
**INVESTIGACIÓN**  
**DOCUMENTAL**

---

## INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

### **3.1 Comportamiento mecánico de tres generaciones de concreto elaborado con 100% de agregado grueso reciclado.**

*(Sumaiya Binte Huda, M. Shahria Alam)*

*Titulo original: Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete.*

Este trabajo surge en el año 2014 en la Universidad de Columbia Británica en Canadá y es una de las primeras investigaciones que abordan la temática del reciclaje repetido de concreto elaborado con agregados reciclados (CR), además de que también es una de las pocas que hasta la fecha se ha desarrollado en el continente americano.

Debido al alto volumen de residuos de construcción y demolición que se generan en todo el mundo y al gran potencial que tienen estos residuos cuando son utilizados como agregados en el concreto, Huda y Alam (2014), discuten el uso del agregado grueso reciclado (AGR) en el concreto si se realizarán reciclajes repetidos, especialmente tomando un enfoque hacia a las propiedades mecánicas del concreto. Sus argumentos son; que no sólo se puede pensar en la condición actual, sino que también se debe visualizar la situación futura desde la perspectiva curiosa/intuitiva, porque la amplia aplicación de agregados reciclados puede generar nuevos desafíos, es decir, que a pesar de que actualmente muchas personas utilizan estos agregados para fabricar concreto, que ocurriría cuando las construcciones que se crearon con estos concretos tengan que ser demolidas, ¿Se podría repetir el proceso de reciclaje? o ¿Qué medidas se pueden tomar?, pues con base en lo anterior toma importancia la concepción de esta investigación, por lo que la idea del agregado reciclado repetido puede ser una solución viable al creciente problema relacionado con la eliminación de desechos de construcción y demolición y la fuente limitada de agregado grueso natural.

#### **3.1.1 Metodología aplicada**

En este estudio se desarrollaron 3 generaciones (1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup>) de concreto reciclado repetido, reemplazando al agregado grueso natural con el agregado grueso reciclado, utilizando un porcentaje de sustitución constante del 100% durante cada ciclo, a los concretos elaborados con

AGR también se les denominó concretos verdes. El objetivo de la investigación era que los concretos producidos durante las 3 generaciones de reciclaje obtuvieran una resistencia a la compresión de 32 MPa a los 28 días. Se elaboró de igual forma un concreto de control con agregados naturales diseñado bajo la misma resistencia a la compresión, para compararlo con los concretos verdes. Aunque inicialmente casi no lo mencionan, es de suma importancia señalar que se utilizaron otros materiales en las mezclas de los concretos, tanto para el concreto de control, como para los concretos verdes, como son las cenizas volantes, los reductores de agua y la incorporación de aire.

El concreto de primera generación se preparó con agregado grueso reciclado obtenido de un depósito de RCD, propiedad de la empresa “OK Builders Winfield”, detalle muy importante, ya que de esta forma podemos comprender que el origen del agregado reciclado podría presentar diferentes variables, que en este caso no fueron consideradas. El AGR recolectado en OK Builders Winfield fue procesado y después utilizado para elaborar concretos reciclados de primera generación (CR1), obteniendo así los primeros cilindros. El CR1 fue triturado para obtener nuevos agregados y se elaboró el concreto de segunda generación (CR2), se repitió nuevamente el proceso y el CR2 también fue triturado para obtener el concreto de tercera generación (CR3), mismo que fue el último. La metodología mencionada anteriormente se puede observar mejor de manera gráfica en la Figura 5. Para un mejor entendimiento de la metodología y otras tablas o figuras presentadas más adelante, se puede consultar la tabla de siglas y/o abreviaturas presentadas a continuación.

**Tabla 1. Lista de los términos utilizados en la investigación 1.**

Lista de siglas y/o abreviaturas	
AGN	Agregado grueso natural
AGR1	Agregado grueso reciclado 1ª generación
AGR2	Agregado grueso reciclado 2ª generación
AGR3	Agregado grueso reciclado 3ª generación
CR1	Concreto elaborado con AGR de 1ª generación
CR2	Concreto elaborado con AGR de 2ª generación
CR3	Concreto elaborado con AGR de 3ª generación

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5. Metodología del proceso de reciclaje utilizado en la investigación 1.**

Fuente: Huda & Alam, 2014 (transcrito del inglés al español).

### 3.1.2 Consideraciones

Los otros materiales principales para la elaboración del concreto (agregado fino natural, cemento y agua) fueron los tradicionales y no sufrieron ninguna alteración. Se utilizaron cenizas volantes clase F como remplazo del cemento portland común, el porcentaje de sustitución de este material fue del 20% y las incluyeron ya que mencionan que las cenizas volantes ayudan en el incremento de la durabilidad del concreto al formar una matriz de concreto más compacta, lo que reduce la permeabilidad y la tasa de infiltración química. Además de las cenizas volantes también se incluyeron aditivos, en este caso se utilizó el “Glenium 3030 NS” como aditivo reductor de agua y el Micro air como aditivo inclusor de aire.

Los autores mencionan que el material recolectado que se utilizó como agregado grueso reciclado fue afectado por las condiciones climatológicas, por lo que muchos materiales no deseados, como la materia orgánica, se mezclaron con dicho material. El AGR se tamizó para descartar partículas con un tamaño menor a 5 mm y se lavó a fondo con agua para eliminar otras

impurezas. La relación agua/cemento es de 0.41 y esta se mantiene constante para todos los concretos. Los cilindros de concreto fueron triturados en una planta trituradora mediante una trituradora de mandíbula, las partículas de gran tamaño se procesaron posteriormente en una trituradora de impacto para una trituración secundaria, lo que significa que para esta investigación se utilizaron 2 procesos de triturado.



**Figura 6. Proceso de trituración de los cilindros de concreto reciclado.**

Fuente: Huda & Alam, 2014.

### 3.1.3 Composición de la mezcla

Las proporciones de la mezcla se pueden observar en la Tabla 2, donde podemos ver componentes como el cemento, las cenizas volantes, el agregado fino, el agregado grueso, agua y aditivos reductores de agua y para incorporación de aire, manteniendo los valores constantes, independientemente de si era el concreto de control o los concretos verdes. El único cambio observable es en cuanto a los concretos verdes y el concreto natural, ya que en el primer caso se utilizó agregado grueso reciclado y en el segundo agregado grueso natural, pero siempre respetando la misma cantidad de agregado.

**Tabla 2**

Composición de la mezcla

Componentes	Tipo o marca	Proporciones en kg/m <sup>3</sup>			
		Control	CR1	CR2	CR3
Cemento	Portland GU	280	280	280	280
Cenizas volantes	Tipo F	70	70	70	70
Agregado fino	Agregado natural	750	750	750	750
Agregado grueso	AGN	1040	-	-	-
	AGR	-	1040	1040	1040
Agua		150	150	150	150
Reductor de agua	Glenium 3030	630	630	630	630
Incorporación de aire	Micro air	120	120	120	120

Fuente: Huda &amp; Alam, 2014.

### 3.1.4 Resultados y discusión

#### 3.1.4.1 Propiedades de los agregados

Se le realizaron diferentes pruebas físicas al agregado grueso natural y al agregado grueso reciclado, tales como la gravedad específica en estado seco, la gravedad específica en estado saturado superficialmente seco, la gravedad específica aparente, la densidad aparente, la capacidad de absorción y el contenido de humedad, estas pruebas se realizaron de acuerdo a los estándares de la Asociación Canadiense de Normas, por sus siglas en inglés (CSA) y los resultados se pueden observar en la Tabla 3.

**Tabla 3**

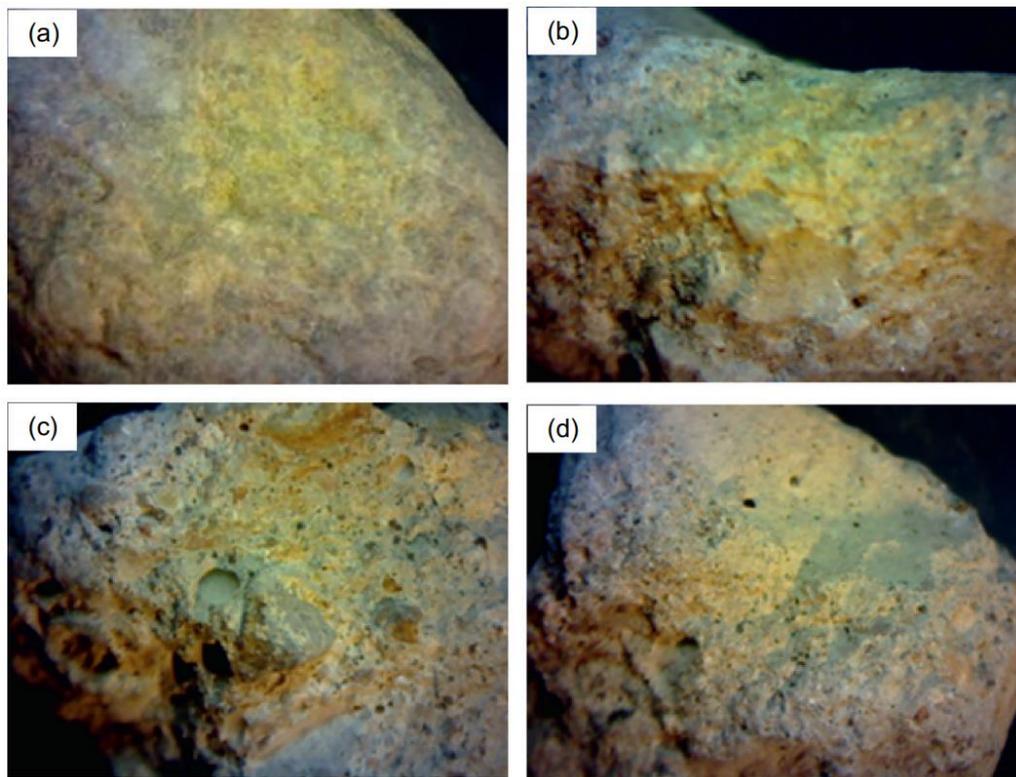
Propiedades de los agregados

Agregado	Gravedad específica bulk (seco)	Gravedad específica bulk (SSS)	Gravedad específica aparente	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Capacidad de absorción (%)	Contenido de humedad
AGN	2.67	2.69	2.73	1622.3	1.2	0.3
AGR1	2.32	2.55	2.63	1396.2	5.2	2.53
AGR2	2.17	2.33	2.57	1251.2	7.1	2.57
AGR3	2.03	2.23	2.52	1195.9	9.4	2.66

Fuente: Huda &amp; Alam, 2014.

Los datos demuestran que en la capacidad de absorción y el contenido de humedad incrementan notablemente para el AGR de 1ª generación con respecto al AGN, y conforme avanzan los ciclos siguen incrementando los valores, pero ya en menor medida. Los altos valores de absorción del AGR repetido se deben principalmente a la presencia de residuos de pasta de cemento que aún permanece en la superficie del agregado grueso original después de la trituración, por lo tanto, la absorción del AGR seguirá en aumento conforme se incremente el número de repeticiones. En cuanto a los apartados de gravedad específica, gravedad aparente y densidad aparente podemos ver que los valores disminuyen gradualmente con cada ciclo de reciclaje.

La gravedad específica, la densidad aparente y la absorción son propiedades interrelacionadas que están muy influenciadas por la cantidad de mortero adherido al agregado que conduce a la porosidad, esto se puede comprobar en la Figura 7, donde se presenta una vista microscópica de los agregados después de estar sometidos a diferentes procesos de reciclaje.



**Figura 7. Vista microscópica de los diferentes tipos de agregados estudiados antes y después de cada ciclo de reciclaje (AGN-a, AGR1-b, AGR2-c y AGR3-d).**

Fuente: Huda & Alam, 2014.

Las imágenes demuestran que el AGR presenta grietas y los daños aumentan durante cada riego de reciclaje, por su parte, el AGN no presentó grietas o poros incluso bajo el microscopio. De acuerdo a estos datos se puede concluir que la calidad del agregado se degrada con el número de repeticiones, lo que podría influir considerablemente en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto reciclado repetido.

### **3.1.4.2 Propiedades de los concretos**

#### **3.1.4.2.1 Propiedades del concreto en estado fresco**

En la Tabla 4 se presentan las variaciones del asentamiento del concreto y el contenido de aire. Para el valor de asentamiento de las mezclas se determinó un objetivo de 90 mm, ya que de acuerdo a los autores este valor de revenimiento representaba una mezcla más realista, ya que en la industria de concreto premezclado, el revenimiento habitual es cercano a los 90 mm. El valor de asentamiento de la mezcla preparada con el agregado grueso natural fue de 100 mm, un poco más alto que el asentamiento objetivo, por su parte los concretos reciclados; CR1, CR2 y CR3 tuvieron un revenimiento de 100 mm, 94 mm y 85 mm respectivamente. Se observó una tendencia decreciente en los valores de asentamiento con el aumento del número de repeticiones, esto podría deberse al estado de humedad de los diferentes tipos de agregado grueso y al aumento de la rugosidad y angularidad de la superficie con cada una de las repeticiones.

Los resultados de la prueba de contenido de aire de todas las mezclas también se muestran en la Tabla 4, que indican una tendencia creciente con el aumento del número de repeticiones. El concreto que contenía AGR repetido parecía tener un contenido de aire ligeramente mayor en comparación con la mezcla de referencia, aunque cada vez se incorporaba la misma cantidad de aire. La razón del aumento del contenido de aire no se comprende correctamente, sin embargo, es probable que se deba al hecho de que la cantidad de contenido de mortero adherido aumenta con el número de repeticiones.

**Tabla 4**

Propiedades de los concretos en estado fresco

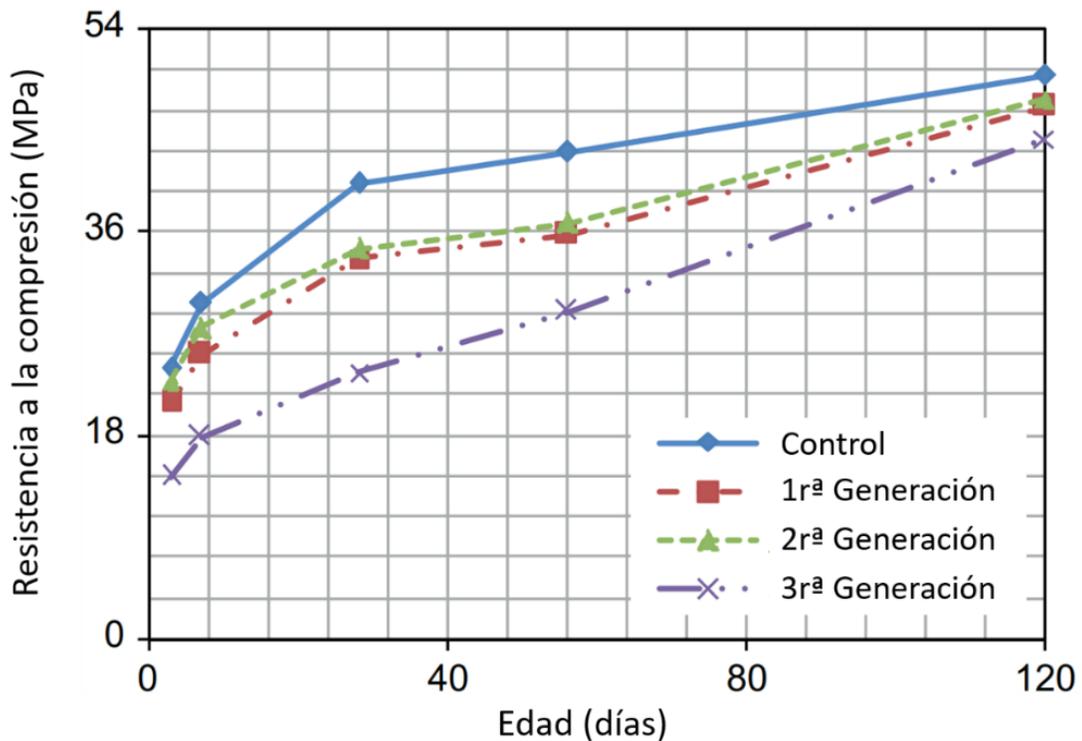
Mezcla de concreto	Revenimiento (mm)	Contenido de aire (%)
Concreto de control	100	3.4
Concreto reciclado de 1ª generación	100	3.6
Concreto reciclado de 2ª generación	94	3.9
Concreto reciclado de 3ª generación	85	4.4

Fuente: Huda & Alam, 2014.

### 3.1.4.2.2 Propiedades del concreto en estado endurecido

#### Resistencia a la compresión

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión al concreto de control y a los concretos reciclados de primera, segunda y tercera generación a las edades de 3, 7, 28, 56 y 120 días tal y como se puede ver en la Figura 8.



**Figura 8. Resistencia a la compresión de varias mezclas de concreto.**

Fuente: Huda & Alam, 2014.

Los resultados demuestran que 3 de los concretos lograron el objetivo de los 32 Mpa a la edad de 28 días (Concreto de control, CR1 y CR2), mientras que el CR3 no lo logró, incluso a la edad de 56 días. De los concretos reciclados el CR2 fue el que tuvo mejores resultados, por ejemplo, a los 56 días el CR1 tuvo una resistencia de 35.9 Mpa, mientras que el CR2 tuvo una resistencia de 36.8 Mpa, es decir, el CR2 tuvo una resistencia 2.5% mayor a la del CR1 y si bien, aunque no fue un porcentaje muy relevante, la razón de esto fue debido a que el agregado grueso reciclado de 2ª generación tenían una textura más rugosa y su forma era más angular, lo que mejoró la unión y el entrelazado entre el AGR2 y la pasta de cemento. Las principales razones para que el concreto reciclado de 3ª generación sufriera una degradación importante en su resistencia a la compresión fue la baja densidad aparente del AGR3, la gran cantidad de contenido de mortero adherido y la débil zona de transición interfacial, aunque es relevante mencionar que la resistencia a la compresión de CR3 pudo alcanzar hasta 44,3 MPa a la edad de 120 días, que es al menos un 25 % más alta que la resistencia objetivo. Otra cosa que se puede observar es que los resultados de las pruebas de resistencia a los 56 y 120 días se distribuyen casi simétricamente para todas las mezclas. Finalmente se puede concluir que el CR3 fue el concreto que experimentó la tasa más alta de desarrollo de resistencia tardía en comparación con todas las demás mezclas, además de que no logró el objetivo de resistencia requerido a los 28 días, aunque si lo logró en un lapso de tiempo mucho mayor.

### **Módulo de elasticidad y relación de Poisson**

La Tabla 5 muestra los datos referentes a las pruebas del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson realizadas a las diferentes generaciones de concreto elaborado con AGR repetidos, así como al concreto de control. Los valores de la columna del módulo de elasticidad muestran que el concreto de control fue el que obtuvo el valor más alto con 27.9 Gpa y conforme avanzaban los ciclos los valores fueron disminuyendo. El CR3 fue el valor más bajo con 24.5 GPa, un 13.9% menor al concreto de control. Esto ocurrió debido a la disminución de la rigidez y la densidad aparente del agregado grueso reciclado.

Los datos presentados indican que la calidad del agregado grueso reciclado repetido fue disminuyendo con el aumento del número de repeticiones. El coeficiente de Poisson de la mezcla de control fue de 0,23 y los valores fueron aumentando con el número de repeticiones, el concreto reciclado de tercera generación obtuvo un coeficiente de Poisson de 0.26.

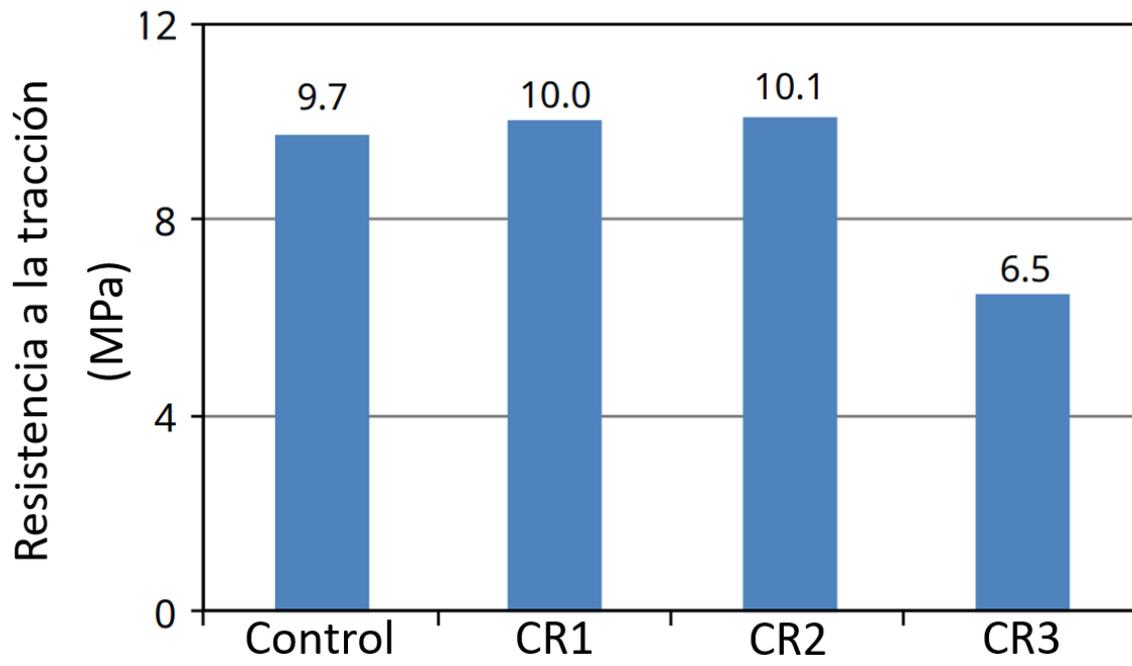
**Tabla 5**  
**Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson**

<b>Concreto</b>	<b>Módulo de elasticidad (GPa)</b>	<b>Coeficiente de Poisson</b>
Control	27.9	0.23
CR1	27.1	0.24
CR2	25.8	0.24
CR3	24.5	0.26

Fuente: Huda & Alam, 2014.

### **Resistencia a la tracción**

En la Figura 9 se puede observar una gráfica con los datos de las pruebas de resistencia a la tracción por hendimiento realizadas a todas las mezclas de concreto. En este estudio, los resultados de resistencia a la tracción de las tres generaciones diferentes de concretos reciclados no sólo se compararon con el concreto de control, sino que también se compararon entre sí, ya que los datos no presentaban una tendencia marcada, por ejemplo, el CR1 y el CR2 lograron una resistencia a la tracción casi un 3 y 4% mayor que la del concreto de control, esto se le atribuye a una mayor capacidad de absorción de los CR1 y CR2 debido a la presencia de mortero viejo adherido, además de que las diferentes generaciones de AGR repetidos utilizados en este estudio estaban húmedos, ya que se lavaron antes de su uso, lo que significa que tenían un contenido de humedad inicial,. Por otro lado, se encontró que la resistencia a la tracción por división del CR3 fue significativamente menor que la del CR1 y CR2, el motivo de esto fue debido a que el agregado grueso reciclado de tercera generación presentaba una mayor porosidad y una degradación en su calidad con respecto a los agregados de las dos primeras generaciones.



**Figura 9. Resistencia a la tracción.**

Fuente: Huda & Alam, 2014.

### **3.2 Propiedades físico-mecánicas del concreto multi-reciclado procedente de la industria de concreto prefabricado.**

*(Angel Salesa, Jose A. Pérez-Benedicto, David Colorado-Aranguren, Pedro L. Lopez-Julián, Luis M. Esteban, Luis J. Sanz-Baldúz, Jose L. Sáez-Hostaled, Juan Ramis, Daniel Olivares)*

*Titulo original: Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry.*

La siguiente investigación tiene lugar en España y sale a la luz en el año 2017 como una solución a los problemas ambientales ocasionados por la industria de la construcción. De acuerdo a Salesa et al (2017) el reciclaje de los residuos de concreto para producir concreto nuevo es una de las principales formas de reducir el impacto ambiental del sector de la construcción. Uno de los problemas más comunes de esta industria recae en los materiales prefabricados, específicamente en el concreto prefabricado, ya que muchas veces se produce y rechaza debido a fallas en las pruebas de calidad, por lo que finalmente tiene que ser desechado en vertederos, surgiendo así una problemática importante.

Los vertederos se rellenan rápidamente y en muchos casos quedan fuera de la legislación, provocando grandes efectos sobre el medio ambiente (Yuan, 2013). Ante este problema surge una pregunta muy intrigante, ¿Cuál es la solución?, pues según Marie y Quiasrawi (2012), la solución es cerrar el ciclo, transformando los residuos de la industria de la construcción en una nueva materia prima para las nuevas construcciones.

Tomando en cuenta lo anterior y el hecho de que a pesar que existen muchas investigaciones que se han centrado en el uso de agregados reciclados para producir concreto nuevo reciclado, son pocas las investigaciones que han abordado la posibilidad de reciclar concreto que ya ha sido reciclado con anterioridad, por tal motivo, surge este estudio, el cual tiene como objetivo analizar el efecto de la incorporación de agregado grueso reciclado y agregado grueso multi-reciclado, procedentes de prefabricados de concreto desechados, para la elaboración de nuevos concretos que puedan ser comparados con un concreto de control elaborado con agregado grueso natural.

### 3.2.1 Metodología aplicada

Para el desarrollo de este trabajo se determinó realizar dos ciclos de reciclaje, en los cuales se evaluaron tres tipos de agregado; el agregado grueso natural (AGN) de esa región, el agregado grueso reciclado (AGR) y el agregado grueso multi-reciclado (AGM). El agregado grueso reciclado se obtuvo de los desechos de concreto prefabricado de la empresa CEMEX España Operaciones S.L.U, mientras que el agregado grueso multi-reciclado se obtuvo producto de la trituración de los concretos elaborados con AGR. También se evaluaron 3 tipos de concreto; un concreto de control elaborado con AGN y dos concretos reciclados; uno elaborado con AGR (CR1) y el otro elaborado con AGM (CR2). Los concretos elaborados con agregado grueso reciclado y multi-reciclado tendrán un porcentaje de sustitución del 100% con respecto al agregado grueso natural. El esquema metodológico se puede observar en la Figura 10. Para un mejor entendimiento del esquema metodológico y otras figuras o tablas de esta investigación se puede consultar la tabla 6 con las siglas utilizadas en este trabajo.

Además de los materiales tradicionales para la elaboración de concreto se utilizaron 2 aditivos para la mezcla, uno plastificante y otro superplastificante.

Las propiedades que se evaluaron para los agregados son la densidad real, la absorción de agua y el coeficiente de Los Ángeles, mientras que para el concreto las propiedades se evaluaron en dos fases; en estado fresco y en estado endurecido. Las propiedades estudiadas en estado fresco fueron la trabajabilidad/asentamiento y el contenido de aire, por su parte, para el concreto en estado endurecido se realizaron pruebas para obtener datos como la densidad, absorción del agua, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad en estado estático y dinámico.

**Tabla 6. Lista de los términos utilizados en la investigación 2.**

Lista de siglas y/o abreviaturas	
AGN	Agregado grueso natural
AGR	Agregado grueso reciclado (1ª generación)
AGM	Agregado grueso multi-reciclado (2ª generación)
CR1:	Concreto elaborado con agregados reciclados
CR2:	Concreto elaborado con agregados multi-reciclados

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 10. Esquema metodológico del proceso de reciclaje de la investigación 2.**

Fuente: Salesa et al., 2017 (Transcrito del inglés al español).

### 3.2.2 Consideraciones

Para el agregado grueso se utilizaron 3 tipos de agregados con dos tamaños cada uno, uno de grava fina y uno de grava común. El primer tipo de agregado fue el agregado grueso natural, que es piedra caliza triturada de la marca CEMEX y venía en tamaños de 4/10 mm y de 10/20 mm. El segundo agregado, obtenido por la trituración de piezas de concreto prefabricado que no alcanzaban los estándares de calidad, manejaba tamaños de 6/12 mm y 12/20 mm. Por último, el tercer agregado, obtenido producto de la trituración de los concretos elaborados con agregados reciclados (1ª generación), al igual que el segundo tipo de agregados, tenía tamaños de 6/12 mm y 12/20 mm.

En el caso del cemento utilizado, este fue uno tipo II de la marca CEMEX, que incluye cenizas volantes, modelo CEM II/A-V 42,5R. En cuanto al agregado fino, se utilizó agregado natural para todas las mezclas. El agua utilizada fue la recomendada por la norma correspondiente de la ASTM. Además de los materiales mencionados previamente también se incluyeron 2 aditivos,

el primero fue un aditivo químico plastificante de la marca CEMEX, modelo CX ISOFLEX 003 y el otro fue un aditivo químico superplastificante de la marca CEMEX, modelo CX ISOFLEX 003. La norma que se utilizó para elaborar los especímenes fue la ASTM C192 (2015), se prepararon 256 cubos de concreto de prueba estándar de 150 mm de lado y 16 cilindros de concreto de prueba estándar de Ø150 mm y 300 mm de altura. Las pruebas para los agregados y concretos, se realizaron de acuerdo las normas de la Asociación Española de Normalización (UNE). Todas las pruebas de concreto se curaron en una cámara húmeda a 20°C±2°C y con una humedad superior al 95%.

### 3.2.3 Composición de la mezcla

En la tabla 7 se presentan los componentes utilizados en las mezclas, sus proporciones en kg/m<sup>3</sup> y su relación agua/cemento. En la primera columna se señalan los 3 tipos de concreto que se prepararon; el concreto de control, el CR1 y el CR2, mientras que en las otras columnas siguientes se indican los materiales y las cantidades utilizadas. Para el agregado grueso, como se mencionó anteriormente, se utilizaron 3 tipos de agregado; AGN, AGR y AGM, con 2 tamaños cada uno, representados en la columna como grava y grava fina. Las cantidades que se usaron fueron de 750 kg/m<sup>3</sup> para la grava y de 175 kg/m<sup>3</sup> para la grava fina. Los otros materiales empleados como la arena, el cemento y los aditivos plastificantes y superplastificantes fueron los mismos para todos los concretos y las cantidades se mantuvieron constantes. La relación agua/cemento se puede apreciar en la última columna y esta fue de 0.6, lo que es equivalente a 25Mpa, esta se mantuvo constante para el concreto de control y los concretos reciclados.

**Tabla 7**

Proporciones de la mezcla (kg/m<sup>3</sup>)

Tipo de concreto	Agregado grueso			Agregado fino	Cemento	Aditivos		Relación a/c
	Tipo	Grava	Grava fina	Arena	CX CEM II/AV 42,5R	CX ISOPLAST 006	CX ISOFLEX 003	
Control	AGN	750	175	1000	275	2.75	2.75	0.6
CR1	AGR	750	175	1000	275	2.75	2.75	0.6
CR2	AGM	750	175	1000	275	2.75	2.75	0.6

Fuente: Salesa et al., 2017.

### 3.2.4 Resultados y discusión

#### 3.2.4.1 Propiedades de los agregados

A los tres tipos de agregados; agregado grueso natural, agregado grueso reciclado y agregado grueso multi-reciclado, se les realizaron pruebas de densidad real, absorción de agua y coeficiente de los Ángeles, para los 2 tamaños de agregado que se utilizaron, tal y como se puede ver en la Tabla 8. Los datos presentados para la prueba de densidad real indican que el AGN tuvo el valor más alto y conforme avanzaban los ciclos de reciclaje, los valores del AGR y AGM fueron disminuyendo. En cuanto a la absorción de agua, esta incrementó drásticamente con el AGR y volvió a incrementar con el AGM, pero ya en menor medida. Finalmente, para la prueba de los Ángeles, los valores del AGN fueron los más altos con un 32% y 31%, seguido por el AGM con 26% y 23% y finalmente el AGR con 24% y 21% respectivamente.

**Tabla 8**

Propiedades del agregado grueso

Agregado grueso		Prueba		
Tipo	Tamaño	Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción de agua (%)	Coeficiente de los Ángeles (%)
AGN	Grava	2.60	1.1	32
	Grava fina	2.54	1.2	31
AGR	Grava	2.33	5.2	24
	Grava fina	2.38	4.4	21
AGM	Grava	2.22	6.2	26
	Grava fina	2.28	5.7	23

Fuente: Salesa et al., 2017.

#### 3.2.4.2 Propiedades de los concretos

##### 3.2.4.2.1 Propiedades del concreto en estado fresco

###### Contenido de aire y trabajabilidad

En la tabla 9 se presentan los resultados de las pruebas de trabajabilidad/asentamiento y contenido de aire realizadas a todos los concretos en estado fresco. El valor medio de asentamiento para el concreto de control fue el más alto con 69 mm, mientras que el CR1 y CR2 tuvieron valores de 50 mm y 55 mm respectivamente, es decir, en los dos casos hubo una disminución, en el primero fue del 20.30% y en el segundo fue del 27.50% con respecto al

concreto de control. Con los datos anteriores se puede deducir que existe una tendencia a la reducción de esta propiedad con cada bucle de reciclaje, el motivo por lo que esto ocurre puede deberse a que el AGR y el AGM tienen una mayor rugosidad, angularidad y absorción con respecto al AGN, además de que la capacidad de absorción de los agregados reciclados aumenta con el número de ciclos de reciclaje.

De igual forma en la Tabla 9 se pueden apreciar los resultados de las pruebas de contenido de aire, donde los datos arrojan que no existe una diferencia significativa entre el concreto de control y los concretos reciclados.

**Tabla 9**

Propiedades del concreto en estado fresco

Concreto	Trabajabilidad / asentamiento (mm)	Diferencia con respecto al concreto de control	Contenido de aire (%)
Control	69	-	3.2
CR1	55	20.30%	3.3
CR2	50	27.50%	3.3

Fuente: Salesa et al., 2017.

### 3.2.4.2.2 Propiedades del concreto en estado endurecido

#### Densidad y absorción

Los resultados de la densidad SSS a granel, la densidad seca a granel y la absorción de agua de los concretos se muestran en la Tabla 10, la cual señala que los concretos elaborados con agregados reciclados presentan densidades más bajas que el concreto de control y esto ocurre debido a que los agregados reciclados son más ligeros que los agregados naturales, además también se puede ver que existe una tendencia de la reducción de la densidad conforme pasan los ciclos de reciclaje.

Por el otro lado, los concretos reciclados presentan una mayor absorción a comparación del concreto de control, con una tendencia creciente con cada ciclo, en el caso del concreto de control el porcentaje de absorción fue de 5.88%, por su parte para los concretos reciclados los porcentajes fueron de 7.23% para el CR1 y de 7.47% para el CR2.

**Tabla 10**

Densidad y absorción del concreto en estado endurecido

Concreto	Densidad aparente (kN/m <sup>3</sup> )		Absorción de agua (%)
	SSS	Seco	
	Control	23.43	
CR1	23.09	21.53	7.23
CR2	22.84	21.25	7.47

Fuente: Salesa et al., 2017.

**Resistencia a la compresión**

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión a todos los concretos a las edades de 2, 7, 28 y 90 días, los resultados se proyectan en la Tabla 11 y los valores están en MPa. Los datos revelan que los concretos reciclados tuvieron una mayor resistencia a la compresión en cada una de las edades estudiadas, el concreto más fuerte fue el concreto elaborado con agregados multi-reciclados con una resistencia de 49.25 MPa a los 28 días, seguido por el concreto elaborado con agregados reciclados con 48.93 MPa y por último el concreto de control con 46.85 MPa. A los 90 días los concretos reciclados aumentaron su resistencia y presentaron valores muy similares con 54.39 MPa y 54.73 MPa para el CR1 y el CR2 respectivamente, mientras que el concreto de control sólo alcanzó 50.93 MPa.

**Tabla 11**

Resistencia a la compresión promedio

Tipo de concreto	Resistencia a la compresión promedio (Mpa)			
	2 días	7 días	28 días	90 días
Control	26.81	36.4	46.85	50.93
CR1	27.67	38.48	48.93	54.39
CR2	28.2	39.42	49.25	54.73

Fuente: Salesa et al., 2017.

A diferencia de otras investigaciones, en este estudio los concretos reciclados no disminuyeron su resistencia a la compresión con respecto al concreto de control, al contrario, los valores fueron ligeramente más altos y de acuerdo a los investigadores esto se debe a la calidad del agregado reciclado que se utilizó, ya que este sólo provino de piezas prefabricadas de concreto, las cuales fueron fabricadas con altos estándares.

### Módulo de elasticidad: estático y dinámico

En la Figura 11 se puede observar una gráfica con los datos referentes al módulo de elasticidad estático y dinámico, los valores están representados en GPa. Para el módulo de elasticidad estático, el concreto de control obtuvo 34.1 GPa, el CR1 30.1 GPa y el CR 29.9 GPa, es decir, los concretos reciclados disminuyeron un 12% aproximadamente en el módulo de elasticidad estático. En cuanto al módulo de elasticidad dinámico los valores para los 3 concretos fueron de 46.1 GPa para el concreto de control, 40.5 GPa para el CR1 y 39.3 GPa para el CR2, lo que muestra una vez más una reducción para los concretos reciclados con porcentajes del 12.1% y 14.8%. Esto se debe al aumento de mortero adherido con cada ciclo de reciclaje, ya que la pasta de cemento tiene menor módulo de elasticidad que los agregados naturales, por lo tanto, se puede concluir que los concretos reciclados tienen una menor rigidez que los concretos elaborados con agregados naturales.

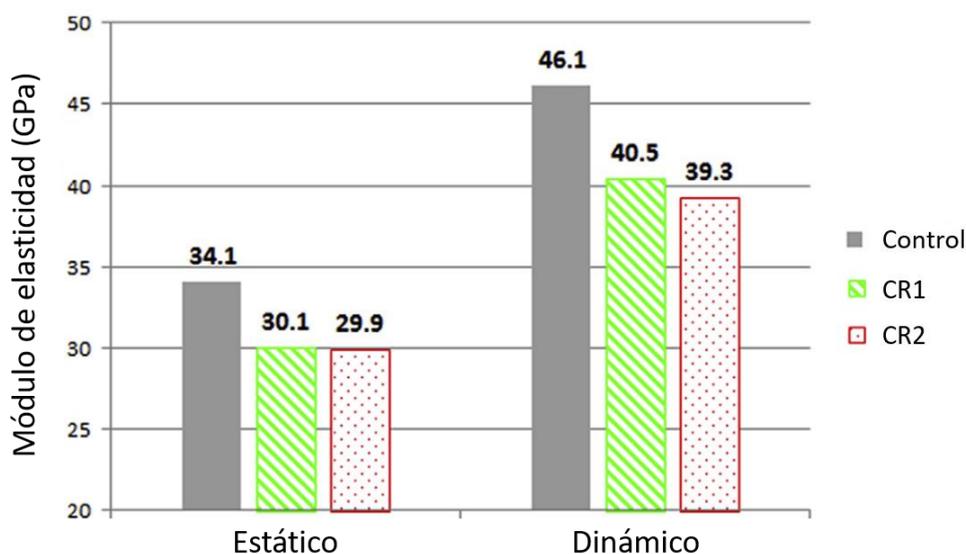


Figura 11. Módulo de elasticidad estático y dinámico de diferentes concretos.

Fuente: Salesa et al., 2017.

### **3.3 El efecto del reciclaje múltiple en el desempeño mecánico del concreto elaborado con agregado grueso reciclado.**

*(Vilson Abreu, Luís Evangelista, Jorge de Brito)*

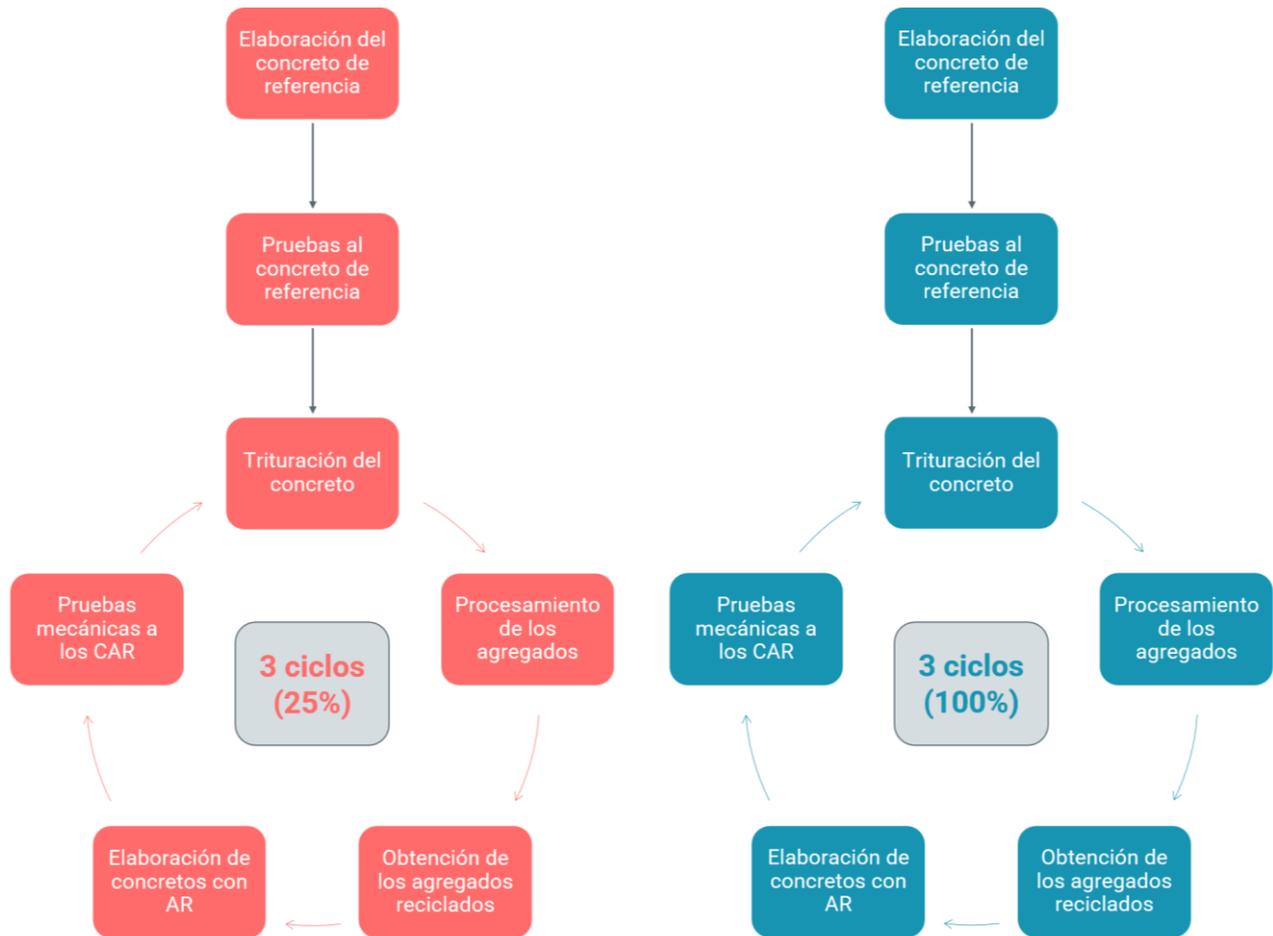
*Titulo original: The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete.*

Esta investigación se realizó en el año 2018 en Portugal y tiene como propósito específico evaluar el desempeño mecánico de concretos con incorporaciones de agregados reciclados durante varios ciclos de reciclaje. De acuerdo con la literatura, hasta el año 2018, la información referente a los agregados de reciclaje múltiple y a los concretos elaborados con estos agregados era escasa, en cuanto a los ciclos de reciclaje, los autores mayormente desarrollaban hasta 2 ciclos y muy pocos superaban ese número, además de que la mayoría de las investigaciones tenían diferentes variables, tales como el origen de los agregados o las propiedades a estudiar. De acuerdo a lo anterior, Abreu et al (2018), trabajan en una investigación que les permite estudiar 3 ciclos de reciclaje con distintos porcentajes de sustitución y empezando con un concreto de referencia, ya que de esta forma pueden realizar un mejor análisis del rendimiento de las propiedades mecánicas de los concretos reciclados y así saber con certeza en que magnitud se degradan estas propiedades.

#### **3.3.1 Metodología aplicada**

Para el desarrollo de este trabajo se implementó una metodología que parte con un concreto de referencia (CR), este concreto se elaboró bajo condiciones controladas y tiene 2 propósitos, los cuales son; servir como parámetro con respecto a los otros concretos y ser triturado y procesado para obtener agregado grueso de concreto reciclado (AGCR) que sirva para la elaboración de nuevos concretos. Con la obtención de los agregados reciclados se elaboraron 3 concretos con porcentajes de sustitución del 25% y del 100%, este proceso se repitió 3 veces, dando así un total de 3 ciclos de reciclaje. Los objetos de estudio para esta investigación son las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, así como las propiedades de los concretos en estado fresco y en estado endurecido. Las pruebas realizadas a los agregados fueron la densidad, densidad aparente, absorción de agua, desgaste de los Ángeles y el índice de forma. Por su parte para los concretos se realizaron pruebas como el asentamiento y la densidad en estado fresco y la

resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción y la resistencia a la abrasión en estado endurecido. En la Figura 12 se puede observar el esquema metodológico que se siguió para el desarrollo de esta investigación.



**Figura 12. Metodología de los ciclos de reciclaje implementados en la investigación 3 para dos porcentajes diferentes de sustitución.**

Fuente: Elaboración propia con datos de Abreu et al., 2018.

### 3.3.2 Consideraciones

Se elaboraron un total de 7 mezclas de concreto; el concreto de referencia, 3 concretos con un porcentaje de sustitución del 25% (ciclo 1, ciclo 2 y ciclo 3) y 3 concretos con un porcentaje de sustitución del 100% (ciclo 1, ciclo 2 y ciclo 3). Para todos los concretos se utilizó un mismo diseño de mezcla, con una relación agua/cemento de 0.55.

La mezcla de referencia se realizó utilizando un método de diseño tradicional, sin aditivos ni adiciones minerales y se diseñó utilizando el método de Faury. El concreto elaborado con agregados reciclados (CAR) tuvo ajustes en su relación a/c para lograr buena trabajabilidad, estos ajustes se basaron en la adición de agua de compensación a la mezcla.

Para los concretos se utilizaron 2 tipos diferentes de agregados finos, que fueron arena silícea fina (0–2 mm) y arena silícea gruesa (0–4 mm), en cuanto al agregado grueso, se utilizaron 3 tipos diferentes; grava fina (4–8 mm), grava media (5,6–11,2 mm) y grava gruesa (11,2–22,4 mm). El agregado grueso fue sometido a diferentes pruebas para su clasificación, tanto el natural como el reciclado.

### 3.3.3 Composición de la mezcla

Con el fin de buscar un mejor entendimiento de la Tabla 13, proporciones de la mezcla, se tradujeron al español las siglas utilizadas y se presentan a continuación en la Tabla 12.

**Tabla 12. Lista de los términos utilizados en la investigación 3.**

Lista de siglas y/o abreviaturas	
CR:	Concreto de referencia
CAR:	Concreto elaborado con agregados reciclados (100%)
CAR (25%)	Concreto elaborado con agregados reciclados (25%)
AGN	Agregado grueso natural
AGCR	Agregado grueso de concreto reciclado

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 13 se pueden apreciar las proporciones utilizadas de cada material para todos los concretos, la unidad de medida que se maneja son los kg/m<sup>3</sup>. En las filas de la parte superior se encuentran los nombres del concreto de referencia, los concretos elaborados con agregados reciclados con una sustitución total de agregados reciclados, es decir el 100%, y los concretos elaborados con AGCR con una sustitución parcial del 25%. En las filas se encuentran la cantidad de agregados calizos, agregados reciclados, arena fina, arena gruesa, cemento, agua, agua de compensación y las relaciones agua/cemento (efectiva y aparente). Algunos de los datos más importantes que podemos encontrar en esta tabla es la cantidad de agua de compensación que se necesita para los CAR, evidentemente para los CAR100% el agua de compensación es mucho

mayor que para los CAR25%. Otro dato importante es que los CAR100% se alejan más de la relación a/c efectiva, llegando a valores que rondan entre 0.67 y 0.71, mientras que los CAR25% se mantienen cercanos a los valores de 0.55. Por último, cabe mencionar que las cantidades de agregados reciclados variaron ligeramente con respecto a cada ciclo de reciclaje, mientras que materiales como la arena, el cemento y el agua se mantuvieron constantes durante todos los ciclos.

**Tabla 13**

Composición de la mezcla

COMPONENTES	MASA DE LOS COMPONENTES (KG/M <sup>3</sup> )						
	CR	CAR1	CAR1(25%)	CAR2	CAR2(25%)	CAR3	CAR3(25%)
AGC (4-5.6 mm)	97.3	-	73.3	-	73.3	-	73.3
AGC (6-8 mm)	107.3	-	81.1	-	81.1	-	81.1
AGC (8-11.2 mm)	116.1	-	86.7	-	86.7	-	86.7
AGC (11.2-16 mm)	327.6	-	245.6	-	245.6	-	245.6
AGC (16-22.4 mm)	327.6	-	245.6	-	245.6	-	245.6
AGR (4-5.6 mm)	-	86.7	22.2	81.1	20	80	20
AGR (6-8 mm)	-	95.6	24.4	90	22.2	87.8	22.2
AGR (8-11.2 mm)	-	103.3	25.6	96.7	24.4	94.4	23.3
AGR (11.2-16 mm)	-	292.2	73.3	274.4	68.9	267.8	66.7
AGR (16-22.4 mm)	-	292.2	73.3	274.4	68.9	267.8	66.7
ARENA FINA	211	211	211	211	211	211	211
ARENA GRUESA	392	392	392	392	392	392	392
CEMENTO	350	350	350	350	350	350	350
AGUA	192.5	192.5	192.5	192.5	192.5	192.5	192.5
AGUA DE COMPENSACIÓN		40	10.1	48.9	12.2	55.6	13.3
RELACIÓN A/C EFECTIVA	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
RELACIÓN A/C APARENTE	0.55	0.67	0.58	0.69	0.59	0.71	0.59

Fuente: Abreu et al., 2018.

### 3.3.4 Resultados y discusión

#### 3.3.4.1 Propiedades de los agregados

Los datos de las pruebas realizadas al agregado grueso natural y al agregado grueso de concreto reciclado se pueden observar en la tabla 14. Los resultados fueron los esperados, ya que se pudo observar que el AGCR tiene una calidad más baja que el AGN, tal y como se aprecia en la Figura 13. La calidad disminuye a medida que aumenta el número de ciclos de reciclaje y esto se debe en mayor parte al incremento de la cantidad de mortero adherido al AGN con el número de ciclos de reciclaje. Sin embargo, de un ciclo a otro, este incremento de pasta de cemento parece hacerse menor, lo que permite establecer un umbral más allá del cual no va cada propiedad. Analizando estos valores mediante un modelo de regresión no lineal asintótica exponencial, fue posible identificar, con excelentes valores de correlación ( $R^2=1$ ) para casi todas las propiedades, una disminución asintótica de la calidad del AGCR que tendió a un valor final.



**Figura 13.**Morfología de los agregados. a-AGN, b-AGCR1, c-AGCR2 y d-AGCR3.

Fuente: Abreu et al., 2018.

Para las propiedades de densidad seca, densidad seca de superficie saturada (SSS), densidad aparente, absorción de agua y desgaste de los Ángeles los resultados sugieren una estabilización de cada propiedad a medida que aumentan los ciclos de reciclaje. Mientras que las propiedades del índice de forma y densidad aparente del material no presentaron una tendencia específica para sus valores.

De todas las propiedades estudiadas a los agregados, la densidad y absorción de agua poseen valores a la par con la literatura existente, con la excepción de Zhu et al, quienes agregaron cenizas volantes del primero al segundo ciclo de reciclaje, mejorando así su densidad. En cuanto a la absorción, se pudo observar que durante las primeras 24 horas, el AGCR presentó un mayor porcentaje de absorción en comparación con el AGN, el orden de absorción de mayor a menor fue el siguiente; AGCR3, AGCR2 y AGCR1, aunque los autores destacan que durante los primeros 30 minutos el AGCR1 absorbió agua más rápido que el AGCR2, y el AGCR2 absorbió agua más rápido que el AGCR3. Esto es debido a la longitud de los capilares del AGCR, que se vuelven más largos con cada ciclo de reciclaje, dificultando así la saturación total de los agregados.

**Tabla 14**

Propiedades del agregado grueso

Propiedad	AGN	AGR1	AGR2	AGR3	Valor final	R <sup>2</sup>
	2668.4	2668.1	2629.9	2672.2	-	-
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2593	2319.3	2175	2124.8	2065,4±22.5	0.99
	2621.3	2621.3	2348	2329.7	2291.7±33.7	0.99
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1355.1	1355.1	1034.4	990.1	955.7±1.2	1
Absorción de agua, 24h (%)	1.1	1.1	8	9.6	11.6±0.7	0.99
Desgaste de los Ángeles (%)	27.9	27.9	41.1	40.9	41.2±0.4	0.99
	17	17	19	18	-	-
Índice de forma (%)	20	20	-	-	-	-
	18	18	-	-	-	-

Fuente: Abreu et al., 2018.

### 3.3.4.2 Propiedades de los concretos

#### 3.3.4.2.1 Propiedades del concreto en estado fresco

Las propiedades de densidad y asentamiento del concreto en estado fresco se pueden ver en la Tabla 15. La trabajabilidad se fijó en  $125 \pm 15$  mm y los valores que se muestran en la tabla indican que todos estuvieron dentro del rango establecido. Por su parte, la densidad disminuyó con el aumento de los ciclos de reciclaje, esto se debió a que la densidad del concreto en estado fresco depende directamente de la densidad de sus elementos y como el AGCR tienen una menor densidad que el AGN, esto se ve reflejado en el concreto. Los resultados obtenidos fueron los esperados de acuerdo con otras investigaciones.

**Tabla 15**

Densidad y asentamiento de las mezclas de concreto

Concreto	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Asentamiento (mm)
CR	2413.8	124.5
CAR1	2319.3	126
CAR1 (25%)	2385.3	126
CAR2	2279.8	121
CAR2 (25%)	2383.8	119.5
CAR3	2264.8	128.5
CAR3 (25%)	2375.8	120

Fuente: Abreu et al., 2018.

#### 3.3.4.2.2 Propiedades del concreto en estado endurecido

##### Resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron a las edades de 7, 28 y 56 días de curado, para las mezclas con un porcentaje de sustitución de AGCR del 100%. Los resultados indican que la resistencia a la compresión disminuye de manera lineal para todas las edades y en todos los ciclos, en comparación con el concreto de referencia, tal y como se puede observar en la Tabla 16. Para los CAR 25%, en el ciclo 1 los valores incrementan para todas las edades, en el ciclo 2 incrementan a los 7 días, se mantienen igual a los 28 días y a los 56 días se reducen, mientras que para el ciclo 3 los valores reducen a los 7 y 56 días y se mantienen a los 28 días.

Estos incrementos y reducciones son muy leves en comparación con el concreto de referencia, por lo que se puede concluir que la resistencia a la compresión del CAR 25% es similar a la del CR ya que sólo se presentan ligeras variaciones que no afectan en el rendimiento del concreto.

**Tabla 16**

Resistencia a la compresión de los concretos

Concreto	7 días	$\Delta CR$ (%)	28 días	$\Delta CR$ (%)	56 días	$\Delta CR$ (%)
CR	46.2	-	55.9	-	63.8	-
CAR1	44	-4.8	54.1	-3.2	59	-7.5
CAR1 (25%)	47.6	3	59.7	6.8	65	1.9
CAR2	43.3	-6.3	53.3	-4.7	57.6	-9.7
CAR2 (25%)	47	1.7	55.9	0	60.7	-4.9
CAR3	40.3	-12.8	48.6	-13.1	56.2	-11.9
CAR3 (25%)	45.2	-2.1	55.9	0	62.7	-1.7

Fuente: Abreu et al., 2018.

### Resistencia a la tracción

De acuerdo a la Tabla 17 podemos observar que en la resistencia a la tracción para los concretos elaborados con agregados reciclados con un porcentaje del 100% de sustitución, hay una disminución marcada en el ciclo 1, aunque en los ciclos 2 y 3 la reducción es menor. En cuanto a los CAR 25% en el ciclo 1 la reducción es ligera, pero en los ciclos 2 y 3 se reduce considerablemente, especialmente en el tercer ciclo.

**Tabla 17**

Resistencia a la tracción de los concretos

Concreto	Resistencia a la tracción	$\Delta CR$ (%)
CR	4.2	-
CAR1	3.8	9.1
CAR1 (25%)	4	4.2
CAR2	3.7	11.4
CAR2 (25%)	3.7	11.4
CAR3	3.6	15.1
CAR3 (25%)	3.4	18.6

Fuente: Abreu et al., 2018.

### Resistencia a la abrasión

Los resultados de la resistencia a la abrasión por desgaste del disco Böhme se presentan en la Tabla 18, en donde podemos ver que esta propiedad disminuye con la incorporación de agregados reciclados en el concreto, es decir, se obtuvieron valores de desgaste más altos en el CAR que en el concreto de referencia. En mezclas con un índice de incorporación de agregados reciclados del 100%, se observa un aumento significativo en el desgaste por abrasión, pero parece estabilizarse después del primer ciclo de reciclaje. Para el CAR 25% el desgaste es menor en los primeros 2 ciclos, pero en el tercero los valores de desgaste se incrementan considerablemente.

**Tabla 18**

Desgaste por abrasión de los concretos

Concreto	Desgaste por abrasión (mm)	$\Delta$ CR (%)
CR	2.37	-
CAR1	2.99	26.16
CAR1 (25%)	2.7	13.92
CAR2	3	26.58
CAR2 (25%)	2.7	13.92
CAR3	3.01	27
CAR3 (25%)	3.05	28.69

Fuente: Abreu et al., 2018.

### Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad fue menor en el concreto elaborado con AGCR, proporcionalmente a la tasa de reemplazo de AGN con AGCR, como se ve en Tabla 19. Para las mezclas con un porcentaje de sustitución de agregados reciclados del 100%, hay una marcada disminución en el valor del módulo de elasticidad con respecto al CR, aunque en los ciclos 2 y 3 los valores sugieren la estabilización de la propiedad debido a estos disminuyen muy poco. Por su parte los CAR 25% presentan una reducción de la propiedad baja en el primer ciclo y en los ciclos 2 y 3 de igual forma parece mantenerse estable la propiedad.

**Tabla 19**

Módulo de elasticidad de los concretos

<b>Concreto</b>	<b>Módulo de elasticidad (Gpa)</b>	<b><math>\Delta</math>CR (%)</b>
CR	45.4	-
CAR1	34.5	24
CAR1 (25%)	41.2	9.2
CAR2	30.6	32.7
CAR2 (25%)	41	9.7
CAR3	30.7	32.3
CAR3 (25%)	39.5	13

Fuente: Abreu et al., 2018.

### **3.4 Evaluación de la durabilidad de tres generaciones de concreto elaborado con 100% de agregado grueso reciclado repetidamente.**

*(Pinghua Zhu, Yali Hao, Hui Liu, Da Wei, Shaofeng Liu, Lei Gu)*

*Titulo original: Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete.*

El presente trabajo aparece en el año 2019 y se desarrolla en el país de China, específicamente en la Universidad de Changzhou, por Pinghua Zhu y otros colaboradores. Estos investigadores observaron que los residuos de construcción y demolición producen afectaciones ambientales, sociales y económicas, por lo que una de las formas de ayudar con estos problemas es implementando actividades como el reciclaje, misma que conlleva a diversos beneficios, tales como el ataque a los problemas de contaminación y la producción de abundantes ganancias.

Zhu et al (2019) parten con un enfoque hacia el sector económico, detectando que a pesar de que se ha comprobado que los concretos elaborados con agregados reciclados pueden diseñarse para diversas aplicaciones con un buen nivel de seguridad y que, además es factible reutilizar los agregados reciclados de forma repetida para producir concreto estructural, en la actualidad existen pocos estudios sobre el comportamiento duradero de los ciclos de multi-reciclaje del concreto, lo que despertó su interés por el desarrollo de esta investigación e impulsó la propuesta de este trabajo, que tiene como objetivo el estudio de la durabilidad de tres generaciones de concreto elaborado con agregado grueso reciclado de manera repetida con un porcentaje de sustitución del 100%.

#### **3.4.1 Metodología aplicada**

Para llevar a cabo este proyecto inicialmente se determinó que se realizarían tres ciclos de reciclaje, obteniendo en el proceso 3 tipos de agregado grueso reciclado (AGR) y 3 tipos de concretos elaborados con agregados reciclados (CAR), también se determinó utilizar en las pruebas agregado grueso natural (AGN) y elaborar un concreto con agregados naturales (CAN) para que sirvan como punto de comparación con los materiales reciclados.

En la Figura 14 se presenta el diagrama metodológico con las actividades que se realizaron para el desarrollo de esta investigación. Lo que se puede observar es que primero se obtuvo el AGN y con estos se elaboraron los primeros concretos naturales. Posteriormente se obtuvo el agregado reciclado de primera generación (AGR1), aunque hay que mencionar que el AGR de 1ª generación se compró, no se fabricó, después con este agregado se elaboró el concreto reciclado de primera 1ª generación (CAR1), mismo que luego se trituró para obtener AGR de 2ª generación (AGR2). Con el AGR2 se produjo concreto reciclado de 2ª generación (CAR2) y nuevamente se realizó un proceso de trituración, pero ahora con el CAR2, obteniendo así AGR de 3ª generación (AGR3). Finalmente, con el AGR3 se elaboraron las últimas muestras de concreto reciclado, que en este caso fueron las de 3ª generación (CAR3). Con el objetivo de entender el diagrama metodológico y otras tablas o figuras con mayor facilidad se puede consultar la Tabla 20, que contiene las siglas utilizadas en esta investigación.

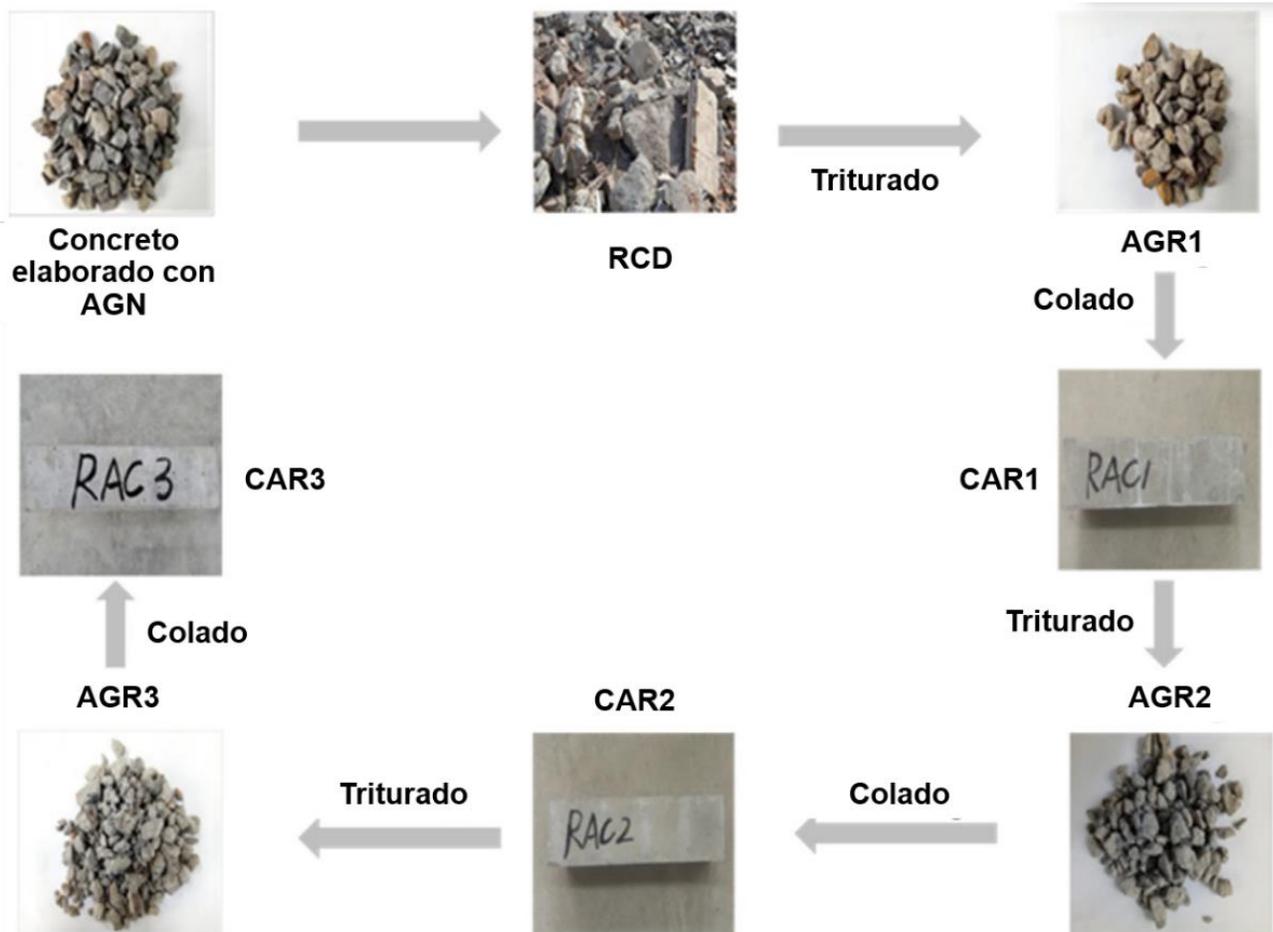
**Tabla 20. Lista de los términos utilizados en la investigación 4.**

Lista de siglas y/o abreviaturas	
AGN	Agregado grueso natural
AGR1	Agregado grueso reciclado 1ª generación
AGR2	Agregado grueso reciclado 2ª generación
AGR3	Agregado grueso reciclado 3ª generación
CAN	Concreto elaborado con AGN
CR1	Concreto elaborado con AGR de 1ª generación
CR2	Concreto elaborado con AGR de 2ª generación
CR3	Concreto elaborado con AGR de 3ª generación
CV	Cenizas volantes
HS	Humo de sílice
AP	Ácido policarboxílico
FP	Fibras de polipropileno
AA	Agua adicional

Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas físicas realizadas a los agregados naturales y reciclados fueron la densidad aparente, la absorción de agua, el índice de trituración y el contenido de mortero adherido, además también se realizó una prueba de morfología microscópica con imágenes ópticas y microscopía electrónica de barrido. Por su parte, para los concretos naturales y reciclados se realizaron

pruebas mecánicas como la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción, así como pruebas de durabilidad como la resistencia al hielo-deshielo, la resistencia a la penetración de cloruros y la resistencia a la carbonatación.



**Figura 14. Diagrama metodológico de tres generaciones de concreto elaborado con agregado grueso reciclado empleado en la investigación 4.**

Fuente: Zhu et al., 2019.

### 3.4.2 Consideraciones

Los agregados reciclados de primera generación se compraron con la empresa de construcción Changzhou, por lo que los RCD que se utilizaron como materia prima podrían presentar diversas variables que no fueron consideradas para esta investigación. La segunda y tercera generación de agregado grueso reciclado se preparó en el laboratorio, con base en el principio de igual

profundidad de carbonización. Todos los agregados fueron triturados y tamizados para eliminar la diferencia en la distribución de tamaños entre las mezclas de CAR en cada ciclo.

Se utilizaron diversos materiales a parte de los tradicionales para la elaboración del concreto (Cemento, grava, arena y agua), tales como escoria, cenizas volantes (CV) y humo de sílice (HS). También se utilizaron polímeros de ácido policarboxílico (AP) y fibras de polipropileno (FP), como superplastificante y agente de refuerzo respectivamente, además se consideró una cantidad de agua adicional (AA) para los concretos reciclados de acuerdo a las necesidades de cada ciclo.

El cemento que se usó fue el Cemento Portland (PO 52.5R), los tamaños de agregado grueso utilizados para las mezclas fueron de 4,75–26,5 mm, tanto para AGN como para AGR, se utilizó arena de río natural como agregado fino para preparar tanto el CAN como el CAR. El agua utilizada fue la recomendada por la normativa, en cuanto a los otros materiales no se especificaron marcas o alguna información referente a ellos.

Las mezclas se colocaron en dos tipos de moldes, el primero con dimensiones de 100mm x100 mm x 100mm para medir la resistencia a la compresión y la resistencia a la penetración de iones de cloruro y el segundo con dimensiones de 100 mm x 100mm x 400 mm para probar la resistencia a la congelación-descongelación y la resistencia a la carbonatación. Todos los especímenes se retiraron de los moldes después de 24 h y se colocaron en una sala de curado estándar ( $20 \pm 3$  °C, HR > 90 %) hasta una edad de 28 días. Luego de eso, los especímenes de CAR fueron sometidos a carbonatación acelerada por 17 días.

La resistencia objetivo de todos los concretos se definió como C40, lo que es equivalente a 40 MPa a los 28 días de curado. Las normas que se siguieron para el desarrollo de las pruebas fueron los estándares chinos GB/T.

### **3.4.3 Composición de la mezcla**

Las proporciones utilizadas en las mezclas, tanto del concreto elaborado con agregados naturales, como del concreto elaborado con agregados reciclados se pueden observar en la Tabla 21. De acuerdo a los datos que se encuentran en la tabla mencionada anteriormente se puede identificar que, para varios materiales como el cemento, la escoria, las cenizas volantes, el agua,

el humo de sílice, el ácido de policarboxílico y las fibras de policarbonato los valores se mantuvieron constantes independientemente de la mezcla que se haya elaborado. Por otro lado, las cantidades de material del agregado fino (arena) si tuvieron variaciones, para el CAN se utilizaron 776 kg/m<sup>3</sup>, mientras que, para el CAR1, CAR2 y CAR3 se utilizaron 795, 881 y 904 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Otros materiales con los que las cantidades fueron diferentes fueron el AGR y el agua adicional, ya que los valores presentaron diferencias en los 3 ciclos de reciclaje. Finalmente, el agregado grueso natural, como se había comentado previamente, sólo se utilizó para elaborar el CAN.

**Tabla 21**

Proporciones de la mezcla del concreto natural y los concretos reciclados.

Concreto	Las proporciones están en kg/m <sup>3</sup>										
	Cemento	Escoria	CV	Agua	HS	AA	Arena	AGN	AGR	AP	FP
CAN	270	41	83	185.7	21	0	776	946	-	7.42	0.41
CAR1	270	41	83	185.7	21	39.1	795	-	871	7.42	0.41
CAR2	270	41	83	185.7	21	39.3	881	-	757	7.42	0.41
CAR3	270	41	83	185.7	21	22.5	904	-	682	7.42	0.41

Fuente: Zhu et al., 2019.

### 3.4.4 Resultados y discusión

#### 3.4.4.1 Propiedades de los agregados

##### Propiedades físicas del agregado grueso

Las propiedades físicas del agregado grueso natural y reciclado se enumeran en la tabla 22, en la que podemos ver el tipo de agregado en la primera columna y las propiedades analizadas en las otras columnas. Las propiedades estudiadas fueron la densidad aparente, la absorción de agua a los 30 minutos y a las 24 horas, el índice de trituración y el contenido de mortero adjunto.

Como era de esperarse la calidad de las tres generaciones de agregados reciclados es inferior a los agregados naturales y esto se debe principalmente a la cantidad de mortero adherido al AGR. En la última columna se presentan las cantidades de mortero adherido, que son de 40.3% para el AGR1, 45.8% para el AGR2 y 55.4% para el AGR3, una tendencia creciente con cada ciclo.

Se ha establecido que la absorción de los agregados reciclados incrementa con el aumento de los ciclos de reciclaje, sin embargo, la absorción durante los primeros 30 minutos del agregado grueso reciclado de tercera generación es menor a la del agregado grueso reciclado de segunda generación, esto puede atribuirse a que los capilares del AGR3 tienen una mayor longitud, dificultando así que los agregados se saturen completamente en los primeros 30 minutos, aunque después de 24 horas el AGR3 incrementa su porcentaje de absorción considerablemente, convirtiéndose en el agregado que absorbe la mayor cantidad de agua, lo que significa que con el aumento del tiempo los agregados eventualmente se saturarán.

**Tabla 22**

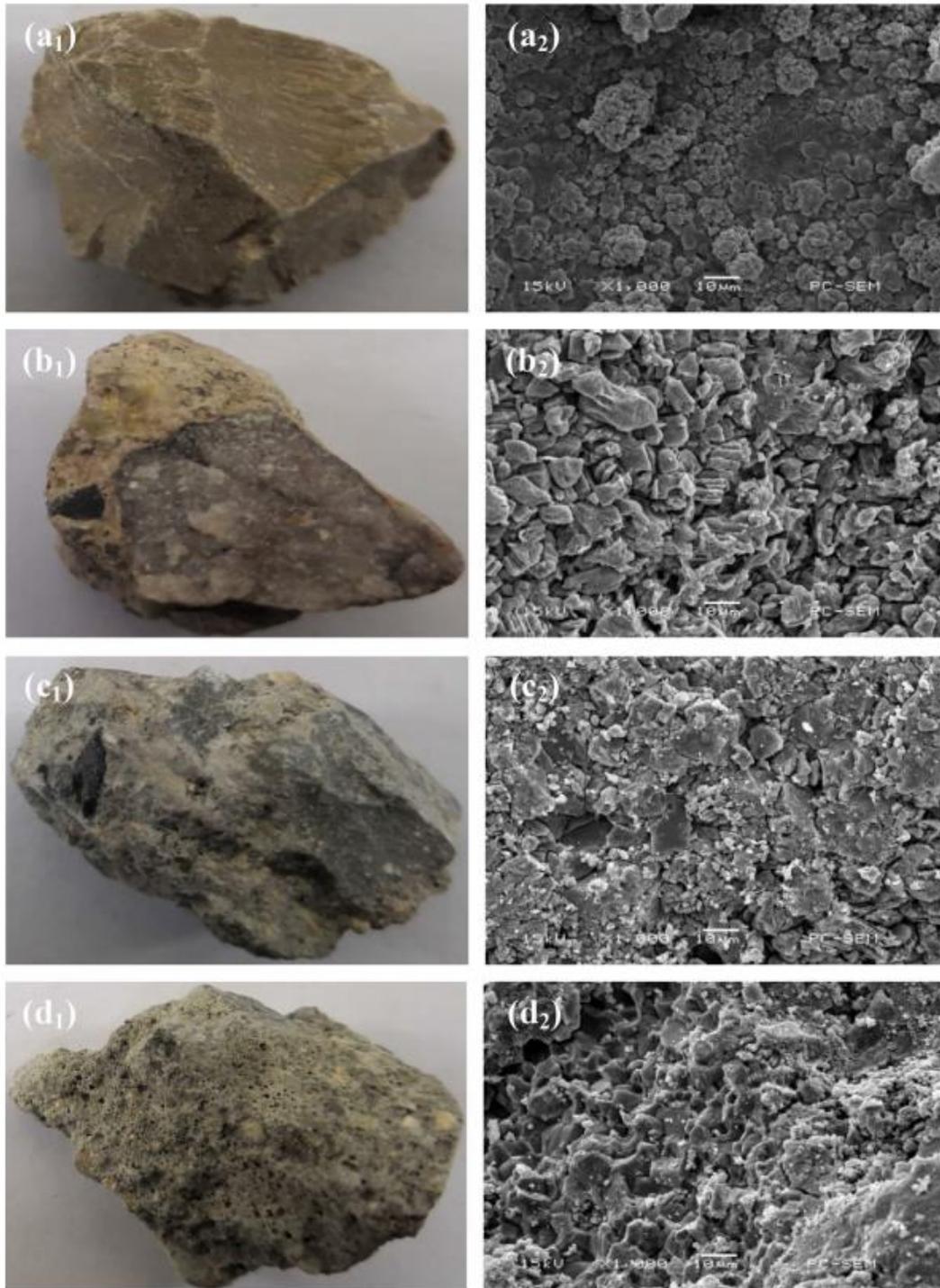
Propiedades físicas del agregado grueso.

Tipo de agregado grueso	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción de agua en 30 min (24 h) (%)	Índice de trituración (%)	Contenido de mortero adjunto (%)
AGN	2703	1.5 (1.8)	5.3	-
AGR1	2545	4.5 (4.9)	16.4	40.3
AGR2	2448	5.2 (5.8)	17.3	45.8
AGR3	2274	3.3 (6.1)	19.1	55.4

Fuente: Zhu et al., 2019.

### **Morfología microscópica del AGR**

En la Figura 15 se presentan las imágenes ópticas y las imágenes de la microscopía electrónica de barrido (MEB) del agregado natural y las tres generaciones del agregado grueso reciclado. Se observó que la superficie del AGN era lisa y sin poros, mientras que la superficie del AGR era más irregular, tenía más poros y muchas secciones de fractura mecánica. Las grietas y otros daños en el AGR aumentaron significativamente con el número de ciclos de reciclaje. Los microporos y las microfisuras en la superficie del AGR3 se expandieron gradualmente, dando lugar a una estructura áspera, suelta y porosa, lo que resulta en una mayor longitud de los capilares en el AGR3.



**Figura 15. Imágenes ópticas (1) e imágenes de la microscopía electrónica de barrido (2). a-AGN, b-AGR1, c-AGR2 y d-AGR3.**

Fuente: Zhu et al., 2019.

### 3.4.4.2 Propiedades de los concretos

#### 3.4.4.2.1 Propiedades mecánicas

##### Resistencia a la compresión y resistencia a la tracción.

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión a todos los concretos únicamente a la edad de 28 días, los resultados se pueden apreciar en la Figura 16.

Los datos indican que las propiedades mecánicas de los concretos elaborados con agregados reciclados siempre se degradan, y esa degradación aumenta conforme se realizan más ciclos de reciclaje. Los resultados de este estudio confirman esta información, ya que a pesar de que todos los concretos alcanzaron la resistencia objetivo de 40 MPa a los 28 días, se puede ver una degradación desde el primer concreto reciclado hasta el último. El CAN fue el concreto que obtuvo la resistencia más alta. La razón de la atenuación del rendimiento mecánico del CAR se debe principalmente al aumento del contenido de mortero adherido al AGR conforme ocurren más ciclos de reciclaje.

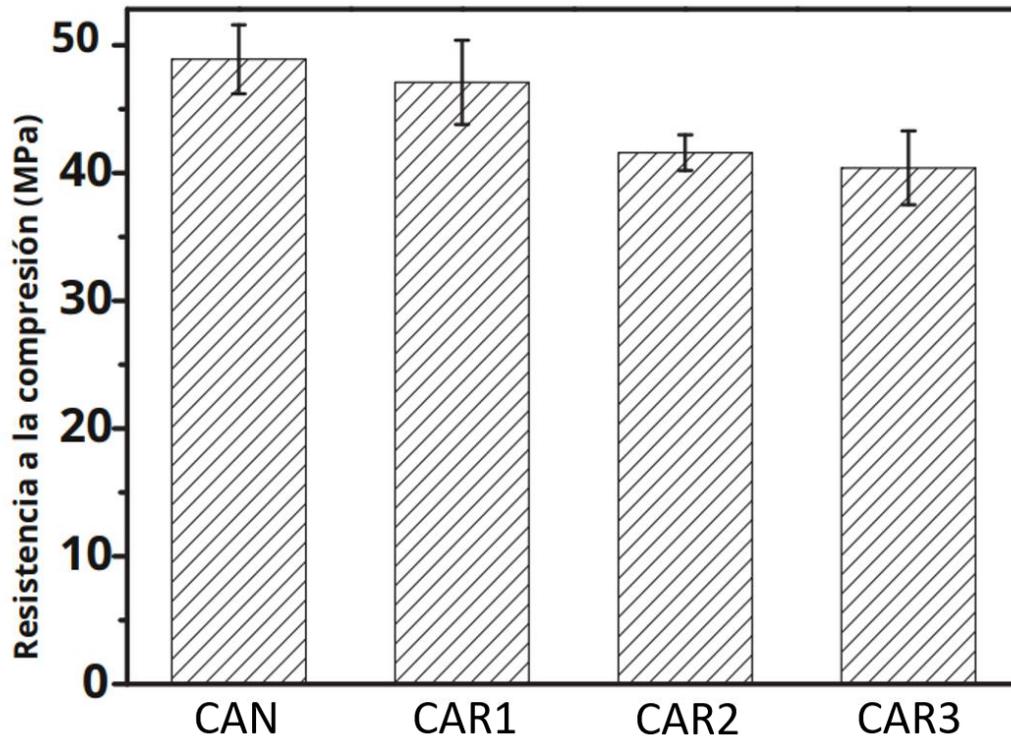


Figura 16. Resistencia a la compresión de los concretos.

Fuente: Zhu et al., 2019.

Los resultados de la resistencia a la tracción por hendimiento se presentan en la Figura 17, en la cual se puede observar que el concreto elaborado con agregados naturales fue el que tuvo una mayor resistencia y nuevamente conforme transcurrían los ciclos de reciclaje, los valores fueron reduciendo para los concretos elaborados con agregado grueso reciclado.

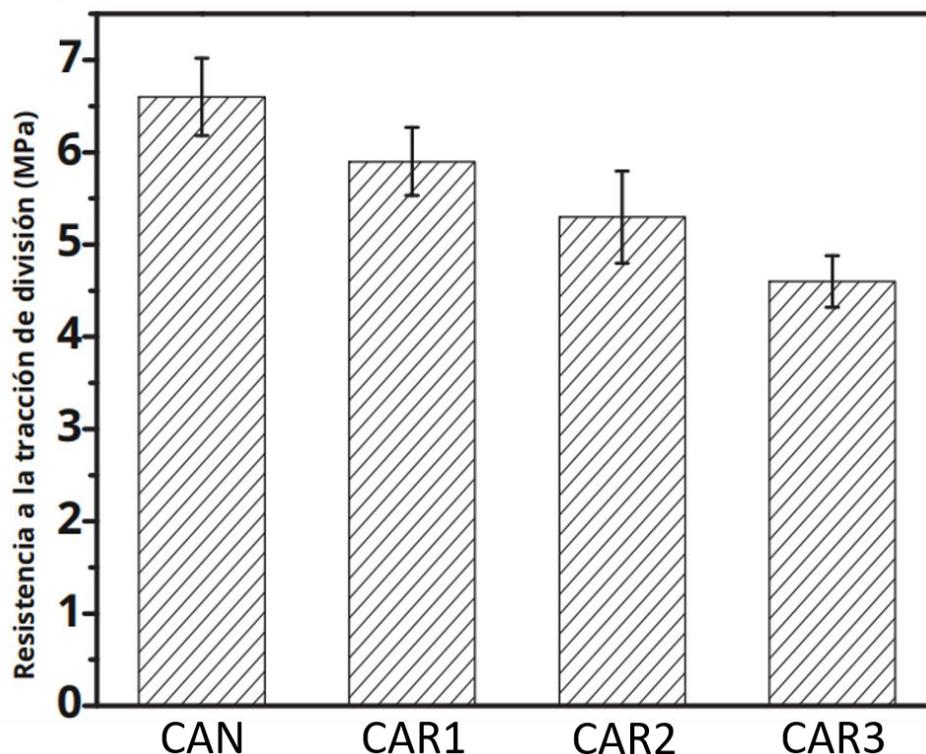


Figura 17. Resistencia a la tracción por hendimiento.

Fuente: Zhu et al., 2019.

#### 3.4.4.2.2 Propiedades de durabilidad

##### Resistencia al hielo-deshielo

La resistencia al hielo-deshielo se evaluó mediante el método de congelación rápida y los resultados se pueden ver en las Figuras 18 y 19. La Figura 18 muestra la variación en el módulo de elasticidad dinámica relativa (MEDR) y la tasa de pérdida de masa (TPM) del CAN y los CAR durante los experimentos de congelación y descongelación. Es claro que el MEDR disminuyó ligeramente con el aumento del número de ciclos de congelación y descongelación. El MEDR del CAN fue superior al 65.9% después de estar expuesto a 800 ciclos de congelación y descongelación, que es mucho más alto que el criterio de fallo de la norma ASTM C666

(alrededor del 60% del valor inicial). Por el contrario, el módulo de elasticidad dinámica relativa del CAR3 sólo pudo resistir 600 ciclos de congelación-descongelación y esto es debido a las microfisuras mecánicas en el AGR repetido.

La Figura 19 muestra las imágenes de la microscopía electrónica de barrido de los especímenes del CAR1 y CAR2 después de un número variable de ciclos de congelación-descongelación. En estas imágenes se puede observar que las estructuras internas del CAR1 y CAR2 eran relativamente compactas, con solo unos pocos microporos y grietas, en el período temprano de congelación-descongelación (100 ciclos de congelación-descongelación). Después de 400 ciclos de hielo-deshielo, la adherencia entre los agregados y el mortero en los CAR1 y CAR2 fue un poco más flexible, y la zona de transición interfacial (ZTI) comenzó a parecer indistinta. Además, apareció una gran cantidad de microfisuras y poros. Cuando los especímenes fallaron en el período tardío de congelación-descongelación (800 ciclos), no hubo un límite evidente en la ZTI del concreto, lo que demuestra que se había formado un concreto suelto y poroso.

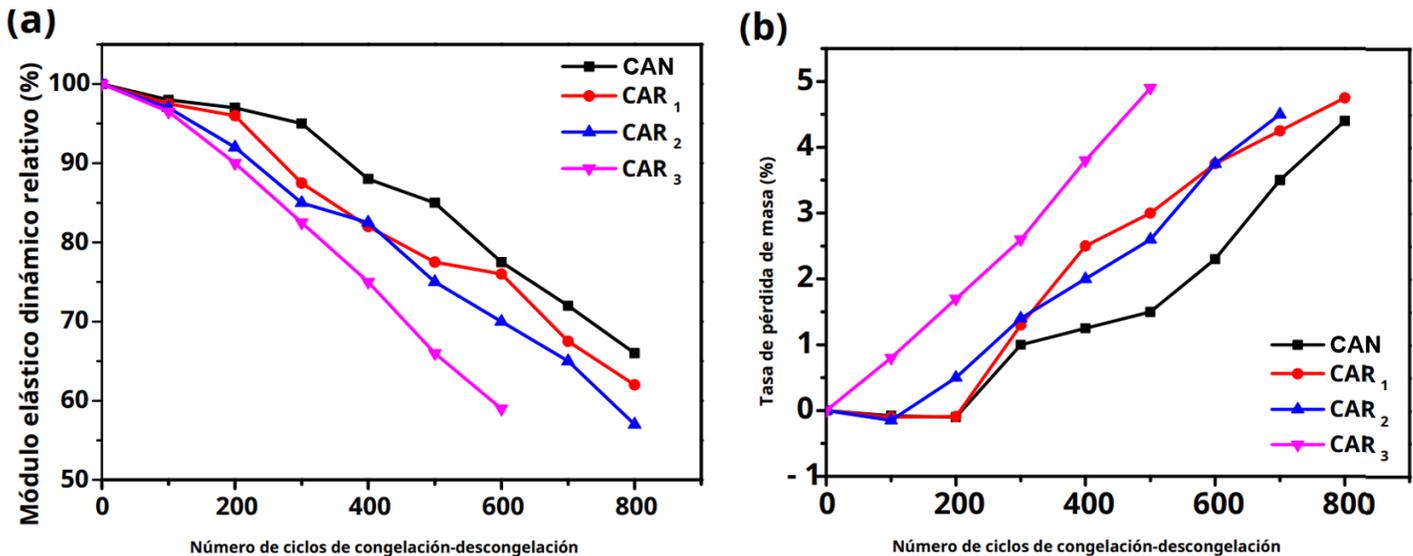
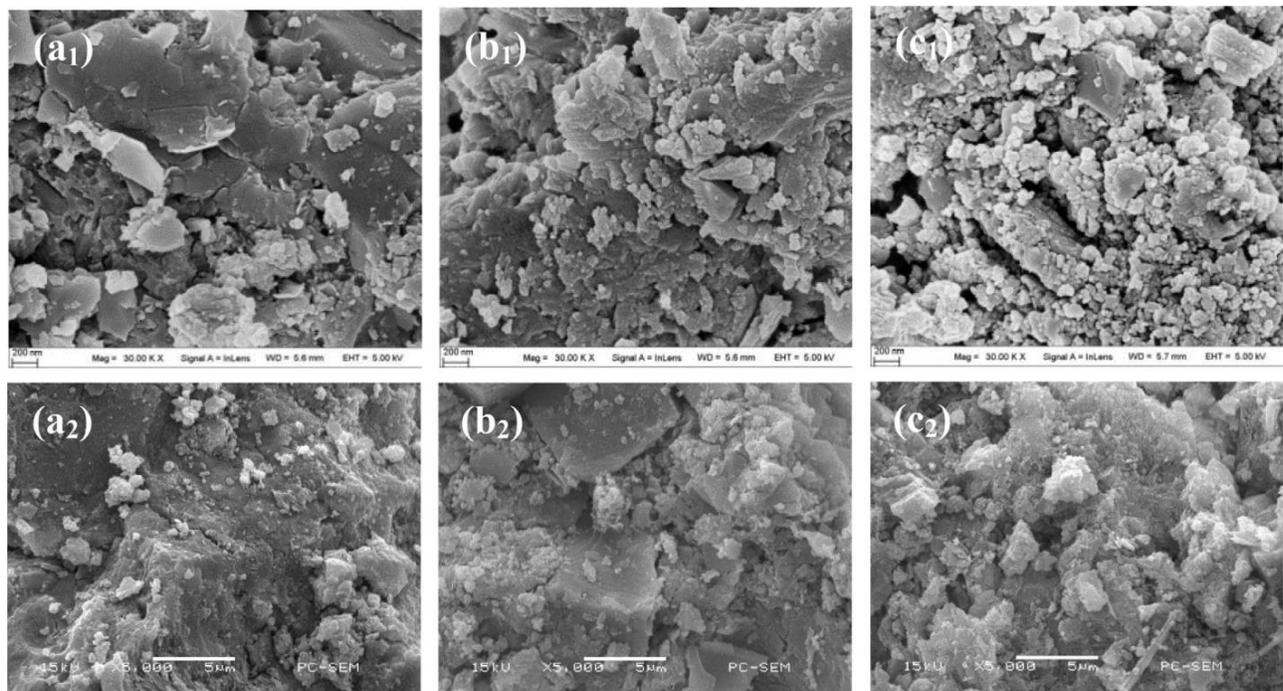


Figura 18. Módulo de elasticidad dinámica relativa (a) y tasa de pérdida de masa (b) del CAN y los CAR después de ciclos de congelación-descongelación.

Fuente: Zhu et al., 2019.



**Figura 19. Imágenes de la MEB del CAR1 y CAR2 después de diferentes números de ciclos de congelación-descongelación: (a) 100 ciclos; (b) 400 ciclos y (c) 800 ciclos.**

Fuente: Zhu et al., 2019.

### **Resistencia a la penetración de cloruros**

La resistencia a la penetración de cloruros se evaluó mediante el método de flujo eléctrico y los datos obtenidos se muestran en la Tabla 23. Los resultados indican que la carga total que pasa a través del concreto aumenta con el incremento de los ciclos de reciclaje. De acuerdo a la norma ASTM C1202, para evaluar la permeabilidad de iones cloruro al concreto, se presentan los siguientes niveles; un nivel inferior cae en el rango de 1000-2000 C, un nivel medio entra en el rango de 2000-4000 C y un nivel alto entra en el rango de >4000 C, en este caso el CAN fue el único concreto en entrar en el rango inferior y los CAR se ubicaron dentro del rango medio, incluso el CAR3 que fue el que obtuvo el valor más alto con 3300 C, lo que los mantiene en un rango aceptable para ser utilizados en elementos estructurales.

**Tabla 23**

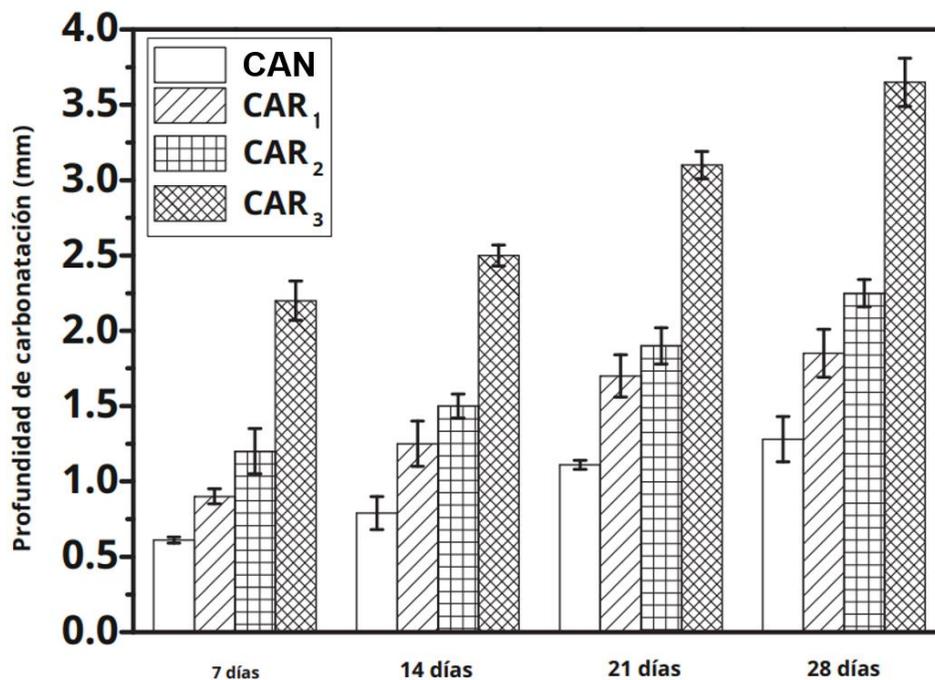
Flujo eléctrico y coeficientes de permeabilidad al ion cloruro del CAN y los CAR a los 28 días.

Concreto	Flujo eléctrico (C)	Coefficiente de permeabilidad al CL ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )
CAN	1537	1.014
CAR1	2354	1.416
CAR2	2769	1.62
CAR3	3300	1.875

Fuente: Zhu et al., 2019.

### Resistencia a la carbonatación

Las pruebas de resistencia a la carbonatación se evaluaron mediante el método de carbonatación rápida y los resultados se presentan en la Figura 20. La carbonatación del concreto es un proceso fisicoquímico en el que se producen una serie de reacciones químicas en presencia de  $\text{CO}_2$ , resultando en una reducción del pH en el concreto.



**Figura 20. Profundidades de carbonatación del CAN y los CAR con diferentes tiempos de carbonatación.**

Fuente: Zhu et al., 2019.

De acuerdo a la gráfica presentada se puede ver que la velocidad de carbonatación de los CAR es ligeramente más rápida que la del CAN, esto debido a que los CAR tienen una mayor porosidad, lo que facilita la entrada de  $\text{CO}_2$  en el concreto. Además, la profundidad de carbonatación del CAR también aumentó con el incremento del número de ciclos de reciclaje del AGR, por lo que si los concretos reciclados se comparan con el concreto natural los datos indican que el CAR1 aumentó un 62%, el CAR2 un 97% y el CAR3 un 185%. Estos resultados se le atribuyen al aumento del contenido de mortero adherido al AGR, lo que deriva en una mayor porosidad y una mayor cantidad de microfisuras.

### **3.5 Macro y micro propiedades del concreto elaborado con agregados multi-reciclados.**

*(Thomas, C.; de Brito, J.; Cimentada, A.; Sainz-Aja, J.A.)*

*Título original: Macro- and micro- properties of multi-recycled aggregate concrete.*

En esta investigación, (Thomas et al, 2020), plantean un futuro escenario en donde todo el concreto utilizado sea concreto elaborado con agregados reciclados, por lo que en algún momento sería necesario reciclar el concreto reciclado, acción que derivaría en el inicio de los ciclos de reciclaje y en la utilización de los agregados multi-reciclados. De acuerdo a esto y al conocimiento existente sobre la pérdida de propiedades del concreto elaborado con agregados reciclados surge la siguiente pregunta: ¿Cuántas veces es posible reciclar el concreto?

Para responder a la pregunta anterior, este grupo de investigadores desarrolla una metodología que parte con la elaboración de un concreto de origen, que después es utilizado para obtener agregados reciclados y realizar un total de 3 ciclos de reciclaje, además de que implementan una técnica innovadora que recae en el uso del microtomógrafo computarizado, que les permite evaluar características como la porosidad cerrada, el volumen de la fracción de agregado calizo y el volumen de mortero de los agregados multi-reciclados.

#### **3.5.1 Metodología aplicada**

El desarrollo metodológico inicia con la elaboración de un concreto de origen (CO) elaborado con agregado grueso y fino de piedra caliza utilizado comúnmente, después el CO es triturado y procesado, obteniendo de esta forma agregado grueso reciclado (AR) y dando inicio a los ciclos de reciclaje. El agregado grueso reciclado o simplemente agregado reciclado, por motivos de la presente investigación recibe el nombre de AR de 1era generación (AR1). El AR1 obtenido del concreto de origen es utilizado para preparar el primer concreto elaborado con agregados reciclados (CAR), en este caso los autores le denominan CAR de 1era generación (CAR1), a su vez el CAR1 es triturado y se repite nuevamente el proceso, obteniendo ahora AR de 2da generación (AR2) que son utilizados para elaborar CAR de 2da generación (CAR2). Finalmente, se realiza un nuevo procedimiento de triturado con el CAR2 para obtener AR de 3era generación (AR3) y después utilizarlos para elaborar CAR de 3era generación (CAR3), que en este caso es el último ciclo, culminando así con los 3 ciclos de reciclaje.

Es importante mencionar que se manejaron dos porcentajes de sustitución de AR, que son del 25% y del 100%, dando un total de 7 mezclas de concreto para estudiar; el concreto de origen, 3 concretos elaborados con AR con una sustitución del 25% y 3 concretos elaborados con AR con una sustitución del 100%, todo este proceso se puede observar en la Figura 21 que se presenta a continuación.

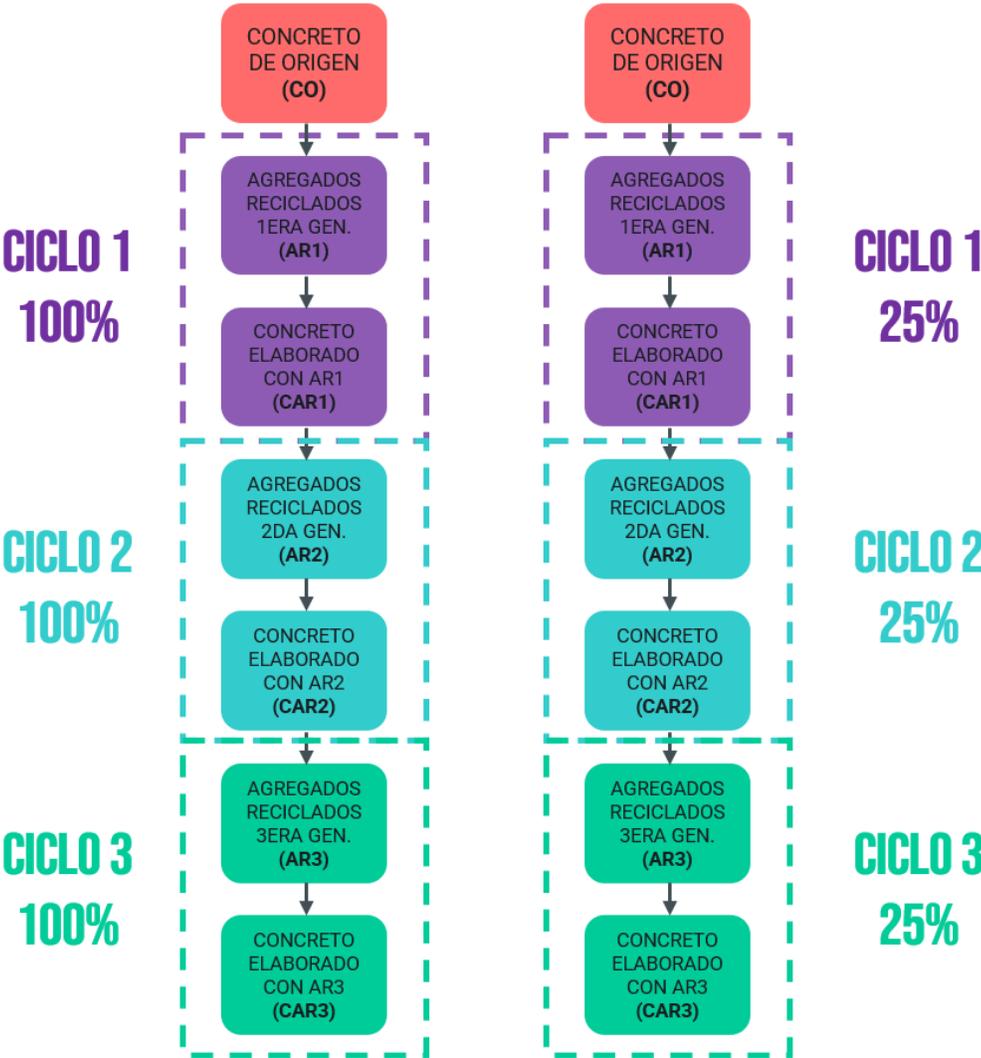


Figura 21. Diagrama metodológico de la investigación 5.

Fuente: Elaboración propia con datos de Thomas et al., 2020.

### 3.5.2 Consideraciones

Además de los 2 porcentajes de sustitución mencionados previamente, existen algunos factores que se tienen que considerar, tales como el diseño de la mezcla, que tenía una relación agua/cemento de 0.55 y que se empleó para todos los concretos, es decir, para el concreto de origen y para los concretos reciclados, otro aspecto a considerar es el revenimiento, que en este caso fue de  $12 \pm 1$  cm. Se utilizó cemento portland tipo I y el único material reciclado que se empleó para las mezclas de concreto fue el agregado grueso. Las muestras de concreto se obtuvieron en especímenes cilíndricos estándar de 15cm x 30cm. Se consideró una cantidad variable de agua de compensación para los concretos elaborados con agregados reciclados.

### 3.5.3 Proporciones de la mezcla

Las proporciones de la mezcla utilizadas se pueden observar en la Tabla 25, la cual incluye los datos del cemento, agua efectiva, agua de compensación, fracción caliza del agregado y la cantidad de agregados reciclados utilizada para los concretos elaborados con AR con un porcentaje de sustitución del 100% y del 25%, para el caso de los CAR, la tabla muestra los 3 ciclos de reciclaje que se manejan en esta investigación para cada porcentaje.

Con el fin de buscar un mejor entendimiento de la Tabla 25, proporciones de la mezcla, se tradujeron al español las siglas utilizadas y se presentan a continuación en la Tabla 24.

**Tabla 24. Lista de los términos utilizados en la investigación 5.**

Lista de siglas y/o abreviaturas	
CO:	Concreto de origen
AR:	Agregados reciclados
CAR:	Concreto elaborado con agregados reciclados
n:	Número del ciclo de reciclaje
FCA:	Fracción caliza del agregado

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 25**

Proporciones de la mezcla

Concreto	Los datos están en kg/m <sup>3</sup>						
	Concreto de origen	CAR (100% de sustitución)			CAR (25% de sustitución)		
		n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3
Cemento	350	350	350	350	350	350	350
Agua efectiva	193	193	193	193	193	193	193
Agua de compensación	-	10	12	13	40	48	55
Arena (0-2 mm)	732	732	732	732	732	732	732
AGN (4-5.6 mm)	97	-	-	-	72	72	72
AGN (5.6-8 mm)	107	-	-	-	80	80	80
AGN (8-11.2 mm)	116	-	-	-	87	87	87
AGN (11.2-16 mm)	327	-	-	-	245	245	245
AGN (16-24.4 mm)	327	-	-	-	245	245	245
ARn (4-5.6 mm)	-	86	81	79	21	20	72
ARn (5.6-8 mm)		95	89	87	24	22	80
ARn (8-11.2 mm)		103	97	94	25	24	87
ARn (11.2-16 mm)		293	274	267	73	68	245
ARn (16-24.4 mm)		292	274	267	73	68	245
Relación A/C efectiva	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Relación A/C aparente	0.55	0.67	0.69	0.71	0.58	0.59	0.59

Fuente: Thomas et al., 2020

En la tabla 25: “proporciones de la mezcla”, se pueden observar algunos datos interesantes, empezando con materiales como el cemento, el agua efectiva y la arena, ya que las cantidades de material utilizadas se mantienen constantes para todos los concretos, desde el concreto de origen hasta el concreto del último ciclo de reciclaje, sin importar el porcentaje de sustitución de AR. Las cantidades utilizadas son de 350 kg/m<sup>3</sup> para el cemento, 193 kg/m<sup>3</sup> para el agua efectiva y 732 kg/m<sup>3</sup> para la arena. Otro dato que hay que señalar es la cantidad de agua de compensación necesaria para los concretos reciclados, que como era de esperarse, incrementa conforme avanzan los ciclos de reciclaje, sin embargo, para los CAR con porcentaje de sustitución del 25% el incremento es mucho mayor que para los CAR con porcentaje de sustitución del 100%. En cuanto al agregado grueso, tenemos al agregado grueso natural (AGN) y a los agregados reciclados, estos se dividieron en 5 fracciones de tamaño, que fueron de 4-5.6mm, 5.6-8mm, 8-11.2mm, 11.2-16mm y 16-24.4mm. Las cantidades de AGN se

mantuvieron constantes durante todos los ciclos de reciclaje para los CAR con 25% de sustitución, por el contrario, con los agregados reciclados las cantidades variaban dependiendo del ciclo de reciclaje. Para la mezcla de agregados se utilizó el método de diseño de Faury y según Thomas et al (2020) en cada uno de los procesos de trituración se ha observado una reducción en el tiempo y energía invertida en el proceso.

Como se mencionó anteriormente, la relación a/c efectiva o inicial es de 0.55 y es constante para todos los concretos, no obstante, en la tabla se incluyó una relación a/c aparente, la cual muestra que para los CAR100% conforme avanzan los ciclos los valores incrementan considerablemente y presentan una tendencia de subida conforme avanzan los ciclos de reciclaje, por otro lado, para los CAR25% la relación a/c aparente muestra que durante el primer ciclo se presenta un ligero incremento y la tendencia durante los ciclos posteriores es de mantenerse en el mismo valor.

### **3.5.4 Resultados y discusión**

#### **3.5.4.1 Propiedades de los concretos**

En la tabla 26 se presentan las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de concreto que se estudiaron en esta investigación. Las propiedades que se encuentran en la tabla son la gravedad específica Bulk (GEB), también conocida como densidad relativa, la gravedad específica Bulk para agregados saturados superficialmente secos GEB(SSS), la gravedad específica aparente (GEA), la porosidad abierta (PA), el coeficiente de absorción (CA) y la resistencia a la compresión (RC).

De acuerdo a los datos presentados podemos observar que la GEB y GEB(SSS) tiende a presentar un decremento durante los ciclos de reciclaje 1 y 2, pero en el ciclo tres ocurre un incremento ligero para los dos porcentajes de sustitución. En cuanto a la porosidad abierta y el coeficiente de absorción conforme avanzan los ciclos de los CAR100% los valores incrementan, especialmente en los ciclos 2 y 3, mientras que para los CAR25% los valores se mantienen muy similares y cercanos a los del concreto de origen. Por su parte la resistencia a la compresión presenta una reducción constante para los CAR100% pero para los CAR25% durante el primer ciclo se puede apreciar una resistencia mayor con respecto al concreto de origen y en los ciclos posteriores los valores se reducen, pero en menor medida.

**Tabla 26**

Propiedades físicas y mecánicas del concreto de origen y los CAR.

Concreto	Gravedad específica Bulk	Gravedad específica Bulk (SSS)	Gravedad específica aparente	Porosidad abierta (% vol.)	Coefficiente de absorción (% agua)	Resistencia a la compresión (MPa)
Concreto de origen	2.3	2.63	2.56	12.47	5.42	55.88
CAR1 (100%)	2.16	2.59	2.53	16.81	7.78	54.21
CAR2 (100%)	2.05	2.59	2.54	20.57	10.01	53.29
CAR3 (100%)	2.08	2.64	2.46	20.97	10.05	48.65
CAR1 (25%)	2.27	2.62	2.67	13.48	5.93	59.74
CAR2 (25%)	2.25	2.6	2.58	13.41	5.94	55.77
CAR3 (25%)	2.28	2.64	2.59	13.61	5.96	55.89

Fuente: Thomas et al., 2020

---

**CAPÍTULO 4**  
**RESULTADOS Y**  
**ANÁLISIS**

---

## 4.1 Resultados

Después de analizar toda la información referente a los ciclos de reciclaje, en donde se hizo un estudio desde lo general hasta lo particular, es importante delimitar, organizar y unificar toda la información recopilada, haciendo un breve resumen de las generalidades, así como un análisis comparativo con los datos de cada una de las propiedades estudiadas, tanto de los agregados como de los concretos elaborados con material reciclado.

Tomando en cuenta que durante el desarrollo de la investigación documental los autores utilizaron diferentes términos y unidades de medida (UM) para referirse a todo lo relacionado con esta temática, es fundamental indicar cuáles serán las bases para unificar toda esta información durante el presente capítulo.

Con respecto a lo anterior, se implementaron un par de estrategias para evitar la diversidad de términos y unidades de medida. Una de las estrategias fue la unificación de las palabras, siglas y abreviaturas más utilizadas, de este modo cada uno de los conceptos que se repiten en las investigaciones recibirán el mismo término durante esta sección, independientemente de cómo se hayan manejado en su investigación original, esto con el objetivo de prevenir confusiones al momento de evaluar las propiedades. Es importante mencionar que cambiar el nombre de un término no modificará sus datos, simplemente es con fines prácticos para un mejor análisis. Para unificar estos términos se desarrolló un glosario con los conceptos más utilizados, el cual podemos ver en la Tabla 27. En cuanto a las unidades de medida, se determinó utilizar las mismas UM según la propiedad estudiada, lo que significa que en caso de requerirlo se realizarán conversiones o cambios de magnitud. De igual forma esto no alterará los resultados obtenidos.

**Tabla 27. Glosario de términos utilizados en el Capítulo 4.**

Glosario	
AGN	Agregado grueso natural
AGR1	Agregado grueso reciclado 1ª generación
AGR2	Agregado grueso reciclado 2ª generación
AGR3	Agregado grueso reciclado 3ª generación
CR	Concreto de referencia elaborado con AGN
CAR1	Concreto elaborado con AGR de 1ª generación
CAR2	Concreto elaborado con AGR de 2ª generación
CAR3	Concreto elaborado con AGR de 3ª generación
CAR1(25%)	Concreto elaborado con AGR de 1ª generación (con una sustitución del 25%)
CAR2(25%)	Concreto elaborado con AGR de 2ª generación (con una sustitución del 25%)
CAR2(25%)	Concreto elaborado con AGR de 3ª generación (con una sustitución del 25%)
$\Delta$ AGN	Variación relativa al agregado grueso natural
$\Delta$ CR	Variación relativa al concreto de referencia
UM	Unidades de medida
INV-n	Número de investigación al que se hace referencia

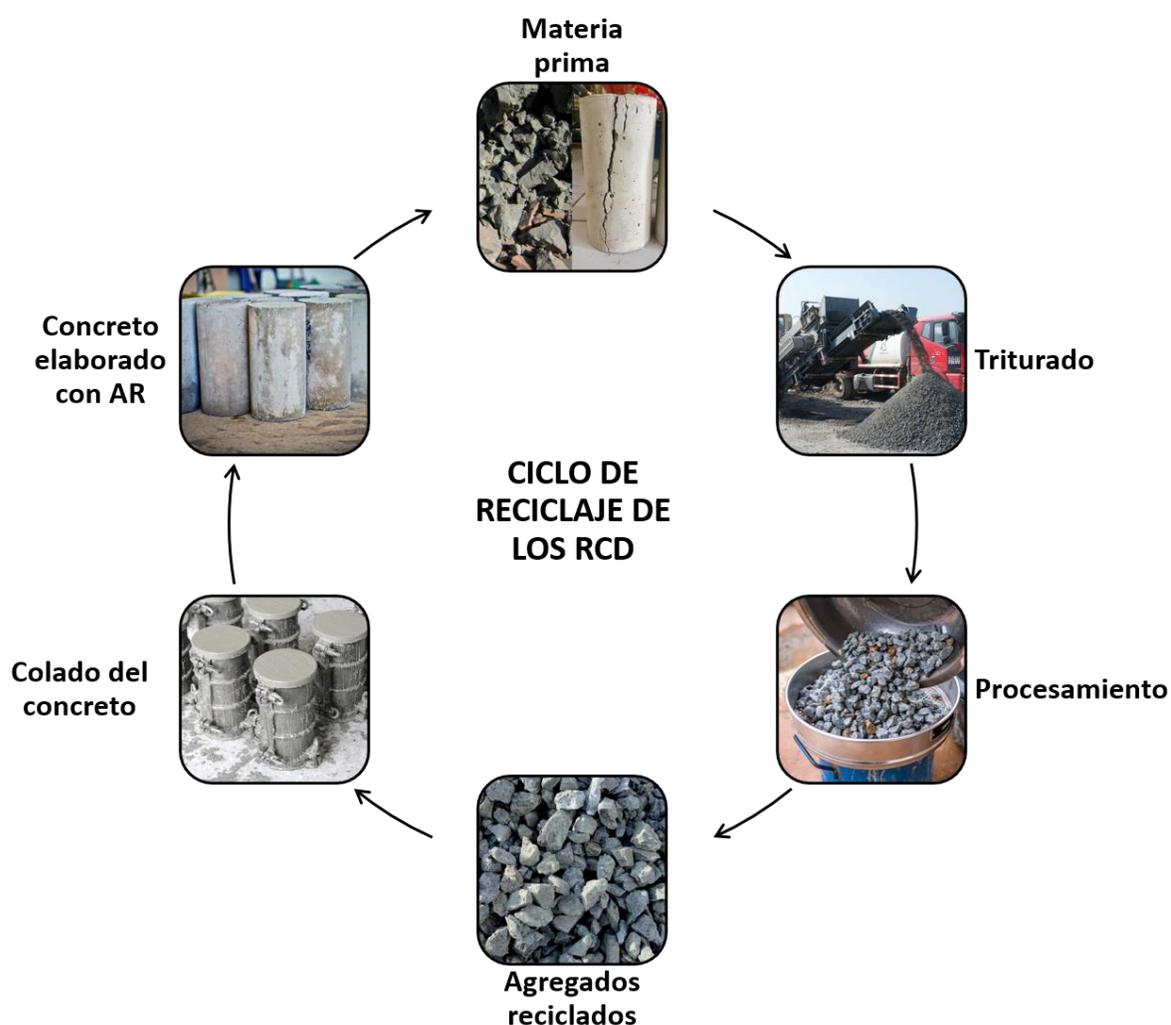
Fuente: Elaboración propia

#### **4.1.1 Generalidades**

En el capítulo 3 se analizaron cinco investigaciones que abordaban la temática del reciclaje repetido de agregados y concretos reciclados. Los materiales mencionados anteriormente reciben la denominación de “reciclados” ya que, en el caso de los agregados, estos se obtienen producto de la trituración de residuos de construcción y demolición o de la trituración de especímenes de concreto elaborados en laboratorio bajo condiciones controladas, mientras que los concretos, son conocidos como reciclados debido a que su composición se basa en la incorporación de AR, pudiendo utilizar únicamente agregado fino reciclado, agregado grueso reciclado o bien, una combinación de ambos tipos de agregados. Los concretos reciclados reciben esta denominación sin importar el porcentaje de sustitución de AR utilizados en su diseño de mezcla.

En cuanto a los ciclos, se puede determinar que un ciclo de reciclaje corresponde a un proceso que incluye distintas actividades, pero siempre buscando cumplir con tres objetivos principales,

los cuales son; el aprovechamiento de los RCD, la obtención de los agregados reciclados y la incorporación de AR en la elaboración de nuevos concretos. Con base en la literatura se sabe que el número de actividades de un proceso de reciclaje muchas veces puede variar, ya que dependiendo del enfoque del investigador pueden ser más o menos actividades, además de las variables que puedan existir, sin embargo, hay una serie de actividades que generalmente se desarrollan en todas las investigaciones referentes al reciclaje de los RCD con el fin de completar el procedimiento de forma correcta. En la Figura 22 se presenta un esquema con las actividades más recurrentes e importantes de un ciclo completo de reciclaje.



**Figura 22. Esquema de un ciclo completo de reciclaje de los RCD.**

Fuente: Elaboración propia

Cuando termina un proceso de reciclaje se obtiene un concreto elaborado con RCD que se puede triturar y volver a reciclar, dando inicio a un nuevo ciclo. A esta acción se le conoce como reciclaje repetido o reciclaje múltiple. Las pocas investigaciones acerca del reciclaje repetido generalmente realizaron de entre dos a tres ciclos, principalmente por motivos de tiempo, por la degradación en la calidad de las propiedades y en algunos casos por el costo o la dificultad para realizar cada ciclo de reciclaje. Cabe mencionar que a partir del segundo ciclo ya se pueden obtener indicadores que muestren cuál es la tendencia en las propiedades de los agregados y concretos reciclados conforme se va repitiendo este proceso.

Con la unificación de términos y valores, así como la definición de los materiales reciclados y los ciclos de reciclaje, ya se puede iniciar la etapa de análisis y comparación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados y concretos reciclados. En la Figura 23 se presentan los cinco trabajos que se estudiaron en la sección documental. Los nombres de todos los estudios fueron transcritos al español por motivos del idioma en el cual fue redactado este documento.

En la parte superior de la Figura 23 se puede observar un listado con los nombres y los autores de cada una de las investigaciones. Los trabajos fueron ordenados cronológicamente y de acuerdo a esto recibieron un número de 1 al 5, estos números servirán como referencia para cada proyecto durante el proceso de análisis. Una forma corta para referirse a las investigaciones serán las palabras “INV” seguido de un guion y el número del estudio correspondiente, por ejemplo “INV-4”, haciendo alusión a la investigación 4.

En la parte inferior del esquema se encuentra un mapa con las fechas y la distribución geográfica de los proyectos. En el apartado temporal se puede observar que existe una línea de tiempo de 6 años entre la primera investigación y la última, y los espacios de tiempo entre una y otra investigación no son mayores a 3 años, lo cual es interesante, ya que esto nos indica que la temática del reciclaje repetido es relativamente joven, pero sin duda, viene generando interés desde hace algunos años hasta la fecha.

- 1 Comportamiento mecánico de tres generaciones de concreto elaborado con 100% de agregado grueso reciclado.  
(Sumaiya Binte Huda, M. Shahria Alam)
- 2 Propiedades físico-mecánicas del concreto multi-reciclado procedente de la industria de concreto prefabricado.  
(Angel Salesa, Jose A. Pérez-Benedicto, David Colorado-Aranguren, Pedro L. Lopez-Julián, Luis M. Esteban, Luis J. Sanz-Baldúz, Jose L. Sáez-Hostaled, Juan Ramis, Daniel Olivares)
- 3 El efecto del reciclaje múltiple en el desempeño mecánico del concreto elaborado con agregados gruesos reciclados.  
(Vilson Abreu, Luís Evangelista, Jorge de Brito)
- 4 Evaluación de la durabilidad de tres generaciones de concreto elaborado con 100% de agregado grueso reciclado repetidamente.  
(Pinghua Zhu, Yali Hao, Hui Liu, Da Wei, Shaofeng Liu, Lei Gu)
- 5 Macro y micro propiedades del concreto elaborado con agregados multi-reciclados.  
(Thomas, C.; de Brito, J.; Cimentada, A.; Sainz-Aja, J.A.)

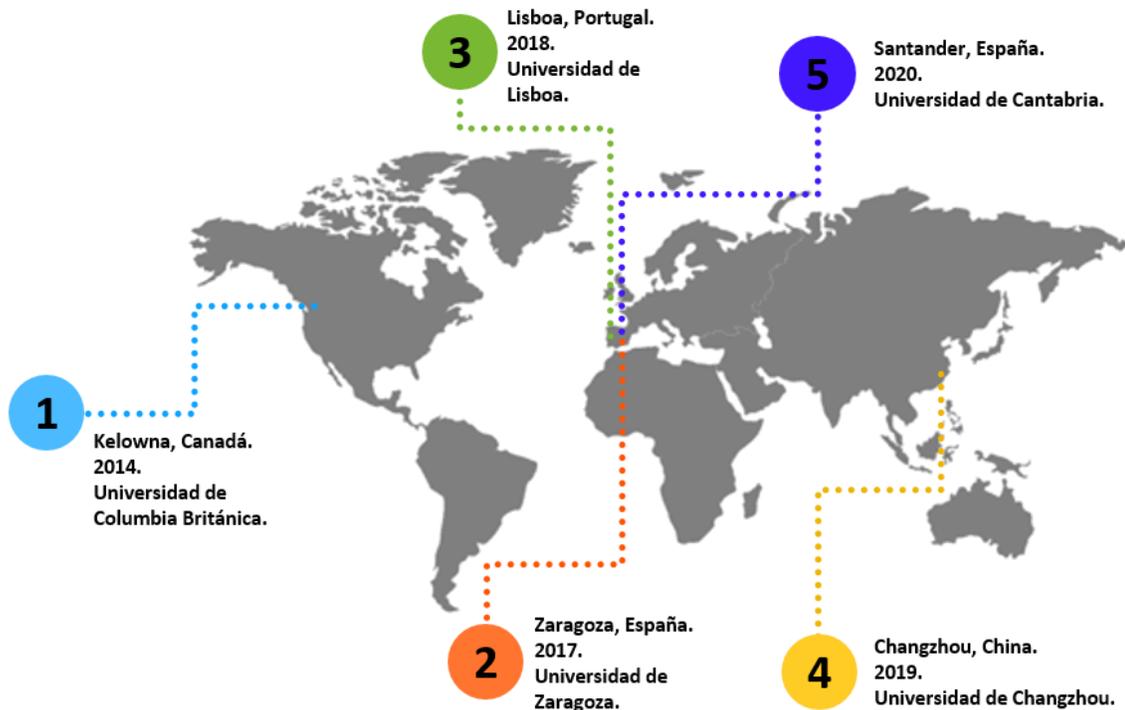


Figura 23. Datos generales de las investigaciones que conforman la sección documental.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la distribución geográfica se presenta en 3 continentes y 4 países, una investigación se realizó en América, específicamente en Canadá, tres investigaciones se realizaron en Europa, en países como España y Portugal y otra investigación se realizó en Asia, en el país de China. Esta información es coherente con lo visto en el estado del arte, ya que, de acuerdo a la literatura se sabe que los países europeos fueron los pioneros en estudiar y tomar medidas con los RCD después de la segunda guerra mundial y actualmente es un tema que sigue teniendo mucha repercusión en esa parte del mundo, principalmente por los años que tienen las construcciones en estos países.

Después de identificar cuáles son las investigaciones, así como sus datos más relevantes, queda definir cuál será el método para analizarlas, ya que a pesar de que todas estudian la misma temática, existen diferentes enfoques y campos de estudio, tales como las propiedades examinadas, las características de los agregados, las características de los concretos, los ciclos de reciclaje, los tiempos, tipos de pruebas, entre otros. Una forma de análisis será la comparación directa de las propiedades que se estudien en dos o más investigaciones, buscando los porcentajes e índices de degradación. Las propiedades que sólo se hayan estudiado en una investigación no tendrán un parámetro de comparación, por lo que no se analizarán a detalle en esta sección.

En la sección documental se evaluaron diversas propiedades físicas y mecánicas de los agregados y concretos a lo largo de todas las investigaciones, pero en este apartado únicamente se analizarán las características que se estudiaron en dos o más trabajos y que hayan presentado ciertas similitudes entre sí, por ejemplo, el tipo de prueba, los tiempos de evaluación y la utilización del multi-reciclaje. Estos parámetros servirán para delimitar las propiedades a estudiar con el fin de obtener una comparativa directa de las características, índices de aumentos o degradaciones y explicaciones científicas que determinen porque las propiedades sufren ciertas alteraciones conforme se desarrollan los ciclos de reciclaje.

#### 4.1.2 Agregados

Las propiedades del agregado grueso que se evaluarán en este apartado son; la densidad aparente y la absorción de agua, ya que son las únicas que se estudiaron en más de una investigación. Hay que considerar que las características de los agregados varían de acuerdo a su lugar de procedencia, por lo que los valores entre una y otra investigación pueden ser muy diferentes.

##### 4.1.2.1 Densidad aparente

La densidad aparente para los agregados se presenta en la Tabla 28, en la cual se puede observar que tres investigaciones consideraron el estudio de esta propiedad, las investigaciones uno, tres y cuatro. Los resultados muestran que en los tres casos hubo una reducción de la densidad conforme incrementaban los ciclos de reciclaje.

Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)

Tipo de agregado	Número de investigación									
	1		2		3		4		5	
	valor	$\Delta$ AGN	valor	$\Delta$ AGN	Valor	$\Delta$ AGN	valor	$\Delta$ AGN	valor	$\Delta$ AGN
AGN	1622.3	-	-	-	1355.1		2703	-	-	-
AGR1	1396.2	-14%	-	-	1132.2	-16%	2545	-6%	-	-
AGR2	1251.2	-23%	-	-	1034.4	-24%	2448	-9%	-	-
AGR3	1195.9	-26%	-	-	990.1	-27%	2274	-16%	-	-

**Tabla 28. Densidad aparente de los agregados.**

Fuente: Elaboración propia

En la INV-1 el valor inicial de esta característica para el AGN fue de 1622.3 kg/m<sup>3</sup>, después del primer ciclo se redujo en un 14%, para el segundo ciclo hubo una reducción del 23% y finalmente para el tercer ciclo de reciclaje la reducción fue del 26% con un valor de 1195.9 kg/m<sup>3</sup>. En la INV-3 el AGN partió con un valor de 1355.1 kg/m<sup>3</sup> y las degradaciones para los ciclos uno, dos y tres fueron del 16%, 24% y 27% respectivamente. Por su parte, para la INV-4, el valor del agregado natural fue de 2703 kg/m<sup>3</sup>, el más alto de las tres, y las reducciones para cada ciclo fueron del 6%, 9% y 16%. Los resultados de las investigaciones uno y tres fueron muy similares e indican que el mayor porcentaje de reducción de la densidad ocurrió en el primer ciclo y el menor en el tercer ciclo. En cuanto a la cuarta investigación, los resultados fueron diferentes, ya que las degradaciones más notables de esta propiedad se dieron en los ciclos uno

y tres, y la menor en el ciclo dos. Los índices de degradación en cada ciclo de reciclaje fueron de un 12% para el primer ciclo, un 6,67% para el segundo y un 4.33% para el tercero. Con base en la literatura, se esperaba que la densidad se redujera con cada ciclo y fue exactamente lo que sucedió en los 3 casos, esto ocurrió debido al aumento de pasta de mortero adherida al agregado grueso natural, degradando al mismo y ocasionando una reducción en la densidad aparente. No obstante, en la tercera investigación (Abreu et al, 2018) señala que, de un ciclo a otro, el incremento de pasta de cemento parece hacerse menor, lo que permite establecer un umbral más allá del cual no va cada propiedad, es decir, que en un determinado ciclo el valor de degradación del agregado tendrá un límite, por lo que ya no se podrá degradar más.

#### 4.1.2.2 Absorción de agua

La propiedad de absorción de agua para los agregados fue tomada en cuenta en cuatro trabajos, las investigaciones uno, dos, tres y cuatro. Los resultados se presentan en la Tabla 29 e indican que en todos los casos hubo un incremento de absorción de los agregados conforme se realizaban más ciclos de reciclaje.

Absorción de agua (%)					
Tipo de agregado	Número de investigación				
	1	2	3	4	5
AGN	1.2	1.1	1.1	1.8	-
AGR1	5.2	5.2	5.6	4.9	-
AGR2	7.1	6.2	8	5.8	-
AGR3	9.4	-	9.6	6.1	-

**Tabla 29. Absorción de agua de los agregados.**

Fuente: Elaboración propia

La tabla demuestra que para los estudios 1, 2 y 3 los valores son muy similares, partiendo con valores de 1.2, 1.1 y 1.1%, mientras que la INV-4 partió con un porcentaje de absorción de 1.8%. En todos los trabajos, después del primer ciclo de reciclaje es cuando ocurre el incremento más considerable, con valores, por orden de investigación, de 5.2, 5.2, 5.6 y 4.9% respectivamente, es decir, incrementos de entre 3.1 a 4.5%. Ya para el segundo ciclo de reciclaje

los indicadores presentan una menor coherencia entre sí, teniendo incrementos de 1.9, 1.0, 2.4 y 0.9 %. Finalmente, para el tercer ciclo los valores incrementaron un 2.3% para la INV-1, un 1.6 % para la INV-3 y un 0.3 % para la INV-4. La INV-2 no tuvo un tercer ciclo, por lo que no hay un indicador para esta fase. La absorción de agua aumentó en promedio un 3.92% en el primer ciclo, un 1.55% en el segundo y un 1.4% en el tercero. De acuerdo a la literatura, el incremento de la absorción de agua en los agregados se debe principalmente a la porosidad, que es ocasionada por el aumento de mortero adherido a la superficie de los agregados con cada ciclo de reciclaje. En palabras de (Huda et al, 2014), el valor de absorción del agregado grueso reciclado repetido es una expresión de su porosidad. Por su parte, (Abreu et al, 2018) sugiere una estabilización de la propiedad a medida que aumentan los ciclos de reciclaje.

#### **4.1.3 Concretos en estado fresco**

Dentro de las propiedades físicas que se evaluarán en este sector se encuentran; el asentamiento, el contenido de aire y la absorción de agua, mientras que para las propiedades mecánicas están; la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.

Se debe tener en cuenta que en las cinco investigaciones los concretos presentaron diferentes diseños estructurales y distintas composiciones de mezcla, que incluían el uso de otros materiales además de los tradicionales, tales como el humo de sílice, cenizas volantes, escoria, polímeros de ácido policarboxílico, fibras de polipropileno y algunos aditivos; reductores de agua, plastificantes y de incorporación de aire. También hay que destacar que a pesar de que las composiciones de la mezcla sean diferentes en todos los trabajos, cada investigador utilizó en su investigación la misma composición de mezcla para todos sus concretos, tanto para su concreto de referencia como para sus concretos reciclados.

##### **4.1.3.1 Asentamiento**

Para evaluar la trabajabilidad de los concretos se realizaron pruebas de revenimiento en tres de las cinco investigaciones; los estudios uno, dos y tres, los resultados se muestran en la Tabla 30. En la INV-1 se fijó un asentamiento objetivo de 90 mm, aunque el CR y el CAR1 obtuvieron un valor de 100 mm, es decir estuvieron un 11% arriba del objetivo requerido, posteriormente para el CAR2 y el CAR3 el asentamiento fue de 94 y 85 mm, lo que significó una reducción con respecto al CR del 6 y 15%, sin embargo, únicamente el CAR3 estuvo por debajo de la

consistencia requerida. En la INV-2 no se especifica si se estableció una meta para el revenimiento inicial, pero el CR partió con un valor de 69 mm, mismo que se redujo considerablemente para el primer ciclo, con un asentamiento de 55 mm y una degradación del 20% en referencia al valor inicial. Para el segundo ciclo la trabajabilidad volvió reducirse con un valor de 50 mm y una reducción del 28%. En esta investigación no se realizó un tercer ciclo, pero claramente se puede observar una tendencia decreciente en la trabajabilidad con cada ciclo de reciclaje. En la INV-3 se fijó un revenimiento de  $125 \pm 15$  mm, por lo que el concreto de referencia obtuvo un valor de 124.5 mm, por su parte los concretos reciclados obtuvieron para el primer, segundo y tercer ciclo, valores de 125, 121 y 128.5 mm respectivamente, lo que nos indica, que en este caso en particular los datos demuestran una muy ligera reducción del 3% en la trabajabilidad para el ciclo dos y un incremento del 1 y 3% para los ciclos uno y tres. Es importante mencionar que en la INV-3, durante todos los ciclos, los valores de revenimiento siempre estuvieron cerca del objetivo requerido.

Los datos estas 3 investigaciones no indican una tendencia similar en cuanto la degradación de la propiedad, dado que los valores contrastan considerablemente entre dichas investigaciones, por lo tanto, no se obtuvo un índice de degradación confiable.

Asentamiento (mm)

Tipo de concreto	Número de investigación									
	1		2		3		4		5	
	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR
CR	100	-	69	-	124.5	-	-	-	-	-
CAR1	100	0%	55	-20%	126	1%	-	-	-	-
CAR2	94	-6%	50	-28%	121	-3%	-	-	-	-
CAR3	85	-15%	-	-	128.5	3%	-	-	-	-

**Tabla 30. Asentamiento para los concretos.**

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a (Huda et al, 2014) y (Salesa et al, 2017), la trabajabilidad del concreto presenta una tendencia decreciente conforme se incrementan los bucles de reciclaje y esto ocurre debido a que el AGR presenta una mayor rugosidad y angularidad, además de que absorbe una mayor cantidad de agua.

#### 4.1.3.2 Contenido de aire

Se realizó la prueba de contenido de aire en las mezclas de concreto para las investigaciones uno y dos, los resultados se presentan en la Tabla 31. En la INV-1 los datos presentados demuestran una tendencia creciente con un valor de 3.4 % para el CR y valores para el CAR1, CAR2 y CAR3 de 3.6, 3.9 y 4.4 %, es decir, que entre el CR y el CAR3 existe una diferencia del 1%. Por su parte, en la INV-2 los resultados prácticamente se mantienen igual para todas las mezclas, con un incremento entre el CR y los concretos reciclados de apenas el 0.1%. El contenido de aire aumentó en promedio durante cada ciclo de reciclaje, un 0.15% en el primer ciclo y un 0.15% en el segundo. Para el tercer ciclo no se pudo obtener un promedio de degradación debido a que sólo en una investigación se realizaron 3 ciclos.

Contenido de aire (%)					
Tipo de concreto	Número de investigación				
	1	2	3	4	5
CR	3.4	3.2	-	-	-
CAR1	3.6	3.3	-	-	-
CAR2	3.9	3.3	-	-	-
CAR3	4.4	-	-	-	-

**Tabla 31. Contenido de aire en los concretos.**

Fuente: Elaboración propia

Con base en la literatura el contenido de aire para los concretos elaborados con agregados reciclados algunas veces es ligeramente mayor pero otras veces se mantiene igual, por lo que esta propiedad no presenta una gran alteración con los ciclos de reciclaje.

#### 4.1.4 Concretos en estado endurecido

##### 4.1.4.1 Absorción de agua

Los resultados de la prueba de absorción de agua para los concretos en estado endurecido se presentan en la Tabla 32. De las cinco investigaciones, dos de estas realizaron la prueba mencionada, las investigaciones 2 y 5.

Absorción de agua (%)					
Tipo de concreto	Número de investigación				
	1	2	3	4	5
CR	-	5.88	-	-	5.42
CAR1	-	7.23	-	-	7.78
CAR2	-	7.47	-	-	10.01
CAR3	-	-	-	-	10.05

**Tabla 32. Absorción de agua de los concretos.**

Fuente: Elaboración propia

En la INV-2 el CR inicia con un valor de absorción de 5.88%, posteriormente para el primer y segundo ciclo estos valores incrementan a 7.23 y 7.47%, por lo que el rango de incremento está entre 1.35 y 1.59 %. En cuanto a la INV-5, el CR parte con un valor de 5.42% y los datos de los concretos reciclados de acuerdo al orden de cada ciclo son de 7.78, 10.01 y 10.05%, lo que genera un rango de incremento de entre 2.36 y 4.63%. En esta última investigación se vio una tendencia de incremento constante para el ciclo 1 y ciclo 2, pero para el ciclo tres el incremento en referencia al ciclo anterior fue de apenas el 0.04%. La absorción de agua en concretos incrementó en promedio un 1.86% en el primer ciclo y un 1.24% en el segundo. Sólo en una de las dos investigaciones estudiadas se realizaron 3 ciclos de reciclaje, por lo tanto, para ese ciclo no se pudo obtener un porcentaje promedio de degradación.

El incremento en la absorción de agua para los concretos elaborados con agregados reciclados es uno de los efectos más conocidos cuando se habla del reciclaje de los RCD, esto sucede a raíz de que el AGR es menos denso y más absorbente que el agregado grueso natural, por lo que se puede decir que la calidad de los agregados termina impactando en la capacidad de absorción de los concretos.

#### 4.1.4.2 Resistencia a la compresión

##### Resistencia a la compresión con una sustitución de AGR del 100 %

La resistencia a la compresión fue la única propiedad que se evaluó en todas las investigaciones, específicamente a la edad de 28 días, no obstante, en algunos estudios también se evaluó esta propiedad a la edad de 7 y 56 días o con porcentajes de sustitución de AGR del 25%. En la Tabla 33 se presentan los resultados de resistencia a la compresión a la edad de 28 días para los concretos elaborados con agregado grueso reciclado con un porcentaje de sustitución del 100%.

Resistencia a la compresión con una sustitución del 100% de AGR a los 28 días (MPa)

Tipo de concreto	Número de investigación									
	1		2		3		4		5	
	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR
CR	39.80	-	46.85	-	55.90	-	49.10	-	55.88	-
CAR1	32.60	-18%	48.93	4%	54.10	-3%	47.50	-3%	54.21	-3%
CAR2	34.20	-14%	49.25	5%	53.30	-5%	42.20	-14%	53.29	-5%
CAR3	23.50	-41%	-	-	48.60	-13%	41.70	-15%	48.65	-13%

**Tabla 33. Resistencia a la compresión a la edad de 28 días.**

Fuente: Elaboración propia

En la INV-1 se diseñó un concreto con una resistencia objetivo de 32 MPa, misma que fue superada por el concreto de referencia, ya que alcanzó un valor de 39.80 MPa. Después de los ciclos de reciclaje el CAR1, CAR2 y CAR3 alcanzaron resistencias de 32.60, 34.20 y 23.50 MPa, lo que nos indica que presentaron una reducción en su fuerza compresiva del 18, 14 y 41% respectivamente. En esta investigación se puede observar un decremento considerable en el último ciclo, mientras que en los ciclos 1 y 2 si ocurrió una degradación, pero aun así se alcanzó el objetivo de los 32 MPa.

En cuanto a la INV-2, se estableció una resistencia objetivo de 25 MPa, que en este caso en particular fue ampliamente superada por los 3 concretos, tanto por el concreto de referencia como por los concretos reciclados. El valor inicial para el CR fue de 46.85 MPa, mientras que para el CAR1 y CAR2 los valores fueron de 48.93 y 49.25 MPa, o sea un 4 y 5% mayores que el CR. Los concretos de esta investigación superaron en casi un 100% al concreto objetivo y

esto ocurrió debido a que los AR que se utilizaron fueron producto de residuos de elementos prefabricados de concreto elaborados bajo altos estándares de calidad, lo que en otras palabras se entienda como un tipo de reciclaje selectivo, y que en el caso de los ciclos de reciclaje parece una muy buena alternativa.

Por su parte, en la INV-3 se estableció una resistencia inicial de 30 MPa, que igualmente fue superada por el concreto de referencia y por los concretos reciclados. El CR obtuvo una resistencia a la compresión de 55.90 MPa y los concretos reciclados obtuvieron resistencias de 54.10 MPa para el CAR1, 53.30 MPa para el CAR2 y 48.60 MPa para el CAR3, lo que genera degradaciones del 3, 5 y 13% de acuerdo al orden de los ciclos. En la INV-3 (Abreu et al, 2018) plantea que, con base en algunos cálculos, pudo determinar que la pérdida máxima de rendimiento, si se hicieran ciclos de reciclaje infinitos, sería del 12.9% a la edad de 56 días, aunque también menciona que es necesario realizar más de 3 ciclos para entender mejor este fenómeno.

Para la INV-4 se fijó una meta de resistencia a la compresión de 40 MPa, por lo que el CR partió con un valor de 49.10 MPa, posteriormente para los concretos reciclados se obtuvieron valores de 47.50, 42.20 y 41.70 MPa conforme avanzaban los ciclos, lo que se traduce en degradaciones del 3, 14 y 15% con referencia al concreto de origen, cabe recalcar que, a pesar de la degradación de la propiedad durante cada bucle, se pudo cumplir con el objetivo de los 40 MPa en todos los ciclos.

Finalmente, para la INV-5 se diseñó un concreto con una resistencia a la compresión de 30 MPa, misma que al igual que en las investigaciones dos, tres y cuatro fue superada por todos los concretos. En el caso del CR se obtuvo un valor inicial de 55.88 MPa, que se fue reduciendo a 54.21 MPa luego del primer ciclo, a 53.29 MPa después del segundo ciclo y a 48.65 al culminar el tercer ciclo, estos valores sufrieron una degradación en cada ciclo del 3, 5 y 13%.

Después de analizar las 5 investigaciones se pudo determinar que en cuatro estudios hubo una degradación de la propiedad cada que se realizaba un nuevo ciclo, exceptuando a la IVN-2, en la cual la resistencia fue incrementando ligeramente con cada ciclo de reciclaje. En este último trabajo se cree que no ocurrió una degradación debido a la calidad de los agregados, ya que

como se mencionó anteriormente, estos fueron residuos de piezas de concreto prefabricadas de muy buena calidad. Con respecto a los otros estudios en donde si ocurrió una degradación de la propiedad, todos los investigadores coinciden con la literatura, en que la degradación se debe principalmente al aumento de la cantidad de mortero adherido al agregado grueso con un número creciente de ciclos de reciclaje. (Abreu et al, 2018) agrega que el AGR tiene una estructura más porosa, lo que debilita su desempeño mecánico. Además, (Zhu et al, 2019) menciona que la formación de microporos y grietas en el AGR, provocadas por el proceso repetido de trituración, es otro factor que contribuye a la disminución de la resistencia del CAR. Los índices de degradación para cada ciclo fueron de 4.6% para el primer ciclo, 2% para el segundo y 13.9% para el tercero.

A pesar de que la mayoría de los concretos reciclados sufrieron reducción en su resistencia a la compresión con cada bucle de reciclaje es importante señalar que sólo un concreto de los 19 que se elaboraron no llegó a su resistencia objetivo, este concreto fue el CAR3 de la INV-1, sin embargo (Huda et al, 2014) determinó que la resistencia a la compresión de este concreto pudo alcanzar hasta 44,3 MPa a la edad de 120 días, que fue un 25 % más alta que su resistencia objetivo. Este autor también dice que los resultados de las pruebas de resistencia posteriores a 56 y 120 días se distribuyen casi simétricamente para todas las mezclas, lo que quiere decir que los CAR tienen un buen desempeño a largo plazo.

(Thomas et al, 2020) señala que todas las propiedades físicas y mecánicas muestran que el concreto multi-reciclado tiene propiedades aptas para su uso como concreto estructural, aunque también dice que estas propiedades no son suficientes por sí solas para garantizar la calidad de este tipo de concreto, por lo que una investigación interesante que verificaría las conclusiones obtenidas sería el análisis de la durabilidad del CAR en diferentes ciclos de reciclaje.

### **Resistencia a la compresión con una sustitución de AGR del 25%**

La propiedad mecánica de resistencia a la compresión con una sustitución del 25% de AGR se estudió en 2 investigaciones; la INV-3 y la INV-5. En la Tabla 34 se proyectan los resultados de resistencia a la compresión a la edad de 28 días para los concretos elaborados con agregado grueso reciclado con un porcentaje de sustitución del 25%.

Resistencia a la compresión con una sustitución del 25% de AGR a los 28 días (MPa)

Tipo de concreto	Número de investigación									
	1		2		3		4		5	
	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR
CR	-	-	-	-	55.9	-	-	-	55.88	-
CAR1	-	-	-	-	59.7	7%	-	-	59.74	7%
CAR2	-	-	-	-	55.9	0%	-	-	55.77	0%
CAR3	-	-	-	-	55.9	0%	-	-	55.89	0%

**Tabla 34. Resistencia a la compresión a la edad de 28 días con una sustitución del 25% de AGR.**

Fuente: Elaboración propia

En la INV-3 se definió una resistencia objetivo para los concretos de 30 MPa, obteniendo como resultado un concreto de referencia de 55.9 MPa. Después del inicio de los ciclos de reciclaje el primer concreto reciclado obtuvo una resistencia mayor a la del CR con una fuerza compresiva de 59.7 MPa, posteriormente para los ciclos 2 y 3 los concretos alcanzaron un mismo valor de 55.9 MPa, que fue el mismo que obtuvo el CR. Estos datos indican que todos los concretos superaron por mucho a la resistencia objetivo y que nunca hubo una degradación conforme incrementaban los procesos de reciclaje, ya que en el primer ciclo la resistencia incrementó y para el segundo y tercer ciclo los valores se mantuvieron constantes e iguales que el valor del concreto de referencia.

Para la INV-5 de igual forma se fijó una resistencia objetivo de 30 MPa que fue alcanzada y superada si problema, tanto por el concreto de referencia como por los concretos reciclados. El CR obtuvo una fuerza compresiva de 55.88 MPa, por su parte los concretos reciclados obtuvieron una resistencia de 59.74 MPa en el primer ciclo, 55.77 MPa en el segundo y 55.89 en el tercero, esto significa que para el CAR1 hubo un incremento en la resistencia a la compresión del 7%, para el CAR2 hubo una degradación insignificante del 0.2 y el CAR3 se mantuvo igual que el CR.

Los resultados de las dos investigaciones son muy coherentes entre sí, ya que los datos prácticamente son los mismos. Los índices de degradación o aumento para cada ciclo de reciclaje, fueron de +7% para el primer ciclo, 0% para el segundo y 0% para el tercero. Abreu et al (2018) dice que utilizando este porcentaje de sustitución el efecto del proceso de reciclaje

consecutivo no parece afectar el rendimiento del concreto. Estos trabajos respaldan la recomendación del RILEM publicada en su guía para la demolición y reutilización del concreto y mampostería, en donde se indica que el porcentaje adecuado de AGR utilizados para elaborar concretos reciclados no deberá ser mayor del 20% y si bien, aunque en este caso el porcentaje de sustitución es del 25%, los resultados fueron mucho mejores que los que se obtuvieron utilizando un porcentaje de sustitución del 100%.

#### 4.1.4.3 Resistencia a la tracción

La propiedad mecánica de resistencia a la tracción en concretos se realizó en tres investigaciones; la INV-1, INV-3 y la INV-4. Esta prueba se realizó a la edad de 28 días y los datos que se obtuvieron se presentan en la Tabla 35.

Resistencia a la tracción (MPa)

Tipo de concreto	Número de investigación									
	1		2		3		4		5	
	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR	valor	$\Delta$ CR
CR	9.7	-	-	-	4.2	-	6.6	-	-	-
CAR1	10	3%	-	-	3.8	-10%	5.8	-12%	-	-
CAR2	10.1	4%	-	-	3.7	-12%	5.4	-18%	-	-
CAR3	6.5	-33%	-	-	3.6	-14%	4.7	-29%	-	-

**Tabla 35. Resistencia a la tracción.**

Fuente: Elaboración propia

En la INV-1 se obtuvo un valor inicial para el concreto de referencia de 9.7 MPa, mientras que para el CAR1 y CAR2 los valores fueron de 10 MPa y 10.1 MPa, es decir, incrementaron un 3 y 4 % su valor con respecto al CR. Por otro lado, el CAR3 si se vio muy afectado, ya que su resistencia la tracción fue de 6.5 MPa, lo que significó una degradación de la propiedad del 33%. Este último dato hace que no exista una tendencia clara de esta característica con cada ciclo de reciclaje, por lo que quizás era necesario realizar un ciclo más.

Para la INV-3 los datos fueron totalmente diferentes debido a que el CR partió con una resistencia de 4.2 MPa, que se fue reduciendo constantemente con cada ciclo de reciclaje. En el primer ciclo fue cuando ocurrió la degradación más significativa con un valor de 3.8 MPa y una

degradación del 10% en relación al CR. Posteriormente para los ciclos 2 y 3 las resistencias descendieron a 3.7 y 3.6 MPa, lo que generó reducciones del 12 y 14%. A pesar de que las degradaciones fueron constantes en esta investigación, se pudo observar que estas no fueron muy drásticas, por lo que, en palabras del propio autor, se sugiere una estabilización de la propiedad a partir del tercer ciclo de reciclaje.

La INV-4 fue una mezcla de las dos primeras investigaciones, ya que el concreto de referencia obtuvo un valor de 6.6 MPa, que se redujo con cada ciclo de reciclaje como fue el caso de la INV-3, aunque su mayor degradación ocurrió en el último ciclo, tal y como pasó en la INV-1. Los concretos reciclados obtuvieron valores de 5.8, 5.4 y 4.7 MPa, es decir, que sufrieron degradaciones del 12, 18 y 29% respectivamente.

Las degradaciones del CAR3 en las investigaciones uno y cuatro, contradicen lo dicho por (Abreu et al, 2018), ya que los datos demuestran que no existe una tendencia a la estabilización de la propiedad en el tercer ciclo. Los índices de degradación conforme transcurrieron los 3 ciclos de reciclaje fueron de 6.33 %, 2.33 % y 16.67 % respectivamente. De acuerdo a (Huda et al, 2014), la pérdida de resistencia a la tracción en el tercer ciclo de reciclaje, ocurre debido a una mayor porosidad y mala calidad del AGR3.

#### **4.1.4.4 Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad en concretos se evaluó en tres de las cinco investigaciones; la INV-1, la INV-2 la INV-3. Esta propiedad a diferencia de las anteriores, tiene distintos tiempos de evaluación en cada trabajo, ya que en la INV-1 se evaluó a los 120 días, en la INV-3 a los 28 días y en la INV-2 no se especifica el tiempo de evaluación, sin embargo, debido a la relevancia de esta propiedad en la temática de los concretos reciclados, se optó por analizar cuáles fueron las alteraciones que tuvo en los distintos ciclos de reciclaje de acuerdo a cada proyecto. Los resultados del módulo de elasticidad se presentan en la Tabla 36.

Módulo de elasticidad (GPa)

Tipo de concreto	Número de investigación									
	1		2		3		4		5	
	valor	$\Delta CR$	valor	$\Delta CR$	valor	$\Delta CR$	valor	$\Delta CR$	valor	$\Delta CR$
CR	27.9	-	34.1	-	45.4	-	-	-	-	-
CAR1	27.1	-3%	30.1	-12%	34.5	-24%	-	-	-	-
CAR2	25.8	-8%	29.9	-12%	30.6	-33%	-	-	-	-
CAR3	24.5	-12%	-	-	30.7	-32%	-	-	-	-

**Tabla 36. Módulo de elasticidad.**

Fuente: Elaboración propia

En la INV-1 la prueba del módulo de elasticidad para concretos se evaluó a los 120 días de curado. Los resultados que se obtuvieron indican que hubo una degradación constante con cada ciclo de reciclaje. El concreto de referencia partió con un valor de 27.9 GPa y los concretos reciclados obtuvieron valores de 27.1, 25.8 y 24.5 GPa, por lo que las reducciones de la propiedad fueron del 3, 8 y 12%.

En cuanto a la INV-2, no se especifica como tal, cual fue el tiempo de evaluación, además de que hay que señalar que únicamente se realizaron 2 ciclos de reciclaje al igual en sus otras pruebas. En este trabajo el CR obtuvo un módulo de elasticidad de 34.1 GPa, mientras que para el CAR1 y CAR2 los valores fueron de 30.1 y 29.9 GPa, que se traducen en degradaciones de 11.7 y 12.3% en relación al concreto de referencia. La única reducción considerable ocurrió en el primer ciclo y posteriormente la propiedad pareció no degradarse en el intervalo del primer al segundo ciclo.

Por su parte, la INV-3 fue la que obtuvo el valor más alto para su concreto de referencia, pero también fue la que obtuvo los porcentajes más altos de degradación en los procesos de reciclaje. El concreto de referencia obtuvo un valor inicial de 45.4 GPa, mismos que se fueron reduciendo a 34.5 GPa en el primer ciclo y a 30.6 GPa en el segundo. Ya para el tercer ciclo el módulo de elasticidad tuvo una mejora insignificante con respecto al segundo ciclo, obteniendo un valor de 30.7 GPa que significa una reducción del 32% en referencia al concreto de origen.

Las 3 investigaciones poseen distintos porcentajes de degradación en cada ciclo, no obstante, parece haber una tendencia que indica que conforme incrementan los ciclos se empiezan a reducir los porcentajes de degradación. Los índices de degradación para esta propiedad de acuerdo a cada ciclo de reciclaje son de 13% para el primer ciclo, 4.67% para el segundo y 4.33% para el tercero. Las reducciones en el módulo de elasticidad, de acuerdo a (Salesa et al, 2017), ocurren debido al aumento de mortero adherido con cada ciclo de reciclaje, ya que la pasta de cemento tiene menor módulo de elasticidad que los agregados naturales, lo que vuelve menos rígidos a los concretos reciclados que los concretos elaborados con AGN.

---

# **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

## 5.1 Conclusiones

En este estudio se han evaluado los efectos del reciclaje múltiple en agregados y concretos a través de una recopilación documental compuesta con cinco investigaciones que realizaron ciclos de reciclaje repetidos. Estos trabajos se desarrollaron alrededor de todo el mundo y aunque presentaron algunas diferencias entre sí, tuvieron un excelente punto de comparación, por tal motivo, se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

La densidad aparente en agregados se redujo con cada ciclo de reciclaje. El valor máximo de degradación alcanzado fue de un 27% con respecto al agregado grueso natural y ocurrió en el tercer ciclo de la INV-3. Los índices de degradación en cada ciclo de reciclaje fueron de un 12% para el primer ciclo, un 6,67% para el segundo y un 4.33% para el tercero. El decremento de esta propiedad es producto de la cantidad de mortero adherida al agregado grueso.

La absorción de agua en agregados incrementó con cada bucle de reciclaje. El valor máximo de absorción fue en el tercer ciclo de la INV-3 con un aumento del 8.5% en referencia a el AGN. La absorción de agua aumentó en promedio un 3.92% en el primer ciclo, un 1.55% en el segundo y un 1.4% en el tercero. El aumento en la absorción de los agregados reciclados se debe principalmente a la porosidad.

El asentamiento para los concretos presentó datos muy variados en las tres investigaciones en las cuales se realizó esta prueba. El valor máximo de degradación sucedió para el segundo ciclo de la INV-2 con una reducción del 28% en comparación con el CR. La degradación de esta característica es debido a que el AGR posee una mayor rugosidad y angularidad que el AGN, además de que absorben una mayor cantidad de agua. Los datos de esta propiedad no presentaron una tendencia similar, por lo que no se obtuvo un índice de degradación confiable.

El contenido de aire en los concretos incrementó en casi todos los ciclos de reciclaje de las dos investigaciones en las cuales se realizó esta prueba. El incremento máximo del contenido de aire ocurrió en la INV-1, en el ciclo 3, con un incremento de un 1% en comparación con el CR. El contenido de aire aumentó en promedio durante cada ciclo de reciclaje, un 0.15% en el primer ciclo y un 0.15% en el segundo. Esta propiedad no presenta grandes alteraciones con la actividad del reciclaje repetido.

La absorción de agua en concretos incrementó con cada proceso de reciclaje. El valor máximo de incremento ocurrió en el tercer ciclo de la investigación cinco, con un aumento de 4.63% con respecto al CR. La absorción de agua en concretos incrementó en promedio un 1.86 % en el primer ciclo y un 1.24% en el segundo. El aumento en la absorción de agua sucede porque el AGR es menos denso y más absorbente que el agregado natural.

La resistencia a la compresión con una sustitución del 100% de AGR se redujo en la mayoría de los ciclos de reciclaje. El valor máximo de degradación con respecto al CR ocurrió en el tercer ciclo de la INV-1 y fue del 41%. Los índices de degradación para cada ciclo fueron de 4.6% para el primer ciclo, 2% para el segundo y 13.9% para el tercero. La reducción de la fuerza compresiva se debe principalmente a la porosidad y mala calidad del AGR

La resistencia a la compresión para concretos elaborados con un porcentaje de sustitución de AGR del 25% generó resultados positivos en las dos investigaciones en las que se realizó este estudio. El valor máximo de incremento se dio en el ciclo uno de las investigaciones 3 y 5 y fue del 7%. Los índices de aumento para cada ciclo de reciclaje, fueron de +7% para el primer ciclo, 0% para el segundo y 0% para el tercero.

La resistencia a la tracción sufrió una degradación constante en dos de las tres investigaciones en las que se realizó esta prueba. El valor máximo de degradación ocurrió en el ciclo tres de la INV-1 y fue del 33%. Los índices de degradación conforme transcurrieron los 3 ciclos de reciclaje fueron de 6.33 %, 2.33 % y 16.67 % respectivamente. La reducción de esta característica es debido a que el AGR es más poroso y presenta una calidad inferior en comparación con el AGN.

El módulo de elasticidad presentó degradaciones con los procesos de reciclaje repetido. La degradación máxima de esta propiedad se dio en el ciclo dos de la INV-3 con un decremento del 33% en comparación con el concreto de referencia. Los índices de degradación para esta propiedad de acuerdo a cada ciclo de reciclaje son de 13% para el primer ciclo, 4.67% para el segundo y 4.33% para el tercero. La degradación de esta propiedad ocurre debido a que la pasta de cemento tiene menor módulo de elasticidad que el AGN, por lo que al estar adherida al agregado reciclado lo termina afectando.

## **5.2 Recomendaciones**

Realizar una investigación del reciclaje múltiple para agregados y concretos con materiales de esta región y con un porcentaje de sustitución de AGR del 20%.

Realizar una investigación con más de tres ciclos de reciclaje, reduciendo las propiedades a estudiar.

Estudiar la durabilidad del concreto multi-reciclado aplicado a diferentes tipos de construcciones.

Evaluar el reciclaje repetido de concretos elaborados con un porcentaje de sustitución de agregado grueso y fino del 20%

### 5.3 Referencias

- Abreu, V., Evangelista, L., & de Brito, J. (2018). The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 480-489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.178>
- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- Aslam, M. S., Huang, B., & Cui, L. (2020). Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of Environmental Management*, 264, 110445. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>
- Borjas, L. (2008). *Diagnóstico para determinar las características y disposición de los Residuos de Construcción y Demolición en Quintana Roo* [Maestría]. Instituto tecnológico de Chetumal.
- Castaño, J. O., Misle Rodríguez, R., Lasso, L. A., Gómez Cabrera, A., & Ocampo, M. S. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: Perspectivas y limitantes. *Revista Tecnura*, 17(38), 121. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.4.a09>
- Cortés, D. (2008). *Propuesta de plan específico para la gestión de residuos de construcción y demolición en el Estado de Quintana Roo* [Maestría]. Instituto tecnológico de Chetumal.
- De Dios, J. (2018). *Plan de gestión de residuos de construcción y demolición en obras de edificación adaptado a los materiales y procesos constructivos de la región* [Maestría]. Instituto tecnológico de Chetumal.

- Domínguez, A., Domínguez, M. I., Ivanova, S., Centeno, M. A., & Odriozola, J. A. (2016). Recycling of construction and demolition waste generated by building infrastructure for the production of glassy materials. *Ceramics International*, 42(14), 15217-15223. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.157>
- Domínguez, J. A., & Martínez, E. (2007). Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas. *Revista Académica Ingeniería*, 11(3), 43-54.
- Domínguez Lepe, J. A. (2006). Sistema estratégico para la prevención y gestión de los residuos de construcción y demolición. *Tesis doctoral*.
- Duan, H., Miller, T. R., Liu, G., & Tam, V. W. Y. (2019). Construction debris becomes growing concern of growing cities. *Waste Management*, 83, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.044>
- Escudero, F. (2016). *Análisis costo-beneficio de los subsistemas de captación y revalorización de los RCD en Chetumal y su Área Metropolitana* [Maestría]. Instituto tecnológico de Chetumal.
- Fatta, D., Papadopoulos, A., Avramikos, E., Sgourou, E., Moustakas, K., Kourmoussis, F., Mentzis, A., & Loizidou, M. (2003). Generation and management of construction and demolition waste in Greece—An existing challenge. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(1), 81-91. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00035-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00035-1)
- Ginga, C. P., Ongpeng, J. M. C., & Daly, Ma. K. M. (2020). Circular Economy on Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Material Recovery and Production. *Materials*, 13(13), 2970. <https://doi.org/10.3390/ma13132970>

Hansen, T. H. (1992). *Recycling of Demolished Concrete and Masonry* (1st Edition). CRC Press.

Huang, B., Wang, X., Kua, H., Geng, Y., Bleischwitz, R., & Ren, J. (2018). Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 36-44.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>

Huda, S. B., & Alam, M. S. (2014). Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 65, 574-582. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.010>

Kartam, N., Al-Mutairi, N., Al-Ghusain, I., & Al-Humoud, J. (2004). Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. *Waste Management*, 24(10), 1049-1059. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.06.003>

Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 703-711. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)

Khalaf, F. M., & DeVenny, A. S. (2004). Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete: Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(4), 331-340. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:4\(331\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:4(331))

Marie, I., & Quiasrawi, H. (2012). Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 37, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.020>

- Menegaki, M., & Damigos, D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>
- Mercante, I. T. (2007). Caracterización de residuos de la construcción. Aplicación de los índices de generación a la gestión ambiental. *Revista Científica de UCES*, 11(2), 86-109.
- Moretti, J. P., Sales, A., Almeida, F. C. R., Rezende, M. A. M., & Gromboni, P. P. (2016). Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. *Construction and Building Materials*, 113, 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.062>
- ONU. (2019). *World urbanization prospects: 2018: highlights*. United Nations.
- Peng, C.-L., Scorpio, D. E., & Kibert, C. J. (1997). Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. *Construction Management and Economics*, 15(1), 49-58. <https://doi.org/10.1080/014461997373105>
- Rao, A., Jha, K. N., & Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- RILEM. (1994). Recommendation 121-DRG Guidance for Demolition and reuse of Concrete and Masonry. Specifications for Concrete with Recycle Aggregates. *Materials and Structures*, 27, 557-559.
- Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T., & Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 707-712. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00476-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00476-2)

- Salesa, Á., Pérez-Benedicto, J. A., Colorado-Aranguren, D., López-Julián, P. L., Esteban, L. M., Sanz-Baldúz, L. J., Sáez-Hostaled, J. L., Ramis, J., & Olivares, D. (2017). Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry. *Journal of Cleaner Production*, 141, 248-255.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.058>
- Santos, D. de, Monercillo Delgado, B., & García Martínez, A. (2013). *Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición* (1ª ed). Tornapunta.
- SEMARNAT. (2009). *Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generados por las actividades de construcción en México*. Realizado por: Sistemas de Ingeniería y Control Ambiental (SICA).  
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD000933.pdf>
- Shen, L. Y., Tam, V. W. Y., Tam, C. M., & Drew, D. (2004). Mapping Approach for Examining Waste Management on Construction Sites. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(4), 472-481. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:4\(472\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:4(472))
- Tansel, B., Whelan, M., & Barrera, S. (1994). Building performance and structural waste generation by Hurricane Andrew. *International Journal for Housing Science and Its Applications*, 18, 69-77.
- Thomas, C., de Brito, J., Cimentada, A., & Sainz-Aja, J. A. (2020). Macro- and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118843>

- Topçu, ilker B., & Günçan, N. F. (1995). Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1385-1390. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00131-U](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00131-U)
- Topçu, İ., & Şengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1307-1312. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.019>
- U.S. EPA. (2019). *Industrial, Construction and Demolition (C&D) Landfills, Electronic Code of Federal Regulations*. [https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID%44b92eb3b1338742ce61c1f9a222450a2&mc%4true&node%4se40.27.258\\_12&rgn%4div8](https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID%44b92eb3b1338742ce61c1f9a222450a2&mc%4true&node%4se40.27.258_12&rgn%4div8)
- Yuan, H. (2013). A SWOT analysis of successful construction waste management. *Journal of Cleaner Production*, 39, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.016>
- Zhu, P., Hao, Y., Liu, H., Wei, D., Liu, S., & Gu, L. (2019). Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 210, 442-450. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.203>