



**ALTERNATIVAS DE MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-
MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS Y MORTEROS A BASE DE
AGREGADOS RECICLADOS**

Estudiantes:

CÉSAR LEONARDO CRESPO MELÉNDEZ

ISAAC DAVID HERAZO ALCÁZAR

Director:

MANUEL SABA, PhD



**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTA DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA D. T. Y C.**

2021



**ALTERNATIVAS DE MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-
MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS Y MORTEROS A BASE DE
AGREGADOS RECICLADOS**

Estudiantes:

**CÉSAR LEONARDO CRESPO MELÉNDEZ
ISAAC DAVID HERAZO ALCÁZAR**

**Monografía para optar por el título de:
INGENIERO CIVIL**

Director:

MANUEL SABA, PhD

Grupo de investigación:

ESCONPAT

Línea de investigación:

Materiales de construcción

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTA DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA D. T. Y C.**

2021



ALTERNATIVAS DE MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS Y MORTEROS A BASE DE AGREGADOS RECICLADOS

NOTA DE ACEPTACION

**Firma del director
Manuel Saba**

**Firma del jurado
Modesto Barrios Fontalvo**

**Firma del jurado
Monica Eljaiek Urzola**



Dedicatorias

*A nuestras familias por depositar en nosotros su cariño, fe, sueños y esperanzas.
A nuestros profesores por guiarnos en la senda del conocimiento.
A nuestros amigos y compañeros con los cuales siempre compartiremos momentos,
recuerdos y anécdotas.*

Agradecimientos

Manuel Saba, PhD. Director del Grupo de Investigación ESCONPAT. Director de Tesis
Cuerpo docente del programa de Ingeniería Civil
Familia Alcanzar Berdugo
Familia Crespo Meléndez
Familia Gil Casallas
Familia Guerra Comas
Familia Herazo Díaz
Familia Ramos Medina



Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	5
Índice de Tablas.....	7
Índice de Figuras	8
Nomenclatura.....	9
Resumen	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
Capítulo 1: Aspectos generales sobre concreto y mortero	15
1.1 Composición del Concreto.....	15
1.1.1 Cemento.....	15
1.1.2 Agregados.....	16
1.1.3 Agua	17
1.1.4 Aditivos	17
1.2 Propiedades del Concreto	20
1.2.1 Resistencia	20
1.2.2 Trabajabilidad.....	20
1.2.3 Porosidad	21
1.2.4 Módulo de Young.....	22
1.3 Mortero	22
1.3.1 Propiedades del mortero	23
Capítulo 2: Propiedades físico mecánicas para concretos y morteros de agregado reciclado.....	25
2.1 Porosidad	25
2.2 Resistencia a la Compresión	25
2.2.1 Los Porcentajes de Reemplazo de RA.....	25
2.2.2 Contenido de Humedad de los RA	29



2.2.3	Calidad del Material Original.....	29
2.3	Resistencia a la Tracción	30
2.3.1	Porcentaje de Sustitución de RA	30
2.3.2	Procedimiento de Triturado	30
2.3.3	Mezclado	31
2.4	Módulo de Young	31
Capítulo 3: Aditivos para el mejoramiento de concretos y morteros de agregado reciclado		33
3.1	Humo de Sílice SF	33
3.2	Superplastificante SP	34
3.3	Escoria de Alto Horno Granulada GGBFS	34
3.4	Fibras Naturales y Artificiales	35
Capítulo 4. Factibilidad económica		40
Capítulo 5: Conclusiones.....		43
Recomendaciones		46
Bibliografía.....		47



Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de cemento Pórtland, (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1993).....	16
Tabla 2. Clasificación de los agregados según el tamaño, (Sánchez De Guzmán, 1995)	16
Tabla 3. Tipos de aditivos, (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2008).....	18
Tabla 4. Uso de los morteros de cemento. (Sánchez de Guzman, 2001)	22
Tabla 5. Propiedades de los RAC con diferentes tipos de RA evaluados a los 28 días.	28
Tabla 6. Influencia de los aditivos en las propiedades de los RAC evaluados a los 28 días.	37
Tabla 7. Propiedades de fibras sintéticas y naturales (adaptado de Esguerra Torres & Forero Vega, (2020) y Xie et al., (2021)).....	38



Índice de Figuras

Figura 1. Resistencia a la compresión a los 28 días de mezclas de concreto con contenido creciente de RCA grueso (adaptado de R. V. Silva et al., 2015b).....	26
Figura 2. Resistencia a la compresión a los 28 días de mezclas de mortero con contenido creciente de arenas recicladas (RS por sus siglas en inglés) (adaptado de (Martínez-García et al., 2021)).....	27
Figura 3. Uso actual (a) y adecuado de agregados (b) (adaptado de (R.V. Silva et al., 2015)).....	30



Nomenclatura

CDW: Residuos de construcción y demolición

E= Módulo de Elasticidad

GGBFS: Escoria de alto horno granulada

NA: Agregado natural

NAC: Concreto de agregado natural

RA: Agregado reciclado

RAC: Concreto de agregado reciclado

RAC-F: Concreto de agregado reciclado sin tratamiento

RAC-T: Concreto de agregado reciclado tratado

RCA: Agregado de concreto reciclado

Rc: Resistencia a la Compresión

RMA: Agregado reciclado grueso proveniente de la mampostería

RS: Mezclas de mortero con contenido creciente de arenas recicladas

RSM: Morteros de arena reciclada

Rt: Resistencia a la Tracción

SF: Humo de sílice

SP: superplastificantes



Resumen

Cada año se utilizan en el mundo 3 mil millones de toneladas de materia prima para fabricar materiales y productos de construcción, que representa entre el 30% y el 40% del consumo de la energía primaria a nivel mundial. La continua expansión de esta industria muestra que para los próximos años este consumo aumentará de hasta en un 300%. Por otra parte, la demolición de estructuras e infraestructuras para dejar espacio a las nuevas construcciones a nivel global genera una gran cantidad de CDW de los cuales aproximadamente la mitad es concreto.

Sin embargo, en las últimas décadas se ha evidenciado de manera creciente la necesidad de promover un desarrollo sostenible y fomentar una mejor gestión ambiental, implementando nuevos métodos de producción en todas las industrias. En la industria de la construcción la utilización de RCA se presenta como una opción para el desarrollo sostenible. No obstante, se ha comprobado que la utilización de RCA puede generar una disminución de rendimiento en las propiedades de los concretos. Por lo tanto, en esta monografía se discuten varias alternativas de mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de los concretos y morteros de agregado reciclado, a través de una revisión bibliográfica. Adicionalmente, se reportan algunas consideraciones sobre la factibilidad económica del uso de RCA en las mezclas de concreto.

Las propiedades de los RCA dependen principalmente del tipo, los porcentajes de sustitución y el origen de los materiales reciclados. Estas propiedades se pueden mejorar con métodos de control para la absorción de agua y control de la porosidad. Por otro lado, se profundizó sobre el efecto en calidad y durabilidad de los RAC de la adición de aditivos como fibras, humo sílice, escoria de alto horno molida y superplastificantes.

Se concluyó que los aditivos pueden presentar mejoramientos significativos en las propiedades físico mecánica de los RAC, como la disminución de la porosidad en un 54% con fibras de vidrio o el aumento en un 21% en la resistencia a la compresión con mezclas de superplastificantes. Pero, su viabilidad económica sigue siendo una problemática ligada principalmente a los elevados costos locales.



Abstract

Every year, 3 billion tons of raw materials are used worldwide to manufacture building materials and products, which represents between 30% and 40% of the world's primary energy consumption. The continuous expansion of this industry shows that this consumption will increase by up to 300% in the coming years. Moreover, the demolition of structures and infrastructure to make way for new construction globally generates a large amount of CDW, approximately half of which is concrete.

However, in recent decades there has been growing evidence of the need to promote sustainable development and encourage better environmental management by implementing new production methods in all industries. In the construction industry, the use of RCA is presented as an option for sustainable development. However, it has been proven that the use of RCA can generate a decrease in performance in the properties of concretes. Therefore, this monograph discusses several alternatives for improving the physical-mechanical properties of recycled aggregate concretes and mortars, through a literature review. Additionally, some considerations on the economic feasibility of using RCA in concrete mixtures are reported.

The properties of RCA depend mainly on the type, substitution percentages and origin of the recycled materials. These properties can be improved with control methods for water absorption and porosity control. On the other hand, the effect on quality and durability of RAC of the addition of additives such as fibers, silica fume, ground blast furnace slag and superplasticizers were studied in depth.

It was concluded that additives can present significant improvements in the physical-mechanical properties of RAC, such as a 54% decrease in porosity with glass fibers or a 21% increase in compressive strength with mixtures of superplasticizers. However, their economic feasibility remains a problem mainly linked to high local costs.



Introducción

La industria de la construcción es uno de los principales sectores que contribuyen al desarrollo y crecimiento económico de un país, debido a su capacidad de impulsar cadenas de valor que a su vez alimentan a otras industrias, (Nithya & Ramasamy, 2021). Esta constituye uno de los sectores más importantes y de mayor incidencia en el progreso y prosperidad de la sociedad por su estrecha vinculación con la creación de infraestructuras básicas como viviendas, puentes, carreteras, puertos, vías férreas, plantas de energía eléctrica, entre otras, (Chuai et al., 2021).

El sector de la construcción tuvo un gran auge en Europa debido a la gran destrucción generada por la segunda guerra mundial, (H. B. Le & Bui, 2020). Los restos de las construcciones afectadas fueron derrumbados y los residuos trasladados a vertederos, dejándolos en un olvido, (H. B. Le & Bui, 2020). Durante las décadas siguientes y hasta nuestros tiempos, el proceso de traslado y vertimiento de residuos de construcción y demolición (CDW, por sus siglas en inglés), también llamados escombros, se ha aplicado en todo el mundo, (Abedalqader et al., 2021).

Hoy en día la industria de la construcción a nivel mundial es una de las actividades económicas más rentables, su desarrollo se ha fortalecido debido al aumento de la inversión de obras por parte de los sectores públicos y privados, (Carrasco, 2018). El incremento de las poblaciones ha traído la necesidad de la creación de proyectos de bienestar social, consiguiendo así una expansión de los asentamientos de las poblaciones y así mismo crecimiento en su economía, (Carrasco, 2018; Li et al., 2020).

Cada año se utilizan en el mundo 3 mil millones de toneladas de materia prima para fabricar materiales y productos de construcción, (Calkins, 2009; Olofinnade et al., 2021), y, por otro lado, la industria de la construcción de edificios consume del 30% al 40% de toda la energía primaria utilizada en todo el mundo. Esto, a su vez, produce entre el 40% y el 50% de los gases de efecto invernadero, (Benachio et al., 2020; Huang et al., 2018; Khasreen, 2013; Waste management board, 2000). Para los próximos 50 años se proyecta un aumento del 300% en el uso de energía y materiales para la construcción, como consecuencia del aumento de la población y la actividad económica mundial, (McDonough & Braungart, 2003; Velenturf & Purnell, 2021).



De igual forma, la constante expansión urbana a nivel global genera una gran cantidad CDW en todo el mundo, (Soni & Shukla, 2021). En los Estados Unidos y en la Unión Europea se generan aproximadamente 700 y 800 millones de toneladas cada año respectivamente, mientras que en China llega a superar los 2100 millones de toneladas al año, (Wu et al., 2019). Estos residuos son comúnmente eliminados mediante el uso de vertederos, convirtiendo grandes espacios en áreas improductivas y generando a mediano y largo plazo problemas de contaminación de los cuerpos de agua y de los suelos, (Tang et al., 2020).

Desde esta perspectiva y teniendo en cuenta que en las últimas décadas la promoción de la gestión ambiental y el fomento del desarrollo sostenible han ejercido presión para la implementación de nuevos métodos de producción en todas las industrias, se hace evidente que la industria de la construcción va a tener la obligación y la necesidad de implementar un modelo económico orientado hacia el reciclaje y la reutilización de los materiales de construcción.

Debido a que los residuos de concreto constituyen aproximadamente el 50% del total de residuos de la construcción, (Martínez-Lage et al., 2020), el reciclaje de residuos de concreto es la mejor opción para minimizar las cantidades de CDW. Bajo estos antecedentes, es cuando la utilización de concretos con agregado reciclado (RAC, por sus siglas en inglés) se presenta como una potencial solución para minimizar el consumo de agregados naturales, y los volúmenes destinados a las escombreras, (Xie et al., 2021). Por RAC se entiende la utilización como agregado (Agregado reciclado, RA por sus siglas en inglés) de un concreto que ha sido previamente usado en otra obra que fue demolida y que se considera como escombros, (Lederer et al., 2020; Rao et al., 2007).

Los RAC y los concretos con agregados naturales (NAC, por sus siglas en inglés), difieren en sus características físico-mecánicas, (Bravo et al., 2018), debido principalmente a que los RAC tienen mayor absorción de agua, (Vengadesh Marshall Raman & Ramasamy, 2020). Esto se debe a que la rugosidad y la superficie específica de los RA son grandes y normalmente tienen formas más alargadas, lo que hace que la relación agua/cemento (A/C) efectiva de las mezclas deba aumentarse para mantener la trabajabilidad, (Zheng et al., 2018).

Comportamientos similares se pueden observar en los morteros, (Vengadesh Marshall Raman & Ramasamy, 2020). Por lo tanto, con la utilización de RA se obtienen mezclas



considerablemente más porosas, lo que afecta la resistencia del concreto, ya que generalmente existe una relación inversa fundamental entre la porosidad y la resistencia, (Mehta & Monteiro, 2014), de igual forma, una mayor porosidad favorece la entrada de agentes contaminantes externos, lo cual afecta la durabilidad de los concretos, (Bravo et al., 2018; Eljaiek Urzola et al., 2011; Théréne et al., 2020; Hongru Zhang et al., 2021).

En la literatura se han establecido varias alternativas para mejorar la resistencia del RAC y contrarrestar sus problemas mecánicos y de durabilidad, (W. Ahmed & Lim, 2021; Bravo et al., 2017; Rashid et al., 2020; Tobeia et al., 2021; Vengadesh Marshall Raman & Ramasamy, 2020; Xie et al., 2021). Estas técnicas incluyen principalmente el uso de varios aditivos como los superplastificantes, escoria de alto horno granulada molida, humo sílice, fibras naturales y artificiales que llevan inclusive a mejorar las propiedades de resistencia a la flexión y tracción.

La presente Monografía tiene el objetivo de discutir alternativas de mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de los concretos y morteros de agregado reciclado, a través de búsquedas de información relacionada en libros, artículos publicados en revistas científicas nacionales e internacionales, tesis y trabajos de grado y demás documentos disponibles en la base de datos de la Universidad de Cartagena y en la web.

Este trabajo sigue la línea de investigación *Materiales de Construcción* del grupo de investigación ESCONPAT de la Universidad de Cartagena, procurando así seguir avanzando en el conocimiento y en la mejora de los materiales de construcción.

Para abordar esta temática desde lo general a lo particular el presente documento está organizado en capítulos. En el primer capítulo se definen conceptos generales referentes al concreto, sus componentes y propiedades, en el segundo capítulo se exponen los cambios en las propiedades del concreto cuando se reemplazan los agregados naturales por los agregados reciclados. En el tercer capítulo se explica como el uso de aditivos mejora las propiedades de los RAC y en el cuarto capítulo se presenta una discusión sobre la factibilidad económica de este tipo de materiales. Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones.



Capítulo 1: Aspectos generales sobre concreto y mortero

El concreto es el material de construcción de mayor uso y su calidad depende en gran medida del conocimiento profundo que se tenga de este material, (Bahrami et al., 2020). Este primer capítulo está dedicado a la definición conceptual del concreto y el mortero, la descripción de los principales componentes que integran su matriz y sus propiedades.

1.1 Composición del Concreto

El concreto es una mezcla de cemento portland, agregados fino, agregado grueso, aire y agua (Abanto, 2017). La pasta, compuesta por cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada), lo cual crea una masa similar a una roca. Dependiendo de las exigencias del diseñador y del constructor se pueden añadir aditivos, que mejoran o modifican algunas propiedades del concreto, (Guevara Fallas et al., 2012)

Las propiedades físicas y químicas del concreto se definen por las características de sus componentes, (Paine, 2019). La masa plástica que se produce de la mezcla íntima de los componentes del concreto convencional puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad. Gradualmente el material pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido, (Cottier Caviades, 2019).

1.1.1 Cemento

En el sentido más amplio, la palabra cemento indica un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permite unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas, (Sanchez de Guzmán, 2010).

En la Tabla 1 se presentan las cinco categorías en las cuales pueden ser clasificados los cementos Portland de acuerdo con sus cualidades y usos según lo expuesto en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 30, (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1993).



Tabla 1. Tipos de cemento Pórtland, (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1993).

Cemento Pórtland	Cualidades y usos
Tipo 1	Es el destinado a obras de concreto en general, al que no se le exigen propiedades especiales
Tipo 2	Es el destinado en general a obras de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos y a obras donde se requiera moderado calor de hidratación
Tipo 3	Es el que desarrolla altas resistencias iniciales.
Tipo 4	Es el que desarrolla bajo calor de hidratación
Tipo 5	Es el que ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.

1.1.2 Agregados

Los agregados son cualquier material inerte añadido intencionalmente al concreto que ocupa un espacio rodeado por pasta de cemento, (Hewlett & Liska, 2017; Sánchez De Guzmán, 1995). La resistencia del concreto depende de la resistencia de estos componentes, sus propiedades de deformación y la adhesión entre la pasta y la superficie del agregado, (Ravitheja et al., 2021). La calidad de los agregados está determinada por el origen, por su distribución granulométrica, densidad, forma y superficie, (Andal et al., 2016).

La Tabla 2 muestra la clasificación y denominación de los agregados según su tamaño, los cuales se han clasificado en agregado grueso y agregado fino, fijando generalmente un valor en tamaño de 0,075 mm a 4,76 mm para el fino y de 4,76 mm en adelante para el grueso, (Hassan et al., 2021).

Tabla 2. Clasificación de los agregados según el tamaño, (Sánchez De Guzmán, 1995)

Tamaño de las partículas en mm	Denominación corriente	Clasificación
<0.002	Arcilla	Fracción muy fina (No recomendado)
0.002 – 0.074	Limo	



0.075 – 4.76	Arena	Agregado fino
4.76 – 19.1	Gravilla	Agregado grueso
19.1 – 50.8	Grava	
50.8 – 152.4	Piedra	
>152.4	Rajón Piedra bola	

1.1.3 Agua

El agua se puede definir como aquel componente del concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados, (Aitcin, 2016; Gokulanathan et al., 2021; Sanchez de Guzmán, 2010).

Se sabe desde hace más de 100 años que la resistencia a la compresión de la pasta de cemento y del concreto depende esencialmente de su relación A/C, (Aitcin, 2019). Una relación A/C baja, conduce a un concreto de mayor resistencia que una relación A/C alta, pero cuanto más alta sea esta relación, el concreto será más trabajable, (Abanto, 2017).

El uso del agua en la mezcla de concreto es variado, esto es debido a que el agua genera reacciones internas y externas. Para ello se clasifican en agua de mezclado, que se define como el agua que requiere el cemento para producir una pasta eficientemente hidratada, con una fluidez tal que permita la lubricación adecuada de los agregados cuando la mezcla se encuentra en estado plástico, (Sanchez de Guzmán, 2010). Por otro lado hay el agua de curado cuyo propósito es permitir las condiciones necesarias a la mezcla de para que evolucione sin interrupciones hasta que todo el cemento se hidrate y la cual es proporcionada externamente a la mezcla de concreto, (Sahoo & Kar, 2021).

1.1.4 Aditivos

Los aditivos son productos adicionados durante la mezcla del concreto diferentes a sus componentes fundamentales, cuya labor es la de cambiar las propiedades finales de la mezcla, (Fink, 2021; Sánchez De Guzmán, 1995).

La Tabla 3 presenta la clasificación de los aditivos según las propiedades que necesitan ser cambiadas en base a la Norma Técnica Colombiana 1299, (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2008).



Tabla 3. Tipos de aditivos, (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2008).

Tipo	Descripción
A	Aditivos reductores de agua
B	Aditivos retardantes
C	Aditivos acelerantes
D	Aditivos reductores de agua y retardantes
E	Aditivos reductores de agua y acelerantes
F	Aditivos reductores de agua de alto rango
G	Aditivos reductores de agua de alto rango y retardantes

1.1.4.1 Superplastificantes

Los aditivos superplastificantes son sustancias de origen químico no natural que al ser adicionadas al concreto le proporcionan una manejabilidad y reducción de agua extrema que sobrepasan a la obtenida con aditivos plastificantes convencionales, (Abanto, 2017). La trabajabilidad del concreto se puede mantener durante un largo período de tiempo, lo que es beneficioso para muchos procesos, incluidos el transporte, el vertido, el bombeo, la compactación y el vaciado, (Ahmadian Baghbaderani et al., 2021; Martin, 2006).

El mecanismo de trabajo de los superplastificantes se basan en sus estructuras moleculares y las interacciones físico-químicas que tienen lugar entre ellos y la superficie de las partículas de cemento. Estas moléculas separan físicamente las partículas de cemento al oponer sus fuerzas de atracción con fuerzas estéricas y/o electrostáticas, como resultado, el concreto es más fácil de colocar, (Nkinamubanzi et al., 2016).

1.1.4.2 Escoria de Alto Horno

La escoria de alto horno (también conocida como escoria negra) es un subproducto no metálico de la manufactura del hierro fundido en alto horno. La escoria generada en los altos hornos es esencialmente una mezcla de silicatos de calcio y aluminosilicatos, generalmente enfriados al aire o mediante chorros de agua, (López-Perales et al., 2021).

La escoria de alto horno se genera después de la adición de ciertos aditivos, principalmente, piedra caliza, o dolomita además del coque, que se usa comúnmente



como combustible, (Kumar et al., 2014). Los altos hornos producen entre 260 kg y 300 kg de escoria por cada tonelada de arrabio, (Crossin, 2015).

Después de enfriarse, la escoria de alto horno se convierte en un material pedregoso, cohesivo, ligeramente poroso, pesado y duro que aparece como un agregado triturado negro o gris oscuro, (Pellegrino et al., 2019).

La escoria de alto horno tiene muy buenas propiedades mecánicas, tiene alta resistencia a la abrasión, bajo valor de trituración de agregados y excelente resistencia a la fragmentación, (Özbay et al., 2016). Además, los resultados de Megat Johari et al., (2011), revelaron que los concretos que incluían escoria de alto horno muestran una mejor trabajabilidad en comparación con el concreto sin escoria de alto horno.

1.1.4.3 Humo de Sílice

El humo de sílice es un subproducto de la producción de silicio elemental o aleaciones que contienen silicio en hornos de arco eléctrico, (Panesar, 2019). El humo de sílice está compuesto principalmente de sílice pura en forma no cristalina, además tiene un contenido muy alto de dióxido de silicio amorfo y consta de partículas esféricas muy finas. También se encuentran pequeñas cantidades de óxidos de hierro, magnesio y álcali, (Siddique, 2011).

Explica Siddique & Chahal, (2011), el uso de humo de sílice en el concreto ofrece una alta resistencia a la compresión inicial, alta resistencia a la tracción y a la flexión, así como una muy baja permeabilidad a la intrusión de cloruros y agua, mayor durabilidad, mayor tenacidad, mayor resistencia a la abrasión. Asimismo, ofrece una resistencia superior al ataque químico de ácidos, nitratos y sulfatos, y alta resistividad eléctrica.

1.1.4.4 Fibras

La resistencia a la tracción es uno de los puntos débiles del concreto, y para solucionar este problema se desarrolló en el pasado un nuevo tipo de componente para el concreto, las fibras, de las cuales existen múltiples tipos, que varían en tamaño, forma y material (Brandt, 2008; Larsen & Thorstensen, 2020). Al agregar fibras al concreto, la fragilidad disminuye y se mejora la resistencia a la tracción, (Marcalikova et al., 2020). Las fibras deben distribuirse uniformemente por toda la mezcla de concreto para que funcionen eficazmente, (Mohammed et al., 2021).



Las fibras se pueden clasificar en distintos tipos, ya sea en formas poliméricas o metálicas, como fibra de vidrio, fibras de acero, fibras sintéticas, fibras naturales y fibras de desecho pre o posconsumo, (H. U. Ahmed et al., 2021).

1.2 Propiedades del Concreto

1.2.1 Resistencia

La resistencia se puede definir como la capacidad del concreto para soportar cargas antes de fallar. Principalmente podemos identificar la resistencia a la compresión, tracción, flexión y corte (Jaya, 2020).

En términos generales, la resistencia a la compresión del concreto es su capacidad de soportar cargas axiales, mientras que la resistencia a la tracción consiste en la ejecución de fuerzas axiales en sentido inverso a las de la compresión, (Pereira et al., 2012).

El concreto presenta una alta resistencia a los esfuerzos de compresión y muy poca a los de tracción, razón por la cual, la resistencia a la compresión simple es la propiedad a la que se le da mayor importancia, (Abanto, 2017). Los concretos se clasifican según la resistencia que puedan tener a la compresión; (i) normal cuando no es mayor a los 42 MPa, (ii) de alta resistencia cuando esta entre los 42 MPa y los 100 MPa a los 28 días de fraguado, (Sanchez de Guzmán, 2010).

De los factores más importante en la resistencia de un concreto totalmente compactado es la relación A/C. Sin embargo, para una mezcla trabajable, bien dosificada y en condiciones normales de mezclado, curado y métodos de ensayo, además de la influencia de la relación A/C, intervienen otros elementos como el tipo y calidad del cemento, las características del agregado, el tipo y cantidad de los aditivos, el fraguado y la edad, (Bhogayata & Arora, 2018; Sánchez De Guzmán, 1995).

1.2.2 Trabajabilidad

La trabajabilidad, es la facilidad que presenta el concreto fresco para ser mezclado, colocado, compactado y acabado sin segregación y exudación durante estas operaciones, (Abanto, 2017).

La trabajabilidad, es el resultado de la lubricación de las partículas de agregados con la pasta de cemento. El ajuste final de la trabajabilidad, depende del contenido de agua,



aunque está ampliamente afectada por la gradación, dosificación y contenido de aire, (Bhogayata & Arora, 2018; Sánchez De Guzmán, 1995). La trabajabilidad determina si el concreto es apto para colar in situ, si no se calificara la trabajabilidad del concreto, la calidad de la construcción se vería muy influenciada e incluso la resistencia no podría ajustarse al estándar de diseño que conduce a la seguridad de las personas, (L. Yang et al., 2021).

1.2.3 Porosidad

La porosidad del concreto está definida como la cantidad de espacios vacíos que quedan inmersos dentro de la masa del material como consecuencia de la evaporación del agua libre de la mezcla y de la presencia de aire naturalmente atrapado, (Sanches Guzman, 2002). Esta característica es la que condiciona el comportamiento posterior del concreto para absorber líquidos y su permeabilidad, siendo por lo tanto un factor de vital importancia para la durabilidad del concreto, (Mehta & Monteiro, 2014).

La porosidad del concreto está determinada por el tipo de cemento, los componentes y proporciones de la mezcla, así como por la compactación y el curado. La porosidad es muy sensible a la variación de algunos parámetros como la relación agua-cemento, el tamaño máximo del agregado, las condiciones de humedad y temperatura durante el curado, la edad del concreto y la velocidad de carga, entre otros, (Quintero Ortíz et al., 2011). También la resistencia del concreto depende en gran medida de la porosidad e interconectividad del sistema de poros en el concreto, un concreto con baja porosidad suele tener alta resistencia, (Cement Concrete & Aggregates, 2009).

La presencia de microfisuras en la zona de transición interfacial entre el agregado grueso y la matriz hace que el concreto sea un material demasiado complejo para predecir la resistencia mediante relaciones precisas, (García Estrada, 2020; López Orozco, 2004). Sin embargo, la validez general de la relación resistencia-porosidad debe respetarse porque las porosidades de las fases componentes del concreto, incluyendo la zona de transición, se convierten sin duda en una limitación a la resistencia, (Mir & Nehme, 2015).

Se debe tomar en consideración que el concreto es un material intrínsecamente poroso, debido principalmente a la formación de canales capilares como resultado de la evaporación de agua durante el proceso de fraguado, a la porosidad del agregado y a la



reducción gradual de volumen de la pasta cuando ocurre la reacción química entre el agua y el cemento, (Alsayed & Amjad, 1996; Saidi & Hasan, 2020).

1.2.4 Módulo de Young

El módulo de Young o módulo de elasticidad mide la resistencia del material a la deformación elástica, mientras mayor el valor del módulo de Young, más rígido el material, y a la inversa, los materiales con valores bajos son más fáciles de doblar bajo carga, (Jones & Ashby, 2019). El módulo de Young se basa en los principios de la ley de Hooke y es la pendiente de la recta tangencial del gráfico curva esfuerzo-deformación unitaria, (Alvarez Castellar & Mercado Castillo, 2020).

El módulo de Young del concreto también es una propiedad mecánica importante que se utiliza para determinar la dureza del concreto y su resistencia a la abrasión, (Ting et al., 2020). En general, el módulo de Young del concreto está estrechamente relacionado con su resistencia a la compresión, (Han et al., 2020), en ese sentido el módulo de Young del concreto aumentará cuando aumente su resistencia a la compresión, es por esto que se puede decir que está en una relación inversa con la relación A/C que tenga la mezcla, (Stochino et al., 2020).

1.3 Mortero

En su sentido más general el mortero es una mezcla de un material aglutinante, un material de relleno, generalmente arena, y agua, que al endurecerse presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto (Mateus Ramírez & Gelves Peña, 2020). En la mezcla de los morteros es frecuente utilizar cemento Portland como material aglutinante, pero también existen morteros de yeso, cal o de cal y cemento (Calle Delgado, 2018; Salamanca Correa, 2001).

El mortero de cemento se dosifica de acuerdo a la proporción en peso de cemento y arena. La Tabla 4 resume las diferentes proporciones de los morteros y su uso.

Tabla 4. Uso de los morteros de cemento. (Sánchez de Guzman, 2001)

Mortero	Usos
1:1	Impermeabilizaciones, rellenos
1:2	Impermeabilizaciones y pañetes de tanques subterráneos, rellenos
1:3	Impermeabilizaciones menores, pisos



1:4	Pega para ladrillos en muros y baldosines, pañetes finos
1:5	Pañetes exteriores, pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general, pañetes no muy finos.
1:6 y 1:7	Pañetes interiores, pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general, pañetes no muy finos
1:8 y 1:9	Pegas para construcciones que se van a demoler pronto, estabilización de taludes en cimentaciones.

Los morteros 1:1 a 1:3 son morteros de gran resistencia y deben hacerse con arena limpia. Los morteros 1:4 a 1:6 se deben hacer con arena limpia o semilavada. Para los morteros 1:7 a 1:9 se puede usar arena sucia, pues estos morteros tienen muy poca resistencia (Chinchillas-Chinchillas et al., 2019; Sánchez de Guzman, 2001).

Los morteros pueden tener una función estructural, como los que se utilizan en la construcción de elementos estructurales o en la mampostería estructural, en donde pueden ser de pega o de relleno. Los morteros que no tienen función estructural se emplean en recubrimiento como pañetes, repellos o revoques (Mateus Ramírez & Gelves Peña, 2020).

1.3.1 Propiedades del mortero

A continuación, se reportan algunas de las principales propiedades del mortero en estado plástico y en estado endurecido.

1.3.1.1 Propiedades del mortero en estado plástico

Las principales propiedades del mortero en estado plástico son la trabajabilidad, manejabilidad, consistencia y retención de agua.

Trabajabilidad

La trabajabilidad es la capacidad que tienen los morteros de fluir para ser aplicado con facilidad siendo manejable y extendiéndose sin dificultad (Koksal et al., 2020; Hua Zhang, 2011a).

Manejabilidad

La manejabilidad consiste en el período de tiempo en que un mortero conserva las características de su trabajabilidad, lo que involucra la compatibilidad entre el mortero y los elementos en uso, así como las condiciones de aplicación (Beningfield, 2003; B. Chen et al., 2020).



Consistencia

La consistencia puede definirse como la medida de la resistencia a la penetración del mortero en estado plástico, por un cuerpo bajo la influencia de la gravedad, o su resistencia a fluir cuando es expuesto a la fuerza de la gravedad o a la vibración mecánica (Ravindra K. Dhir et al., 2019).

Retención agua

La retención de agua se refiere a la capacidad del mortero de mantener su plasticidad cuando queda en contacto con la superficie sobre la que va a ser colocado. Para mejorar la retención de agua se puede agregar cal, o emplear aditivos plastificantes (Beningfield, 2003; Hasan et al., 2021).

1.3.1.2 Propiedades del mortero en estado endurecido

Las principales propiedades del mortero en estado endurecido son la adherencia, la resistencia compresión y la durabilidad.

Adherencia

La adherencia hace referencia a la capacidad que tienen los morteros de adherirse o resistir a la tracción y deslizamiento ante superficies verticales o con alguna inclinación (Sánchez de Guzman, 2001).

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la medida para observar la capacidad que tiene el mortero de soportar esfuerzos. Como la resistencia a la compresión está influenciada por la hidratación del cemento y esta a su vez determina las propiedades físicas del mortero endurecido, es posible que mediante los resultados de resistencia inferir otras propiedades (Ghiassi et al., 2019).

Durabilidad

La durabilidad se define como la reticencia que presenta el mortero ante agentes externos, como bajas temperaturas, penetración de agua, desgaste por abrasión y agentes corrosivos. En general, se puede decir que morteros de alta resistencia a la compresión tienen buena durabilidad (Hua Zhang, 2011b).



Capítulo 2: Propiedades físico mecánicas para concretos y morteros de agregado reciclado

En el presente capítulo se tratarán los temas relacionados con los distintos factores de los agregados reciclados (RA por sus siglas en inglés), que tienen una importancia significativa en las propiedades físico-mecánica de los concretos de agregados reciclados y los morteros de arena reciclada (RAC y RSM, por sus siglas en inglés respectivamente).

2.1 Porosidad

En comparación con los agregados naturales (NA, por sus siglas en inglés), la pasta de cemento presente en los agregados de concreto reciclado hace que tengan mayor porosidad, lo cual genera menor densidad y mayor absorción de agua, como se observó en el artículo de Eljaiek Urzola et al., (2011) y M. T. Le et al., (2019). Esta diferencia es la que genera problema en la calidad de los concretos y morteros con agregado reciclado, (Akbarnezhad & Ong, 2013). Los efectos negativos de la pasta de cemento en las propiedades de los RAC y RSM son proporcionales a su contenido en los RCA, los cuales suelen estar entre el 20% y el 70%, para los RAC, (Akbarnezhad et al., 2013).

X. Chen et al., (2013), Gómez-Soberón, (2002) y Srivastava & Singh, (2020), investigaron la influencia de la porosidad de los agregados con respecto a la resistencia a la compresión y a la tracción, y concluyeron que la relación disminuye por el aumento de los poros. Sin embargo, no pudieron determinar una ecuación que permita relacionar y predecir la porosidad respecto a la cantidad de mortero presente en los RCA, excepto en los extremos de 0% y 100% de remplazo.

2.2 Resistencia a la Compresión

La disminución de la resistencia a la compresión de los RAC y los RSM, con respecto a los concretos de agregados naturales (NAC por sus siglas en inglés) se debe probablemente a la diferencia del porcentaje de remplazo, al contenido de humedad y a la calidad del material (RCA), (R.V. Silva et al., 2015). A continuación, se analizan algunos de los factores más importantes que afectan la resistencia a compresión de los RAC y los RSM.

2.2.1 Los Porcentajes de Remplazo de RA.

Las investigaciones parecen llegar a un acuerdo en el que, a mayor porcentaje de RA como remplazo en la elaboración de concretos y morteros, existe una disminución en la



resistencia a la compresión, (Martínez-García et al., 2021; R.V. Silva et al., 2015), como se muestra en la Figura 1 y la Figura 2. Además de que el tipo, el tamaño y la calidad de los RA influye en esta disminución.

En particular, Dhir & Paine, (2004) y R. V. Silva et al., (2016) sugieren que el porcentaje de sustitución de RA debe ser entre de 30% de agregado grueso o del 20% de agregado fino en los RAC, para evitar una disminución considerable de la resistencia con respecto a los NAC. Adicional a esto, Cachim, (2009) y Ray et al., (2021), demostraron que se debe evitar por completo el uso de RA grueso proveniente de la mampostería (RMA por sus siglas en inglés), el cual solo con un 20% de reemplazo muestra disminuciones en la resistencia a la compresión considerables con respecto al NAC. H. J. Chen et al., (2003); R. V. Silva et al., (2015b), J. Yang et al., (2011) también sustentan que los agregados reciclados mixtos (MRA por sus siglas en inglés), combinación entre los RMA y los RCA, generan una pérdida en la resistencia de hasta un 40%. La Tabla 5 muestra la influencia de los distintos tipos de RA en diferentes tipos de porcentajes de sustitución en las propiedades de los RAC.

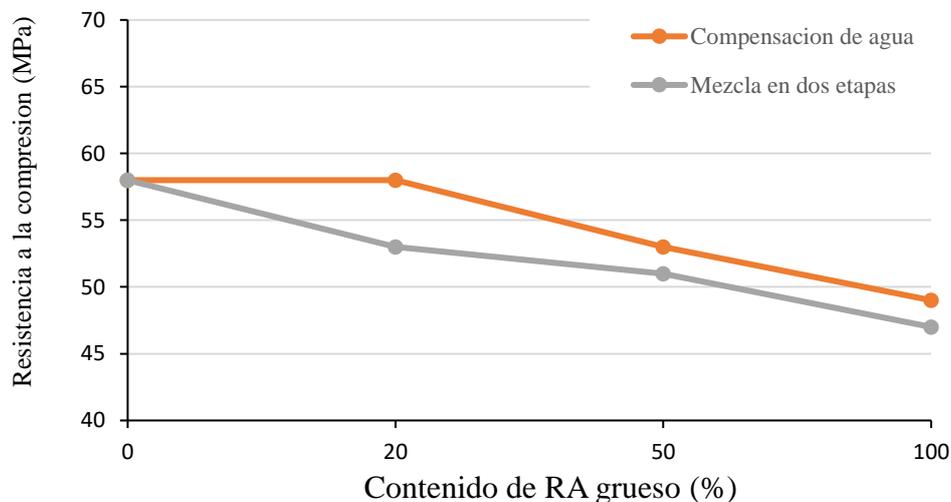


Figura 1. Resistencia a la compresión a los 28 días de mezclas de concreto con contenido creciente de RCA grueso (adaptado de R. V. Silva et al., 2015b)

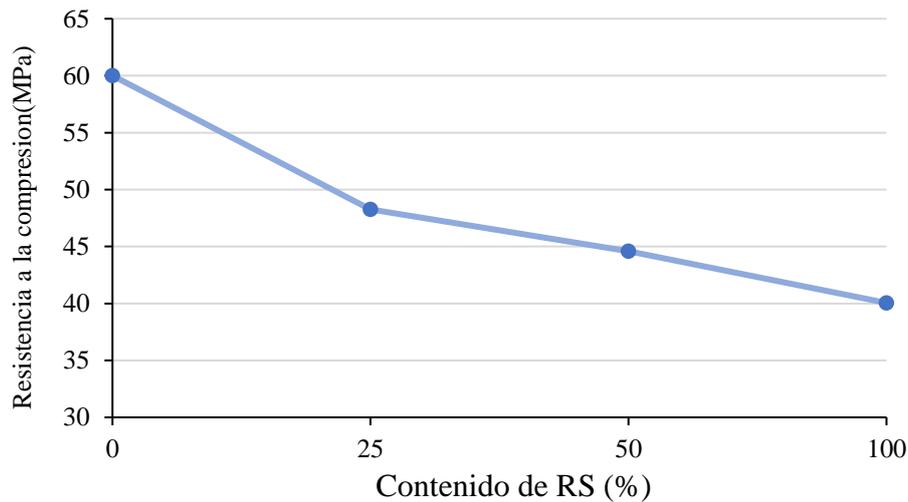


Figura 2. Resistencia a la compresión a los 28 días de mezclas de mortero con contenido creciente de arenas recicladas (RS por sus siglas en inglés) (adaptado de (Martínez-García et al., 2021))

En la literatura, a los RSM no se ha dado un porcentaje máximo de reemplazo sugerido. Sin embargo, en las investigaciones realizadas por M. T. Le et al., (2019) y Martínez-García et al., (2021) los porcentajes de sustitución con menos reducción de las propiedades se encuentran entre el 20% y el 30%. Porcentajes similares a los que recomiendan Dhir & Paine, (2004) y R. V. Silva et al., (2016) en el reemplazo de los áridos finos para los RAC. adicionalmente en las investigaciones de Letelier et al., (2021) y Raini et al., (2020) probaron RS mixto, una combinación de arena proveniente de ladrillos y concretos, lo cual dio como resultado una disminución de 14% en la resistencia a la compresión con una sustitución de 45% de NA fino. La Tabla 5 muestra la influencia de los distintos tipos de RS y diferentes tipos de porcentajes de sustitución en las propiedades de los RSM.



Tabla 5. Propiedades de los RAC con diferentes tipos de RA evaluados a los 28 días.

Tipo de agregado reciclado	Porcentaje de reemplazo	Reducción de Rc (%)	Reducción de Rt (%)	Reducción de E (%)	Porosidad (%)	Valoración económica (%)	Referencia
RCA	15, 30, 60	2.31, 5.13, 8.21	0, 2.7, 8.10	2.02, 6.40, 10.44	21.52, 41.92, 80.61	-	(Gómez-Soberón, 2002)
RMA	50	19.8	33.9	-	-	-	(J. Yang et al., 2011)
RCA	30, 50, 70, 100	+11.01, +16.43, +9.96, +5.46	-	-	-	4.67, 8.8, 12.5, 17.5	(Eljaiek Urzola et al., 2011)
MRA	17, 50, 67	23, 20, 25	-	29, 24, 26	-	-	(R. V. Silva et al., 2014)
RCA	10, 20, 30	2.27, 4.55, 3.41	11.36, 15.91, 18.18	-	-	-	(Lotfy & Al-Fayez, 2015)
RCA	25	7.11	14.29	-	-	-	(Katkhuda & Shatarat, 2017)
RCA	30, 100	5.35, 21.4	-	-	-	3.39, 3.05	(Ospina et al., 2017)
RCA	25, 50, 100	4.6, 7.76, 15.8	5, 12.5, 25	4.84, 14.36, 33.25	-	-	(Thomas et al., 2018)
RCA	50, 100	25.66, 34.67	26.19, 26.19	6.96, 26.37	12.64, 22.41	-4.79, -0.34	(Dimitriou et al., 2018)
RCA	50, 70, 100	15, 22, 25	-	-	-	-	(B. Liu et al., 2019)
RCA	50, 100	6.26, 13.89	14.36, 18.02	9.76, 22.19	-	-	(Y. Wang et al., 2019)
MRA	50, 70, 100	20, 30, 38	-	-	-	-	(B. Liu et al., 2019)
RS	33, 66, 100	2.70, 18.92, 43.24	-	-	3.24, 3.78, 4.86	-	(M. T. Le et al., 2019)
RCA	20, 100	2.31, 13.27	-	1, 7.6	-	2.07, 4.92	(Martínez-Lage et al., 2020)
MRA	20, 50, 100	4.4, 12.2, 24	-	4.8, 11.4, 21.9	-	2.36, 1.92, 3.26	(Martínez-Lage et al., 2020)
RS-M	15, 30, 45, 90	0.65, 6.45, 15.16 43.55	-	-	-	-	(Raini et al., 2020)
RCA	50, 100	9.58, 21.41	-	16.18, 36.80	-	-	(Feng et al., 2021)
MRA	50, 60, 75	25.32, 29.61, 50	-	-	16.4, 17.6, 19.2	-	(Cantero et al., 2021)
RCA	10, 20, 50	1.2, 4.66, 11.51	-	-	-	-	(Surendar et al., 2021)
RCA	30, 50	2.57, 7.34	-	0.65, 8.11	-	-	(de Azevedo et al., 2021)
RS-M	15, 30	0.24, 3.83	-	-	3.02, -3.45	-	(Letelier et al., 2021)
RS	25, 50, 100	21.54, 27.08, 33.54	-	-	-	-	(Martínez-García et al., 2021)

Rc= Resistencia a la Compresión; Rt= Resistencia a la Tracción; E= Módulo de Elasticidad; RCA= agregado de concreto reciclado; RMA= agregado de mortero reciclado; MRA= agregado reciclado mixto; RS= arena reciclada; RS-M= arena reciclada mixta. Valoración económica (%) = Los valores negativos o positivos indican una relación desfavorable o favorable respectivamente, comparada con la muestra patrón con agregado convencional del caso de estudio.



2.2.2 Contenido de Humedad de los RA

Una de las dificultades en la aplicación de los áridos reciclados de concreto es el control del contenido de agua en estos. Una alta absorción de agua y heterogeneidad del agregado reciclado causa dificultades para determinar la relación A/C exacta de las fórmulas, (H. B. Le & Bui, 2020). Además, el nivel de absorción de agua aumenta con respecto al porcentaje de sustitución del agregado, debido probablemente a la cantidad de mortero presente en los agregados, (Bai et al., 2020). Adicionalmente, Hansen (1992;2015), en su investigación concluyó que en comparación con los NA la absorción de agua de los RA puede aumentar de 2.3% a 4.6% independientemente de la resistencia del concreto original.

Para mitigar este problema se han propuesto métodos de pretratamientos como la saturación previa sumergiendo los RA al menos 24 horas en agua, (Andreu & Miren, 2014). Asimismo, Kurowa (2020), nos dice que el agua absorbida por los RA antes o durante la mezcla podría mejorar la resistencia del concreto. El método que plantea es la mezcla de dos etapas (TSMA del inglés the Two-Stage Mixing Approach) donde se introducen en agua el 50% del total de los agregados, luego es introducido el cemento. Este método permite aumentar significativamente alguna de las propiedades mecánicas finales del concreto. Por otro lado, Leite (2015), desarrolló el método de compensación de agua, el cual trata de agregar agua extra en la mezcla que será absorbida por el RA, produciendo mezclas de RAC con una disminución mínima de su resistencia. En la Figura 1 se puede ver la comparación entre los métodos de compensación de agua y mezcla en dos etapas.

En los RSM es más difícil hallar la relación A/C. Esto depende de la pasta de cemento adherida a los granos de arena y su composición química que hace que varíe el porcentaje de absorción de agua, (M. T. Le et al., 2019).

2.2.3 Calidad del Material Original.

El agregado grueso juega un papel importante en la resistencia del concreto antes de que la pasta de cemento se endurezca, (Sanchez de Guzmán, 2010). Wang et al., (2011) y Keun-Hyeok Yang et al., (2008) notaron una variación poco significativa en la resistencia a la compresión los RAC por el uso de RA de alta resistencia. Sin embargo, Tayeh et al (2020), mencionan que los concretos con RA deberían emplearse en concretos según sus características, como se muestra en la Figura 3.

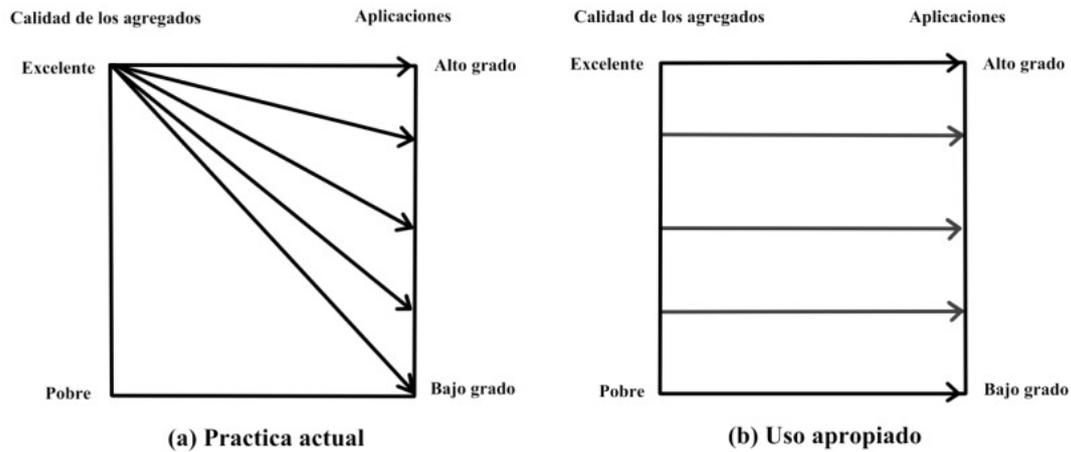


Figura 3. Uso actual (a) y adecuado de agregados (b) (adaptado de (R.V. Silva et al., 2015)).

2.3 Resistencia a la Tracción

Es normal que los RAC posean menor resistencia a la tracción en comparación con los NAC, esto depende de factores relacionados con los RA como porcentaje de sustitución, procedimiento de triturado y mezclado, que se discuten a continuación.

2.3.1 Porcentaje de Sustitución de RA

Con respecto a los porcentaje de sustitución de RA, en la literatura se encuentra que su aumento conduce a una disminución de la resistencia a la tracción, independientemente de la calidad y el tipo del agregado, (R. V. Silva et al., 2015a). En las pruebas los concretos RAC con un 100% de sustitución sea grueso o fino tuvieron una pérdida de la tracción de alrededor del 40%. Análogamente Yang, (2008), ya había presentado un estudio previo donde se observó el comportamiento del concreto introduciendo RCA de diferentes calidades y tamaño, obteniendo perdidas a la tracción similares. reforzando la teoría de R. V. Silva et al., (2014, 2015b).

2.3.2 Procedimiento de Triturado

Con respecto al procedimiento de triturado, Craig et al., (2017) y Nagataki et al., (2004) tomaron RCA burdo y lo dividieron en dos grupos para estudiar su comportamiento. En el primer grupo pasaba únicamente por una trituración primaria, mientras que para el segundo se realizaba una trituración adicional. El segundo grupo mostró un RCA con mejor calidad, debido a que este posee menos mortero viejo adherido a la superficie. Debido a esto se encontró un mejoramiento de la tracción de 4% a 12% con respecto al agregado con trituración primaria.



2.3.3 Mezclado

El método de mezclado apropiado aporta mejoras en la resistencia a la tracción, la cual se origina de una falla en una muestra de concreto a través de una grieta orientada en la dirección a la carga aplicada de manera aleatoria, (Islam, 2020). En el concreto, la energía liberada al inicio del agrietamiento no siempre es suficiente para continuar una grieta porque puede estar bloqueada por un gran poro o un material más dúctil, que necesite más energía para continuar.

La influencia de la forma del agregado no tiene un papel importante a la hora de resistir un esfuerzo de tracción. Sin embargo, la manera como estos se encuentran unidos ayuda a mitigar estas fallas, por ende el mezclado de los materiales en la elaboración del concreto juega un papel importante, (Bamforth et al., 2008; R. V. Silva et al., 2015a).

El problema para tener una buena unión de los agregados en los RAC radica en que tienden a absorber más agua que los agregados naturales, por eso es común en la literatura encontrar la aplicación de técnicas que impidan la absorción del agua libre de la mezcla, (Gumede & Franklin, 2015; Hansen, 1992). Estas técnicas son las mismas usadas para mejorar la resistencia a la compresión y que fueron presentadas anteriormente.

2.4 Módulo de Young

El módulo de Young o de elasticidad es una propiedad intrínseca de cada material, que mide la capacidad del material para deformarse elásticamente. Debido a que los RAC están hechos con RA su módulo de elasticidad puede llegar a ser hasta un 45% menor que el de los NAC, estos efectos desfavorables son producto de la pasta de cemento que poseen los RA, que presentan una menor densidad junto a una mayor absorción de agua, (Behnood et al., 2015; H. B. Le & Bui, 2020). Sin embargo, una mejora del módulo elástico se puede lograr modificando el diseño de la mezcla o con la adición de materiales cementantes suplementarios, (Kou et al., 2007; Ramakrishna et al., 2020; Tam et al., 2007).

En conclusión, las propiedades de los RAC están ligadas a la cantidad de mortero adherido en los RA, el cual es el principal causante del aumento en la porosidad. Para mitigar este problema se proponen pretratamientos de los agregados, entre los cuales lo más destacados son los métodos de control de absorción de agua. El método de compensación de agua es el más usado por la practicidad en su uso y mejoras en las resistencias en comparación con el de mezcla en dos etapas. Por otro lado, tenemos el



triturado previo que ayuda a desprender el mortero viejo adherido, que aumenta la absorción de agua de los RCA. Finalmente, los porcentajes de sustitución recomendados son del 30% y 20% de RA grueso y fino respectivamente, los cuales permiten mitigar las problemáticas de los RAC. Aunque algunos autores (Nedeljković et al., 2021) mencionan que el agregado RA finos presentan una disminución en las propiedades, resaltan que esta pequeña dosis ayuda a obtener mayor resistencia a la tracción y una mejor permeabilidad.

Para los RS, la característica más importante a controlar es la relación A/C. La cual determina la fluidez y la trabajabilidad del material, pudiendo llegar a tener mejoras considerables en sus propiedades físico-mecánicas, (M. T. Le et al., 2019).



Capítulo 3: Aditivos para el mejoramiento de concretos y morteros de agregado reciclado

Los aditivos son tan viejos como el concreto mismo, (Sanchez de Guzmán, 2010; Sánchez De Guzmán, 1995). Estos son ingredientes que se le adicionan al concreto o mortero, con el fin de mejorar las propiedades que se necesiten para cumplir con las especificaciones mínimas de la construcción en que se emplee. En donde no se pueda utilizar otros métodos o que no sea rentable económicamente, (Sánchez De Guzmán, 1995; Villalba Ruiz, 2021).

En este capítulo se analizan algunas alternativas de mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de los concretos y morteros de agregado reciclado que fueron consideradas entre las más relevantes encontradas en la literatura, como lo son superplastificante (SP del inglés superplasticizer), escoria de alto horno granulada molida (GGBFS del inglés Ground granulated blast furnace slag), humo de sílice (SF del inglés sílica fumes) y fibras naturales y artificiales.

3.1 Humo de Sílice SF

En el estudio realizado por, Pedro et al., (2017) se llevó a cabo un experimento en el que se usó 5% y 10% de SF como aditivo en muestras de concreto con proporciones de 50% y 100% de RCA fino y grueso en donde el humo sílice tuvo una mejora considerable en las propiedades mecánicas de los RAC llegando a presentar una reducción en la resistencia a la compresión de tan solo 4.79% en concretos sin ningún tipo de NA. En la Tabla 6 se presentan estos resultados.

Asimismo, Çakır & Sofyanlı, (2015), Sasanipour & Aslani, (2020) y R. V. Silva et al., (2015b) reportaron mejoras similares en las propiedades mecánicas al igual que mejoras en la durabilidad del concreto como lo son la porosidad, la permeabilidad y la penetración de cloruros. Estas mejoras son proporcionales con respecto al aumento al SF, (Chaitanya & Ramakrishna, 2021).

Para finalizar, aunque se observa una mejora en las propiedades físico-mecánicas de los RAC con respecto al aumento de la dosificación de SF, no se obtienen resultados significativamente mejores en caso de adiciones mayores al 10%, (Çakır & Sofyanlı, 2015). Adicionalmente, se hace notar que hay escasez de estudios sobre el comportamiento de este aditivo con respecto a el tamaño nominal del agregado grueso.



Sin embargo, algunos autores Çakır & Sofyanlı, (2015) y Sasanipour et al., (2019) mencionan una mejora con respecto al tamaño de los agregados.

3.2 Superplastificante SP

Bravo et al., (2017), probaron diferentes tipos de SP en RAC sin ningún tipo de tratamiento, proveniente de varias canteras, para evaluar las propiedades mecánicas y de durabilidad. Entre ellos los más usados son a base de lignosulfato, sulfonados y policarboxílico. Los SP a base de sulfonados y lignosulfato presentaron una pérdida de efectividad en cuanto se le iba añadiendo RA a la mezcla. Mientras que, con el SP a base de policarboxílico se mantuvo al margen, por esta razón decidieron evaluar solo el SP a base de policarboxílico.

Asimismo, en los resultados de Matias et al., (2013) y Silva et al., (2014) se obtuvieron resultados similares en la resistencia a la compresión entre los SP en este caso a base de lignosulfato SP1 y policarboxílico SP2, siendo la diferencia más notoria el pretratamiento en los RA.

Adicionalmente, Fiol et al., (2018) y Matias et al., (2013), realizaron investigaciones con SP y un RA de calidad en las que evidenciaron que los SP usados mejoraron la resistencia a la compresión. Sin embargo, para la resistencia a la tracción y el módulo de Young se percibe una disminución semejante a la investigación de Bravo et al., (2017). Estos resultados se presentan de manera agregada en la Tabla 6.

Se puede afirmar por lo tanto que los SP permiten mejorar significativamente la resistencia a la compresión, aunque no mejora las demás propiedades físico-mecánicas de los RAC, (Bravo et al., 2017; Fiol et al., 2018).

En conclusión, para el uso correcto de los superplastificantes es importante realizar un control de humedad de los agregados mostrados en el capítulo anterior, los superplastificantes ayudan a mantener las propiedades físico mecánicas y la reducir la demanda de pasta de cemento de los RCA. También se recalca en la literatura que los casos donde se utiliza RMA los superplastificantes pierden efectividad debido a la baja resistencia de las arcillas.

3.3 Escoria de Alto Horno Granulada GGBFS

El estudio realizado por Majhi et al., (2018), muestra el uso de la escoria de alto horno granulada molida (GGBFS del inglés Ground granulated blast furnace slag) y RA en la



elaboración de RAC. Los autores de este estudio realizaron varias combinaciones entre aditivo y agregado. La combinación con mejores resultados fue de 50% de RCA y 40% de GGBFS teniendo un mejor aprovechamiento de desperdicios sin sacrificar su rendimiento.

Por otro lado, Silva et al., (2014), menciona que la GGBFS a pesar de que genera una pérdida en las resistencias en edades tempranas, presenta una mayor resistencia posterior a los 28 días. Al igual que Majhi et al., (2018), quienes obtuvieron este aumento de resistencia a los 56 días indiferentemente del tipo de RCA usado. Estos resultados se presentan de manera agregada en la Tabla 6. El GGBFS es un aditivo que consigue mayor resistencia a largo plazo, además de un mejoramiento en la durabilidad, la porosidad y la trabajabilidad de los RAC, (Kou et al., 2011).

Finalmente, la resistencia a la compresión es la propiedad que menos mejora presenta con el uso de GGBFS a los 28 días. No obstante, cumple con las características de un concreto de baja resistencia. Adicional a eso, la relación entre la rugosidad de los RCA y las partículas finas de los GGBFS traen un mejor rendimiento en la resistencia a la tracción y flexión. Finalmente, la eficiencia de este aditivo en los RAC se empieza a observar a partir de los 90 días.

En los morteros, el uso de GGBFS no se ha investigado en forma de aditivo. Sin embargo, se ha estudiado en forma de reemplazo parcial del cemento, obteniendo mejoras de hasta un 50% en sus propiedades según el porcentaje de reemplazo, (H. Y. Wang et al., 2021; Yun et al., 2020).

3.4 Fibras Naturales y Artificiales

Xie et al., (2021) muestran una revisión bibliográfica en donde evalúan la influencia de diferentes tipos de fibras a base de polipropileno, acero, basalto y vidrio, en el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de los RAC (Tabla 6). Los autores de este estudio concluyen que todas las fibras traen un mejoramiento en las propiedades de los RAC. En específico, la fibra de acero trae un mejoramiento tanto en las propiedades físico-mecánicas como en la durabilidad. En cuanto a las fibras de basalto se presenta una mejor resistencia a altas temperatura y mejor resistencia a la corrosión.

No se pudo encontrar investigaciones de la implementación de fibras naturales en RAC. Sin embargo, Esguerra Torres & Forero Vega, (2020), realizaron una investigación de las



fibras naturales más usadas a nivel mundial y en Colombia. Las cuales presentan propiedades intrínsecas similares a las fibras sintéticas de polipropileno usadas en la investigación de Jing Xie et al., (2021). En la Tabla 7, se pueden ver las propiedades más significativas de las fibras naturales y sintéticas. Por lo cual, se podría asumir un rendimiento similar de las fibras naturales en los RAC comparándolas con las de polipropileno.

Sahin et al., (2021; 2021) han llevado investigaciones del uso de dos tipos de fibra a base de polivinilo y basalto para mejorar las propiedades de los RSM. Así, han conseguido resultados de un aumento a la resistencia a la compresión de un 26.56% y 23.11% para las a base de polivinilos y basalto respectivamente, con un 100% de sustitución de agregado fino y con una tendencia a aumentar en edades futuras.

En conclusión, las fibras son un aditivo que presenta mejoras principalmente en la resistencia a la tensión, aunque esta mejora depende de que tenga una distribución homogénea en la mezcla de concreto. A pesar de esto, no se puede detallar de manera general el beneficio que tienen en los concretos debido a que esto depende del tipo de fibra. Por ejemplo, las fibras de acero presentan una mejora en el rendimiento de los RAC, las fibras de polipropileno presentan mejor trabajabilidad y mejoras equitativas en las propiedades mecánicas de los RAC y las fibras de vidrio tuvieron un mejor resultado al reducir la porosidad.



Tabla 6. Influencia de los aditivos en las propiedades de los RAC evaluados a los 28 días.

Tipo de aditivo	Porcentaje de adición (%)	Porcentaje de reemplazo	Variación de Rc (%)	Variación de Rt (%)	Variación de E (%)	Porosidad (%)	Referencia
SP2	0.42, 0.45, 0.48	25, 50, 100	-1.92 ~-7.69	-	-	-	(Matias et al., 2013)
	1	10, 25, 50, 100	-5.83 ~-26.25	0 ~-20.83	14.53 ~-28.08	-	(Bravo et al., 2017)
	1	10, 25, 50, 100	-14.4 ~-17.64	-10.42 ~-22.92	3.45 ~-30.30	-	(Bravo et al., 2017)
	1	10, 25, 50, 100	-3.85 ~-52.65	4.17~-39.58	7.88 ~-33.99	-	(Bravo et al., 2017)
SP1	0.5	25, 50, 100	-1.92 ~-5.77	-	-	-	(Matias et al., 2013)
SP1-SP2	0.62, 0.78, 0.98	20, 50, 100	0.38 ~21.03	-3.27~-6.36	7.65 ~-5.558	-5.92 ~-7.14	(Fiol et al., 2018)
	0.56, 0.7, 0.89	20, 50, 100	1.22 ~14.91	-1.70~-6.60	4.34 ~-7.42	-5.8 ~-6	(Fiol et al., 2018)
GGBFS	55	50	-25	-	-	-	(R. V. Silva et al., 2014)
	20, 40, 60	50	-3.2 ~-16.4	-0.54 ~-5.94	-	-3.8 ~-7.23	(Majhi et al., 2018)
Fibra-V	0.25, 0.5, 0.7, 1	50, 100	1.25 ~4.97	12.00~24.00	-	-4.54~-54.55	(Ali & Qureshi, 2019)
	0.5	50, 100	3.45 ~6.25	16.67~26.09	-	-	(Ali et al., 2020)
Fibra-P	0.5, 0.75, 1	25, 30, 55	-	-0.33~31.02	-7.78~0.32	-	(Akça et al., 2015)
	0.1	50	6.19	0.96	2.26	-	(Fang et al., 2018)
	0.5, 0.75, 1	100	2.28 ~9.24	-1.87~12.02	-34.03~5.37	-	(Das et al., 2018)
	1, 2	25, 50, 75, 100	9.41 ~44.99	25.54~85.61	-	-	(Hanumesh et al., 2018)
	0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9	50, 100	-	-3.59~11.90	-3.38~13.49	-	(T. W. Ahmed et al., 2020)
Fibra-PV	0.4, 0.8, 1.2	100	15.93~26.53	-	-	-15.52~-24.74	(Sahin et al., 2021)
Fibra-B	0.1, 0.3, 0.5, 1, 1.5	20	3.00 ~9.00	3.00~40.00	-	-	(Katkhuda & Shatarat, 2017)
	0.5, 1, 1.5	25, 50, 100	-6.13 ~1.65	5.87~41.72	-	-	(Alnahhal & Aljidda, 2018)
	0.05, 0.1, 0.2	50	-0.99 ~-10.64	-	-6.45~1.29	-	(Fang et al., 2018)
	0.25, 0.5, 1	20, 40, 60	0.00 ~25.00	-11.01~54.98	-19.65~34.94	-	(Dilbas & Çakır, 2020)
	0.4, 0.8, 1.2	100	16.45~23.11	-	-	-7.85~-12.05	(Şahin et al., 2021)
Fibra-A	0.5, 1, 1.5, 2	30, 50, 100	1.56 ~11.14	-	14.48~44.44	-	(Gao et al., 2017)
	0.5, 1, 1.5, 2	30, 50, 100	1.56 ~11.14	-	16.71~54.87	-	(Gao & Zhang, 2018)
	0.1	50	-4.31	2.9	-	-	(Fang et al., 2018)
	1, 2, 3	30, 70, 100	3.90 ~18.60	-	6.00~18.00	-	(Kachouh et al., 2019)
	0.3, 0.5, 0.7, 1	30, 50, 70, 100	-10.31 ~26.49	33.30~110.00	-16.98~8.09	-	(Ramesh et al., 2019)
	0.5, 1, 1.5, 2	30, 50, 100	9.21 ~30.43	-	18.53~54.87	-	(Gao et al., 2020)
SF	5, 10	50, 100	0.32~6.32	-17.72~-24.61	-0.21~-16.42	-	(Pedro et al., 2017)
	10	25, 50	3.08~10.53	-	-	-	(Cassiani et al., 2021)

Rc= Resistencia a la Compresión; Rt= Resistencia a la Tracción; E= Módulo de Elasticidad; Fibra A= fibra a base de acero; Fibra B= fibra a base de basalto; Fibra P= fibra a base de polipropileno; Fibra PV= polivinilo; Fibra V= fibra a base de vidrio; SP1= lignosulfato; SP2= policarboxílico; SF= humo sílice; GGBFS= escoria de alto horno granulada molida.



Tabla 7. Propiedades de fibras sintéticas y naturales (adaptado de Esguerra Torres & Forero Vega, (2020) y Xie et al., (2021)).

Tipo de fibra	Longitud (mm)	Densidad (g/cm³)	Fuerza de tensión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)
Acero	32 - 60	7.82 - 7.85	600 - 1030	210
Basalto	18 - 32	2.65 - 2.75	3200 - 4800	40 - 115
Polipropileno	12 - 50	0.90 - 0.91	450 - 700	3 - 10
Vidrio	6 - 18	0.87	1700 - 2000	72
Algodón	-	1.5 -1.6	287 - 597	5.5 - 12.6
Cáñamo	-	1.07	389 - 900	35
Coco	-	1.15	108 - 252	4 - 6
Hoja de piña	10	1.4	413 - 1627	34 - 82
Moriche	20	-	406.63 - 763.43	6.73 - 12.33
Plátano	150	1.35	529 - 759	17.85

Considerando las alternativas discutidas en la Tabla 6 para mejorar las características físico-mecánicas de los RAC, se pueden delimitar algunos lineamientos generales útiles en la práctica para mitigar las pérdidas en las propiedades físico-mecánicas en los concretos y morteros debidos al uso los RCA.

Los superplastificantes por sí solos representan una alternativa poco recomendable ya que no ayudan a mitigar las pérdidas de resistencia a la tracción y compresión generada por los RCA. Sin embargo, cuando se combinan diferentes superplastificantes se observan mejoras en la resistencia a la compresión y una reducción de la porosidad en los RAC. Por otro lado, esta combinación necesita un buen control de la humedad de la mezcla para maximizar su potencial. Cuando se analiza la GGBFS con porcentajes remplazo de un 20% como alterativa, se observa una disminución en la porosidad y una ligera disminución de la resistencia a la compresión, demarcando una neutralidad en esta alternativa.

Con respecto al uso de SF como alternativa, se observa un mejoramiento notable en la resistencia hasta llegar al 10% de remplazo, sin embargo, en la literatura no se encontraron datos que sustenten sus efectos en la porosidad de los RAC. Finalmente, la adición de fibras muestra los mejores resultados en los RAC llegando a tener mejoras de hasta el 85% en la resistencia a la tracción y reducir un 54% la porosidad. Hay que tener en cuenta que estos datos varían según el tipo de fibra usada, como se puede observar en la Tabla 7.



En conclusión, se puede decir que de las alternativas estudiadas para mejorar las características físico-mecánicas de los RAC, la que presentó resultados más satisfactorios fue la fibra de polivinilo.



Capítulo 4. Factibilidad económica

El mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto de agregados reciclado (RAC, por sus siglas en inglés) constituye el enfoque principal de esta monografía. Sin embargo, abordar el tema de la factibilidad económica de este tipo de concreto es fundamental para su futuro uso a nivel comercial. En este capítulo se presentarán y discutirán distintos estudios con respecto a la viabilidad económico del uso de agregados reciclados (RA, por sus siglas en ingles).

Ohemeng & Ekolu, (2020), realizaron un análisis comparativo de los costos y beneficios de la producción de agregados de concreto reciclados y naturales en Sudáfrica, en donde concluyeron que el costo a largo plazo de producir una tonelada de agregado fino manufacturado fue 49% más alto que el del agregado fino de concreto reciclado. De igual manera, en Australia, Tam, (2008), llevo a cabo un estudio comparando el beneficio económico de producir agregados de forma convencional, con el beneficio de producir agregados a través del reciclaje de concreto. En dicho estudio encontró que el del método de reciclaje de concreto genera un beneficio neto positivo para la industria de la construcción australiana de aproximadamente USD 30,916,000 al año, mientras que el método convencional causa un beneficio neto negativo de aproximadamente de USD 44,076,000 al año.

Por otro lado, Hameed (2009), encontró que el uso de un triturador portátil para el reciclaje de residuos de concreto supuso un ahorro en los costes del 60% en la producción de RAC. Este ahorro se genera en contraposición con la producción de concreto convencional hecho con agregado natural (NA, por sus siglas en inglés)

En Chipre, Dimitriou et al., (2018), llevaron a cabo un análisis de costos, comparando los precios de producción de un concreto de agregado natural (NAC, por sus siglas en ingles), un concreto de RA sometido a un método de tratamiento para remover el mortero adherido (RAC-T) y un concreto de RA sin tratamiento (RAC-F). Encontraron que los agregados del RAC-F son económicamente más convenientes. Por otro lado, el método de tratamiento para los agregados del RAC-T elevó el costo de los agregados con respecto a los RAC-F, y mostró un costo menor que el de los NA. Finalmente hallaron que si bien el precio de los agregados del RAC-F fueron menores que los del RAC-T, las mezclas del



RAC-F era más caras ya que requería mayor cantidad de superplastificante para alcanzar el mismo nivel de trabajabilidad. Los autores advierten que en Chipre los superplastificantes son importados y su costo es extremadamente alto, de ahí el mayor costo de las mezclas de RAC-F. Por ende, en los países donde se producen localmente dichos superplastificantes, el costo de los RAC-F sería mucho menor.

En Colombia, Romero Mendoza, (2008), concluyó que el valor de un metro cúbico de agregado de concreto reciclado (RCA, por sus siglas en inglés) es 59% menor que el valor promedio de un metro cúbico de grava de río. Por otro lado, Castellanos Giraldo et al., (2017), estimaron el coste del concreto para la construcción de una edificación regular de 5 pisos. Compararon los costos de la utilización de concreto con NA y concreto con un porcentaje de sustitución del 25% de RA. Obteniendo un ahorro del 0.97% en el precio del concreto con RA para toda la edificación.

En Bogotá, Escandon Mejia, (2011), halló un ahorro del 25% en el precio del metro cúbico de RA, lo que se tradujo en una reducción del 7.5% en el precio de la producción de RAC (para un porcentaje de reemplazo del 30%), con respecto al precio de un NAC. De igual forma Urzola et al., (2011), en Cartagena, encontraron un ahorro de hasta un 17.5% en distintos concretos producidos a partir de escombros triturados.

En contraposición a lo anterior, Ospina et al., (2017), obtuvo un incremento del 4.77% en el costo de la mezcla del RAC en comparación con el precio de una mezcla patrón de NAC. Si bien el precio del RA es un 25% menor que el precio del NA, el costo total aumentó debido a que las mezclas de RAC necesitan más cemento para obtener una buena resistencia.

Asimismo, Duran et al., (2006), describen los factores que hacen económicamente viable el reciclaje de CDW presentando un modelo que sigue el principio “quien contamina paga”, principio por el cual el productor de CDW y el usuario de NA deben asumir los costos medioambientales de sus operaciones. Esto los lleva a encontrar soluciones ambientalmente aceptables con el propósito de minimizar los costos asociados, creándose así un mercado de reciclaje de CDW.

En consecuencia, la viabilidad económica de los RA tendrá lugar cuando el costo del relleno sanitario excede el costo de llevar los desechos al centro de reciclaje y el costo de usar NA sobrepase al costo de usar RA (Aslam et al., 2020; Begum et al., 2006; Calvo et



al., 2014). Una vez que se presenten estas situaciones, el reciclaje será económicamente factible, ya que entonces se convierte en una opción menos costosa que el uso de vertederos y/o NA (J. Liu et al., 2020; Zhao et al., 2010).

Tal como se ha visto, el agregado producido por los métodos de reciclaje es más económico a largo plazo que el NA. Sin embargo, la utilización de aditivos empleados en las mezclas de RAC hace que en ocasiones los RAC no tengan un menor costo en comparación con los NAC.

Finalmente, Martínez-Lage et al., (2020) mencionan que “Las diferencias de coste provocadas por el uso de áridos reciclados en lugar de agregados naturales depende de muchos factores, y uno de los factores clave es la ubicación”. Lo anterior no hace referencia solo al precio de la distancia de acarreo de los agregados sino también al costo que pueden alcanzar los aditivos en zonas donde tales aditivos no se producen localmente.



Capítulo 5: Conclusiones

El objetivo de esta monografía fue discutir alternativas de mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de los concretos y morteros a base de agregados reciclados con el fin de proponer métodos de aprovechamiento que permitan su uso técnicamente viable. A partir de una revisión bibliográfica se realizó una discusión de la literatura y se llegó a una serie de conclusiones que pueden servir como base para investigaciones experimentales futura. A continuación, se reportan los principales hallazgos organizados por temáticas.

En específico con respecto a las alternativas de mejoramiento los estudios encontrados concluyen que:

- De acuerdo a la literatura, el uso de SF en los RAC tiene una mayor efectividad en agregados de concreto reciclado con un tamaño nominal más grande. Sin embargo, los aumentos significativos en las mejoras de las propiedades se dan hasta el 10% de adición.
- Según un el consenso de distintos autores, la adición de SP puede compensar la pérdida de las propiedades mecánicas resultante de la introducción de RA, pero son menos eficaces que en el NAC. Además, la eficiencia de los SP en las propiedades mecánicas aumenta en cuanto mayor sea el poder de reducción del agua del aditivo.
- La bibliografía revisada concluye que el uso de GGBFS trae un mejoramiento de las resistencias mecánicas en los RAC a mayor tiempo de fraguado, aunque con respecto a la resistencia a la compresión no presenta mejoras significativas. En los morteros la GGBFS solo se ha estudiado a manera de reemplazo del cemento, reportando mejoras mecánicas de hasta un 50% según el nivel de sustitución en la mezcla.
- De los aditivos recopilados, se indica en la literatura que las fibras son el aditivo que presentan un mayor rendimiento para mejorar las propiedades físico-mecánicas de los RAC, aunque estas mejoras están ligadas al tipo de fibra usada y a su distribución homogénea en el concreto. Asimismo, en los morteros también se obtiene una mejora de las propiedades físico-mecánicas, superando hasta en un 26% el mortero de control.



A continuación, se reportan los principales hallazgos encontrados con respecto a los RAC y RSM:

- Diversos autores concluyeron que en general, a medida que aumenta el nivel de sustitución del agregado reciclado, se produce una disminución en las propiedades físico-mecánicas de los RAC y RSM. Los RA finos suelen tener hidratos provenientes de la molienda del mortero viejo adherido, eso hace que tenga mayor absorción de agua y menor densidad, por lo cual los estudios encontrados recomiendan una baja tasa de sustitución para las mezclas de RAC y RSM.
- De los materiales reciclados identificados en la literatura, los más adecuados para producir RAC son los agregados de concreto reciclado y los agregados reciclados mixtos. Esto debido a que presentan la menor pérdida de las propiedades físico-mecánicas. Por otro lado, en la literatura no se recomienda el uso de RMA, dado a que al tener menor densidad y alta tasa de absorción que los agregados anteriores presenta disminuciones altas en las propiedades de los RAC.
- El uso de ciclos consecutivos de trituración en los materiales de hormigón hace que la fracción gruesa del agregado de concreto reciclado pierda parte del mortero adherido, lo que hace esta opción técnicamente más viable.
- De los métodos de control de humedad descritos en la literatura, el método por compensación de agua es el que presenta mejores resultados para los RAC, llegando a superar al concreto de control en mezclas con una sustitución de 20% de agregado de concreto reciclado. Por otro lado, en los RSM la determinación de A/C óptima conlleva una mejora significativa en las propiedades del material. Esta determinación se vuelve más complicada con los agregados más finos.

Con respecto a la factibilidad económica del uso de agregado reciclado como sustituto en mezclas de concreto, la literatura revisada concuerda sobre unos conceptos básicos que se reportan a continuación:

- La producción de agregados de concreto reciclado tiene un menor costo que la extracción tradicional de NA, lo que se traduce en mezclas de RAC más económicas que las mezclas de concreto convencionales.



-
- Sin embargo, el proceso de tratamiento de los agregados de concreto reciclado y el añadir aditivos a los RAC puede aumentar el valor el total de los concretos.

Estas conclusiones se consideran importantes ya que hacen claridad sobre algunos aspectos claves del uso de RCA como sustituto en mezclas de concreto. En la literatura no se encuentran con mucha frecuencia estudios que enfrenten la temática de manera transversal considerando propiedades mecánicas y factibilidad económica al mismo tiempo de diferentes tipos de aditivos en los RAC y RSM. Por lo tanto, este documento sienta un precedente relevante a tener en cuenta para futuras investigaciones aplicadas en los laboratorios de la Universidad de Cartagena a nivel nacional e internacional.



Recomendaciones

Para futuras investigaciones se recomienda el estudio del uso de fibras naturales como aditivo para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas en los concretos de agregado reciclado (RAC) y morteros de arena reciclada (RSM). Asimismo, se sugiere la investigación de aditivos como el humo sílice y escoria de alto horno granulada como aditivos en los RSM.

De igual manera, se recomienda realizar investigaciones sobre las combinaciones de diferentes tipos de aditivos y las distintas bases de estos para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de los RAC y RSM.

Por último, se recomienda realizar estudios sobre los costos en Colombia de los aditivos como superplastificantes, humo de sílice, escoria de alto horno granulada y fibras naturales y artificiales para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de los RAC y los RSM, y estudiar de manera integral la factibilidad económica de los concretos con agregado reciclado para su efectivo uso en la industria de la construcción.



Bibliografía

- Abanto, F. (2017). *Tecnología Del Concreto Teoría Y Problemas Ing Flavio Abanto Castillo - uDocz* (pp. 15–30).
- Abedalqader, A., Shatarat, N., Ashteyat, A., & Katkhuda, H. (2021). Influence of temperature on mechanical properties of recycled asphalt pavement aggregate and recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 269, 121285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121285>
- Ahmadian Baghbaderani, H., Masood, A., Alvarez, K. L., Mathúna, C., McCloskey, P., & Stamenov, P. (2021). CALPHAD-assisted development of in-situ nanocrystallised melt-spun Co-Fe-B alloy with high Bs (1.57 T). *Journal of Alloys and Compounds*, 877, 160194. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160194>
- Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Hilal, N., Mohammed, A. A., & Sherwani, A. F. H. (2021). Use of recycled fibers in concrete composites: A systematic comprehensive review. *Composites Part B: Engineering*, 215(March), 108769. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108769>
- Ahmed, T. W., Ali, A. A. M., & Zidan, R. S. (2020). Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 241, 118010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118010>
- Ahmed, W., & Lim, C. W. (2021). Production of sustainable and structural fiber reinforced recycled aggregate concrete with improved fracture properties: A review. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123832. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123832>
- Aitcin, P. C. (2016). Water and its role on concrete performance. In *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 75–86). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00005-9>
- Aitcin, P. C. (2019). The influence of the water/cement ratio on the sustainability of concrete. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 807–826. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00017-4>
- Akbarnezhad, A., & Ong, K. C. G. (2013). Separation processes to improve the quality of recycled concrete aggregates (RCA). In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.246>
- Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., Zhang, M. H., & Tam, C. T. (2013). Acid treatment technique for determining the mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of Testing and Evaluation*, 41(3), 1–10. <https://doi.org/10.1520/JTE20120026>



- Akça, K. I. R., Çakir, Ö., & Ipek, M. (2015). Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 620–630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133>
- Ali, B., & Qureshi, L. A. (2019). Influence of glass fibers on mechanical and durability performance of concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 228, 116783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116783>
- Ali, B., Qureshi, L. A., Shah, S. H. A., Rehman, S. U., Hussain, I., & Iqbal, M. (2020). A step towards durable, ductile and sustainable concrete: Simultaneous incorporation of recycled aggregates, glass fiber and fly ash. *Construction and Building Materials*, 251, 118980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118980>
- Alnahhal, W., & Aljidda, O. (2018). Flexural behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 169, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.135>
- Alsayed, S. H., & Amjad, M. A. (1996). Strength, Water Absorption and Porosity of Concrete Incorporating Natural and Crushed Aggregate. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 8(1), 109–119. [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30642-1](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30642-1)
- Alvarez Castellar, J., & Mercado Castillo, K. (2020). Incidencia de las variaciones en la dosificación del aditivo superplastificante y el tamaño máximo nominal del agregado petreo tipo calizo en la mezcla de concreto, sobre sus propiedades mecánicas. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*.
- Andal, J., Shehata, M., & Zacarias, P. (2016). Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality. *Construction and Building Materials*, 125, 842–855. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.110>
- Andreu, G., & Miren, E. (2014). Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054>
- Aslam, M. S., Huang, B., & Cui, L. (2020). Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of Environmental Management*, 264(November 2019), 110445. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>
- Bahrami, N., Zohrabi, M., Mahmoudy, S. A., & Akbari, M. (2020). Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, 31(September 2019), 101361. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101361>
- Bai, G., Zhu, C., Liu, C., & Liu, B. (2020). An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 240, 117978.



<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117978>

- Bamforth, P., Chisholm, D., Gibbs, J., & Harrison, T. (2008). Properties of Concrete for use in Eurocode 2. *A Cement and Concrete Industry Publication*, 59.
- Begum, R. A., Siwar, C., Pereira, J. J., & Jaafar, A. H. (2006). A benefit-cost analysis on the economic feasibility of construction waste minimisation: The case of Malaysia. *Resources, Conservation and Recycling*, 48(1), 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.01.004>
- Behnood, A., Olek, J., & Glinicki, M. A. (2015). Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M5' model tree algorithm. *Construction and Building Materials*, 94, 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.055>
- Benachio, G. L. F., Freitas, M. do C. D., & Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
- Beningfield, N. (2003). Masonry mortars. In *Advanced Concrete Technology* (pp. 1–23). Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1016/B978-075065686-3/50293-7>
- Bhogayata, A. C., & Arora, N. K. (2018). Workability, strength, and durability of concrete containing recycled plastic fibers and styrene-butadiene rubber latex. *Construction and Building Materials*, 180, 382–395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.175>
- Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 86(1–3), 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>
- Bravo, M., de Brito, J., Evangelista, L., & Pacheco, J. (2017). Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. *Construction and Building Materials*, 153, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.103>
- Bravo, M., de Brito, J., Evangelista, L., & Pacheco, J. (2018). Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. *Construction and Building Materials*, 168, 818–830. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.176>
- Cachim, P. B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1292–1297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023>
- Çakır, Ö., & Sofyanlı, Ö. Ö. (2015). Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete. *HBRC Journal*, 11(2), 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.06.002>



- California Integrated Waste Management Board. (2000). *Designing With Vision: A Technical Manual for Material Choices in Sustainable Construction*. July, 42.
- Calkins, M. (2009). *Materials for sustainable sites: a complete guide to the evaluation, selection, and use of sustainable construction materials*.
- Calle Delgado, M. A. (2018). *Influencia de la granulometría y el tipo de cemento en la contracción por secado de morteros estructurales*. Universidad de Piura.
- Calvo, N., Varela-Candamio, L., & Novo-Corti, I. (2014). A dynamic model for construction and demolition (C&D) waste management in Spain: Driving policies based on economic incentives and tax penalties. *Sustainability (Switzerland)*, 6(1), 416–435. <https://doi.org/10.3390/su6010416>
- Cantero, B., Bravo, M., de Brito, J., Sáez del Bosque, I. F., & Medina, C. (2021). Water transport and shrinkage in concrete made with ground recycled concrete-added cement and mixed recycled aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 118(January). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103957>
- Carrasco, R. (2018). *Aplicación del uso de los residuos de construcción para la fabricación de bloques de hormigón en la ciudad de Riobamba, análisis de costo e impacto ambiental*. 131. [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/14857/TESIS MAS 2018 %28RAÚL CARRASCO%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/14857/TESIS_MAS_2018_%28RAÚL_CARRASCO%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cassiani, J., Martínez-Arguelles, G., Peñabaena-Niebles, R., Keßler, S., & Dugarte, M. (2021). Sustainable concrete formulations to mitigate Alkali-Silica reaction in recycled concrete aggregates (RCA) for concrete infrastructure. *Construction and Building Materials*, 307(September), 124919. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124919>
- Castellanos Giraldo, J. V., Rivera Martínez, F. D., & Roa Morales, M. (2017). *Comparación estructural y estimación de costos de la utilización de Concreto con agregados naturales y concreto con residuos de construcción y demolición (r.c.d.) Como agregado*. (Vol. 24, Issue 9).
- Çelik, A., Yaman, H., Turan, S., Kara, A., Kara, F., Zhu, B., Qu, X., Tao, Y., Zhu, Z., Dhokia, V., Nassehi, A., Newman, S. T., Zheng, L., Neville, A., Gledhill, A., Johnston, D., Zhang, H., Xu, J. J., Wang, G., ... Dutta, D. (2018). Shaping of engineering ceramics by electro, chemical and physical processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 1(1), 1–8.
- Cement Concrete & Aggregates. (2009). Chloride Resistance of Concrete. *Cement Concrete & Aggregates Australia*, June, 1–37.
- Chaitanya, M., & Ramakrishna, G. (2021). Enhancing the mechanical properties of pervious recycled aggregate concrete using silicafumes. *Materials Today: Proceedings*, 46(xxxx), 634–637. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.549>



- Chen, B., Qiao, G., Hou, D., Wang, M., & Li, Z. (2020). Cement-based material modified by in-situ polymerization: From experiments to molecular dynamics investigation. *Composites Part B: Engineering*, *194*, 108036.
- Chen, H. J., Yen, T., & Chen, K. H. (2003). Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, *33*(1), 125–132. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00938-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00938-9)
- Chen, X., Wu, S., & Zhou, J. (2013). Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. *Construction and Building Materials*, *40*, 869–874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072>
- Chinchillas-Chinchillas, M. J., Orozco-Carmona, V. M., Gaxiola, A., Alvarado-Beltrán, C. G., Pellegrini-Cervantes, M. J., Baldenebro-López, F. J., & Castro-Beltrán, A. (2019). Evaluation of the mechanical properties, durability and drying shrinkage of the mortar reinforced with polyacrylonitrile microfibers. *Construction and Building Materials*, *210*, 32–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.178>
- Chuai, X., Lu, Q., Huang, X., Gao, R., & Zhao, R. (2021). China's construction industry-linked economy-resources-environment flow in international trade. *Journal of Cleaner Production*, *278*, 123990. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123990>
- Cottier Caviedes, J. L. (2019). *Tecnologia del concreto*. 1–14.
- Craig, G., Chang, B., Oh, E., & Leitch, K. (2017). Recycled aggregate concrete. In *67th Annual Conference and Expo of the Institute of Industrial Engineers 2017*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100985-7.00010-8>
- Crossin, E. (2015). The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute. *Journal of Cleaner Production*, *95*, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.082>
- Das, C. S., Dey, T., Dandapat, R., Mukharjee, B. B., & Kumar, J. (2018). Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, *189*, 649–659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.036>
- de Azevedo, V. da S., de Lima, L. R. O., Vellasco, P. C. G. d. S., Tavares, M. E. d. N., & Chan, T. M. (2021). Experimental investigation on recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, *187*(September), 106930. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106930>
- Dhir, R K, & Paine, K. A. (2004). Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high-strength concrete. *1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management*, 108–121.
- Dhir, Ravindra K., de Brito, J., Silva, R. V., & Lye, C. Q. (2019). Use of Recycled



Aggregates in Mortar. In *Sustainable Construction Materials*.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100985-7.00006-6>

- Dilbas, H., & Çakır, Ö. (2020). Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119216. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119216>
- Dimitriou, G., Savva, P., & Petrou, M. F. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137>
- Duran, X., Lenihan, H., & O'Regan, B. (2006). A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling—the case of Ireland. *Resources, Conservation and Recycling*, 46(3), 302–320. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.08.003>
- Eljaiek Urzola, M., Quiñones Bolaños, E., & Mouthon Bello, J. (2011). *Aprovechamiento de los escombros generados en actividades de demolición de placas de pavimento en Cartagena - Colombia*. 554–559.
- Escandon Mejia, J. C. (2011). *Diagnóstico técnico y económico del aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en edificaciones en la ciudad de bogotá* (Vol. 64). Pontificia Universidad Javeriana.
- Esguerra Torres, Y. E., & Forero Vega, L. A. (2020). *Caracterización mecánica de propiedades mecánicas de fibras naturales para usos en concretos hidráulicos*.
- Fang, S. E., Hong, H. S., & Zhang, P. H. (2018). Mechanical property tests and strength formulas of basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Materials*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/ma11101851>
- Feng, J., Yin, G., Tuo, H., Wen, C., Liu, Z., Liang, J., & Zhang, Y. (2021). Uniaxial compressive behavior of hook-end steel and macro-polypropylene hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 304(June), 124559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124559>
- Fink, J. (2021). *Petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids*. Gulf Professional Publishing.
- Fiol, F., Thomas, C., Muñoz, C., Ortega-López, V., & Manso, J. M. (2018). The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 182, 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.132>
- Gao, D., & Zhang, L. (2018). Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 159, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.073>
- Gao, D., Zhang, L., & Nokken, M. (2017). Compressive behavior of steel fiber reinforced



- recycled coarse aggregate concrete designed with equivalent cubic compressive strength. *Construction and Building Materials*, 141, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.136>
- Gao, D., Zhang, L., Zhao, J., & You, P. (2020). Durability of steel fibre-reinforced recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 232, 117119. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117119>
- García Estrada, J. M. (2020). *GUÍA TEÓRICA BÁSICA DEL CONCRETO, COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN Guatemala, Guatemala*. 218.
- Ghiassi, B., Vermelfoort, A. T., & Lourenço, P. B. (2019). Masonry mechanical properties. *Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures: From Theory to Application*, 239–261. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102439-3.00007-5>
- Gokulanathan, V., Arun, K., & Priyadharshini, P. (2021). Fresh and hardened properties of five non-potable water mixed and cured concrete: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 309(June), 125089. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125089>
- Gómez-Soberón, J. M. V. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1301–1311. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00795-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00795-0)
- Guevara Fallas, G., Hidalgo Madrigal, C., Pizarro García, M., Rodríguez Valenciano, I., Rojas Vega, L. D., & Segura Guzmán, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Revista Tecnología En Marcha*, 25(2), 80. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i2.1632>
- Gumede, M. T., & Franklin, S. O. (2015). Studies on Strength and Related Properties of Concrete Incorporating Aggregates from Demolished Wastes: Part 2—Compressive and Flexural Strengths. *Open Journal of Civil Engineering*, 05(02), 175–174. <https://doi.org/10.4236/ojce.2015.52017>
- Hameed, M. (2009). *Impact of transportation on cost, energy, and particulate emissions for recycled concrete aggregate*. 88.
- Han, T., Siddique, A., Khayat, K., Huang, J., & Kumar, A. (2020). An ensemble machine learning approach for prediction and optimization of modulus of elasticity of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 244, 118271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118271>
- Hansen, T. C. (1992). *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*.
- Hanumesh, B., Harish, B., & Venkata Ramana, N. (2018). Influence of Polypropylene Fibres on Recycled Aggregate Concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1147–1155. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.195>
- Hasan, Z. A., Nasr, M. S., & Abed, M. K. (2021). Properties of reactive powder concrete



- containing different combinations of fly ash and metakaolin. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2436–2440.
- Hassan, R. Y., Faroun, G. A., & mohammed, S. kareem. (2021). Mechanical properties of concrete made with coarse and fine recycled aggregates. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.004>
- Hewlett, P. C., & Liska, M. (2017). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2013-0-19325-7>
- Huang, L., Krigsvoll, G., Johansen, F., Liu, Y., & Zhang, X. (2018). Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(November 2016), 1906–1916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1993). *Norma tecnica colombiana NTC 30. 2–5*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2008). *Norma tecnica colombiana NTC 1299. 571*.
- Islam, M. R. (2020). Civil Engineering Materials. *Civil Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1201/9780429275111>
- Jaya, R. P. (2020). Porous concrete pavement containing nanosilica from black rice husk ash. In *New Materials in Civil Engineering*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818961-0.00014-4>
- Jones, D. R. H., & Ashby, M. F. (2019). Elastic Moduli. *Engineering Materials 1*, 31–47. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102051-7.00003-8>
- Kachouh, N., El-Hassan, H., & El-Maaddawy, T. (2019). Effect of steel fibers on the performance of concrete made with recycled concrete aggregates and dune sand. *Construction and Building Materials*, 213, 348–359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.087>
- Katkhuda, H., & Shatarat, N. (2017). Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment. *Construction and Building Materials*, 140, 328–335. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.128>
- Khasreen, M. M. (2013). *Carbon Dioxide Emissions of Office Buildings in Scotland. March*.
- Koksal, F., Mutluay, E., & Gencil, O. (2020). Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 236, 117789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117789>
- Kou, S. C., Poon, C. S., & Agrela, F. (2011). Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures.



- Cement and Concrete Composites*, 33(8), 788–795.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>
- Kou, S. C., Poon, C. S., & Chan, D. (2007). Influence of fly ash on the properties of recycled coarse aggregate concrete. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(5), 2097–2100.
<https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/101852020>
- Kumar Mehta, P., & Monteiro, P. J. M. (2014a). *Concrete: Microstructure, properties and materials*.
- Kumar Mehta, P., & Monteiro, P. J. M. (2014b). *Concrete microstructure, properties, and materials*.
- Kumar, P. H., Srivastava, A., Kumar, V., Majhi, M. R., & Singh, V. K. (2014). Implementation of industrial waste ferrochrome slag in conventional and low cement castables: Effect of microsilica addition. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2(2), 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.03.004>
- Larsen, I. L., & Thorstensen, R. T. (2020). The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 256, 119459.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119459>
- Le, H. B., & Bui, Q. B. (2020). Recycled aggregate concretes – A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance. *Construction and Building Materials*, 257, 119522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119522>
- Le, M. T., Tribout, C., & Escadeillas, G. (2019). Durability of mortars with leftover recycled sand. *Construction and Building Materials*, 215, 391–400.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.179>
- Lederer, J., Gassner, A., Kleemann, F., & Fellner, J. (2020). Potentials for a circular economy of mineral construction materials and demolition waste in urban areas: a case study from Vienna. *Resources, Conservation and Recycling*, 161(January), 104942. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104942>
- Letelier, V., Bustamante, M., Muñoz, P., Rivas, S., & Ortega, J. M. (2021). Evaluation of mortars with combined use of fine recycled aggregates and waste crumb rubber. *Journal of Building Engineering*, 43(March), 103226.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103226>
- Li, Y., Kong, X., & Zhu, Z. (2020). Multiscale analysis of the correlation patterns between the urban population and construction land in China. *Sustainable Cities and Society*, 61(September 2019), 102326. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102326>
- Liu, B., Feng, C., & Deng, Z. (2019). Shear behavior of three types of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 217, 557–572.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.079>



- Liu, J., Yi, Y., & Wang, X. (2020). Exploring factors influencing construction waste reduction: A structural equation modeling approach. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123185. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123185>
- López-Perales, J. F., Contreras, J. E., Vázquez-Rodríguez, F. J., Gómez-Rodríguez, C., Díaz-Tato, L., Banda-Muñoz, F., & Rodríguez, E. A. (2021). Partial replacement of a traditional raw material by blast furnace slag in developing a sustainable conventional refractory castable of improved physical-mechanical properties. *Journal of Cleaner Production*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127266>
- López Orozco, J. O. (2004). Porosidad del concreto. *Universidad de San Carlos de Guatemala, Trabajo fin de grado*, 84.
- Lotfy, A., & Al-Fayez, M. (2015). Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 61, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.009>
- Majhi, R. K., Nayak, A. N., & Mukharjee, B. B. (2018). Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 159, 417–430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.118>
- Marcalikova, Z., Racek, M., Mateckova, P., & Cajka, R. (2020). Comparison of tensile strength fiber reinforced concrete with different types of fibers. *Procedia Structural Integrity*, 28(2019), 950–956. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.068>
- Martin, J. W. (2006). Glasses and ceramics. In J. W. B. T.-M. for E. (Third E. Martin (Ed.), *Materials for Engineering* (3rd ed., pp. 133–158). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845691608.2.133>
- Martínez-García, R., de Rojas, M. I. S., Pozo, J. M. M. Del, Fraile-Fernández, F. J., & Juan-Valdés, A. (2021). Evaluation of mechanical characteristics of cement mortar with fine recycled concrete aggregates (FRCA). *Sustainability (Switzerland)*, 13(1), 1–23. <https://doi.org/10.3390/su13010414>
- Martínez-Lage, I., Vázquez-Burgo, P., & Velay-Lizancos, M. (2020). Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management*, 104, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.044>
- Mateus Ramírez, C. A., & Gelves Peña, D. A. (2020). *Mecánica a compresión en morteros, evaluación de resistencia en morteros de cemento con agregado RCD*. Facultad de Ingeniería.
- Matias, D., De Brito, J., Rosa, A., & Pedro, D. (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 44, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.011>



- McDonough, W., & Braungart, M. (2003). Towards a sustaining architecture for the 21st century: The promise of cradle-to-cradle design. *Industry and Environment*, 26(2–3), 13–16.
- Megat Johari, M. A., Brooks, J. J., Kabir, S., & Rivard, P. (2011). Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2639–2648. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.013>
- Mir, A. El, & Nehme, S. G. (2015). Porosity of Self-compacting Concrete. *Procedia Engineering*, 123, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.071>
- Mohammed, B. H., Sherwani, A. F. H., Faraj, R. H., Qadir, H. H., & Younis, K. H. (2021). Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high performance fiber reinforced concretes: Effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1557–1567. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.008>
- Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., & Hisada, M. (2004). Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 965–971. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.008>
- Nedeljković, M., Visser, J., Šavija, B., Valcke, S., & Schlangen, E. (2021). Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 38(May 2020). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102196>
- Nithya, M., & Ramasamy, M. (2021). Sustainability in construction industry through zero waste technology in India. *Materials Today: Proceedings*, 46, 849–851. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.851>
- Nkinamubanzi, P.-C., Mantellato, S., & Flatt, R. J. (2016). Superplasticizers in practice. In P.-C. Aïtcin & R. J. B. T.-S. and T. of C. A. Flatt (Eds.), *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 353–377). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00016-3>
- Ohemeng, E. A., & Ekolu, S. O. (2020). Comparative analysis on costs and benefits of producing natural and recycled concrete aggregates: A South African case study. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00450. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00450>
- Olofinnade, O., Morawo, A., Okedairo, O., & Kim, B. (2021). Solid waste management in developing countries: Reusing of steel slag aggregate in eco-friendly interlocking concrete paving blocks production. *Case Studies in Construction Materials*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00532>
- Ospina, M. Á., Moreno, L. Á., & Rodríguez, K. A. (2017). Análisis técnico-económico del uso de concreto reciclado y el concreto convencional en Colombia. *Actas de Ingeniería*, 3(May), 36–47.



https://www.researchgate.net/publication/330661099_Analisis_tecnico-economico_del_uso_de_concreto_reciclado_y_el_concreto_convencional_en_Colombia

- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. I. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>
- Paine, K. A. (2019). Physicochemical and Mechanical Properties of Portland Cements ☆. In P. C. Hewlett & M. B. T.-L. C. of C. and C. (Fifth E. Liska (Eds.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (pp. 285–339). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00007-1>
- Panesar, D. K. (2019). Supplementary cementing materials. In *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*. Elsevier LTD. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00003-4>
- Pedro, D., de Brito, J., & Evangelista, L. (2017). Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry. *Journal of Cleaner Production*, 164, 939–949. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.249>
- Pellegrino, C., Faleschini, F., & Meyer, C. (2019). Recycled materials in concrete. In S. B. T.-D. in the F. and R. of C. (Second E. Mindess (Ed.), *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete* (pp. 19–54). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00002-2>
- Pereira, P., Evangelista, L., & De Brito, J. (2012). The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 1044–1052. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.009>
- Quintero, L., Herrera, J., Corzo, L., & García, J. (2011). Relationship between compressive strength and porosity of concrete evaluated from ultrasonic parameters. *Revista ION*, 24(1), 69–76.
- Raini, I., Jabrane, R., Mesrar, L., & Akdim, M. (2020). Evaluation of mortar properties by combining concrete and brick wastes as fine aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00434. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00434>
- Ramakrishna, B., Harshini, B., Iswarya Lakshmi, G. N. K., Sangireddy, K., & Pavan Krishna Prasad, K. (2020). Influence of fly ash on the properties of recycled coarse aggregate concrete. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(5), 2097–2100. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/101852020>
- Ramesh, R. B., Mirza, O., & Kang, W. H. (2019). Mechanical properties of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 20(2), 745–755.



<https://doi.org/10.1002/suco.201800156>

- 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>
- Rashid, K., Rehman, M. U., de Brito, J., & Ghafoor, H. (2020). Multi-criteria optimization of recycled aggregate concrete mixes. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124316>
- Ravitheja, A., Pavan Kumar, G., & Madhu Anjaneyulu, C. (2021). Impact on cementitious materials on high strength concrete-A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 21–23. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.659>
- Ray, S., Haque, M., Soumic, S. A., Mita, A. F., Rahman, M. M., & Tanmoy, B. B. (2021). Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 43(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102567>
- Romero Mendoza, H. L. (2004). Viabilidad técnica y económica del uso del concreto reciclado como agregado. In *Repositorio dela Universidad de los Andes*. <http://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto41.php?id=00002522>
- Şahin, F., Uysal, M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Cosgun, T., & Dehghanpour, H. (2021). Effect of basalt fiber on metakaolin-based geopolymer mortars containing rilem, basalt and recycled waste concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 301(May). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124113>
- Sahin, F., Uysal, M., Canpolat, O., Cosgun, T., & Dehghanpour, H. (2021). The effect of polyvinyl fibers on metakaolin-based geopolymer mortars with different aggregate filling. *Construction and Building Materials*, 300(June), 124257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124257>
- Sahoo, A. K., & Kar, B. B. (2021). Water absorptivity and its impact on various properties of the concrete materials. *Materials Today: Proceedings*, xxx, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.474>
- Saidi, T., & Hasan, M. (2020). The effect of partial replacement of cement with diatomaceous earth (DE) on the compressive strength and absorption of mortar. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.10.003>
- Salamanca Correa, R. (2001). *Tecnología de los morteros* (Vol. 3).
- Sanches Guzman, D. (2002). *durabilidad y patologia*.
- Sanchez de Guzmán, D. (2010). *Tecnología del concreto y del mortero*. (p. 334).
- Sánchez de Guzman, D. (2001). Morteros Introducción. In *Tecnología del concreto y del mortero* (p. 349).



- Sánchez De Guzmán, D. (1995). *Tecnología del concreto - tomo 1 - materiales, propiedades y diseño de mezclas* (Vol. 1).
- Sasanipour, H., & Aslani, F. (2020). Durability assessment of concrete containing surface pretreated coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 264, 120203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120203>
- Sasanipour, H., Aslani, F., & Taherinezhad, J. (2019). Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 227, 116598. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324>
- Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 923–932. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>
- Siddique, R., & Chahal, N. (2011). Use of silicon and ferrosilicon industry by-products (silica fume) in cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(8), 739–744. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.004>
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(7), 825–849. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>
- Silva, Rui Vasco, De Brito, J., & Dhir, R. K. (2016). Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2171–2186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.064>
- Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2015a). Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 83, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.034>
- Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2015b). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(7), 825–849. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>
- Soni, N., & Shukla, D. K. (2021). Analytical study on mechanical properties of concrete containing crushed recycled coarse aggregate as an alternative of natural sand. *Construction and Building Materials*, 266, 120595. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120595>



- Srivastava, A., & Singh, S. K. (2020). Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119706>
- Stochino, F., Valdes, M., Mistretta, F., & Sassu, M. (2020). Assessment of lightweight concrete properties under cryogenic temperatures: Influence on the modulus of elasticity. *Procedia Structural Integrity*, 28(2019), 1467–1472. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.120>
- Surendar, M., Beulah Gnana Ananthi, G., Sharaniya, M., Deepak, M. S., & Soundarya, T. V. (2021). Mechanical properties of concrete with recycled aggregate and M-sand. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1723–1730. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.896>
- Tam, V. W. Y. (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), 821–828. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.12.001>
- Tam, V. W. Y., Tam, C. M., & Wang, Y. (2007). Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. *Construction and Building Materials*, 21(10), 1928–1939. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.040>
- Tang, Q., Ma, Z., Wu, H., & Wang, W. (2020). The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 114(September), 103807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>
- Tayeh, B. A., Saffar, D. M. Al, & Alyousef, R. (2020). The Utilization of Recycled Aggregate in High Performance Concrete: A Review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8469–8481. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.126>
- Théréne, F., Keita, E., Naël-Redolfi, J., Boustingorry, P., Bonafous, L., & Roussel, N. (2020). Water absorption of recycled aggregates: Measurements, influence of temperature and practical consequences. *Cement and Concrete Research*, 137(September), 106196. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106196>
- Thomas, J., Thaickavil, N. N., & Wilson, P. M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 19(April), 349–365. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.05.007>
- Ting, T. Z. H., Ting, M. Z. Y., Rahman, M. E., & Pakrashi, V. (2020). Palm Oil Fuel Ash: Innovative Potential Applications as Sustainable Materials in Concrete. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* (Issue 1996). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11317-7>
- Tobeia, S. B., Khattab, M. M., Khlaif, H. H., & Ahmed, M. S. (2021). Enhancing recycled aggregate concrete properties by using polymeric materials. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2785–2788. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.722>



- Urzola, M. E., Bolaños, E. Q., & Bello, J. M. (2011). *Demolición de placas de pavimento en Cartagena - Colombia*. 554–559.
- Velenturf, A. P. M., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437–1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>
- Vengadesh Marshall Raman, J., & Ramasamy, V. (2020). Various treatment techniques involved to enhance the recycled coarse aggregate in concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6356–6363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.935>
- Villalba Ruiz, A. D. (2021). *Intervención de estructuras de concreto reforzado en la ciudad de cartagena de acuerdo con la norma aci 562-16*. (Vol. 1, Issue 1).
- Wang, H. Y., Wang, W. C., Wang, J. C., & Chen, Y. W. (2021). Evaluation of the engineering properties and durability of mortar produced using ground granulated blast-furnace slag and stainless steel reduced slag. *Construction and Building Materials*, 280, 122498. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122498>
- Wang, Y., Zhang, H., Geng, Y., Wang, Q., & Zhang, S. (2019). Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 215, 332–346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.212>
- Wang, Z., Wang, L., Cui, Z., & Zhou, M. (2011). Effect of Recycled Coarse Aggregate on Concrete Compressive Strength. *Transactions of Tianjin University*, 15(1), 70–74. <https://doi.org/10.1007/s12209>
- Wu, H., Zuo, J., Zillante, G., Wang, J., & Yuan, H. (2019). Construction and demolition waste research: a bibliometric analysis. *Architectural Science Review*, 62(4), 354–365. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1564646>
- Xie, J., Kou, S. cong, Ma, H., Long, W. J., Wang, Y., & Ye, T. H. (2021). Advances on properties of fiber reinforced recycled aggregate concrete: Experiments and models. *Construction and Building Materials*, 277, 122345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122345>
- Yang, J., Du, Q., & Bao, Y. (2011). Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1935–1945. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063>
- Yang, K.-H, Chung, H.-S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, 105(3), 289–296.
- Yang, Keun-Hyeok, Chung, H.-S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. *Materials Journal*, 105(3), 289–296.



- Yang, L., An, X., & Du, S. (2021). Estimating workability of concrete with different strength grades based on deep learning. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 186(May), 110073. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110073>
- Yun, C. M., Rahman, M. R., Phing, C. Y. W., Chie, A. W. M., & Bakri, M. K. Bin. (2020). The curing times effect on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar. *Construction and Building Materials*, 260, 120622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120622>
- Zhang, Hongru, Xu, X., Su, S., & Zeng, W. (2021). To improve the resistance of recycled aggregate concrete (RAC) to the internal steel corrosion by the pre-treatment of aggregate. *Construction and Building Materials*, 306(May), 124911. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124911>
- Zhang, Hua. (2011a). *Building materials in civil engineering*. Elsevier. <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=TZJwAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Building+materials+in+civil+engineering&ots=afngCl5jCf&sig=EbjqgM6aGaDq4Pel4XsPtuh1ZZk#v=onepage&q=Building materials in civil engineering&f=false>
- Zhang, Hua. (2011b). Building Mortar. In *Building Materials in Civil Engineering* (pp. 150–423). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845699567.150>
- Zhao, W., Leefink, R. B., & Rotter, V. S. (2010). Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China-The case of Chongqing. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(6), 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.09.003>
- Zheng, C., Lou, C., Du, G., Li, X., Liu, Z., & Li, L. (2018). Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. *Results in Physics*, 9(April), 1317–1322. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.061>