



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
ESCUELA DE INGENIERÍA MAZATLÁN
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL



TESIS DE INVESTIGACIÓN:

CONCRETO RECICLADO, SU PROCESO DE DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN.

**PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL
PRESENTA**

EMMA CECILIA ORTEGA GARCÍA

DIRECTORES DE TESIS

DR. JESÚS MANUEL BERNAL CAMACHO

DRA. ROSA EDILMA GARZÓN GONZÁLEZ

MAZATLAN SINALOA, DICIEMBRE 2022

Agradecimientos

Extiendo mi gratitud a todas aquellas personas que influyeron de manera positiva en la realización del presente proyecto. Eso fue de verdad significativo para la culminación de esta travesía.

Agradezco plenamente a mi familia.

A mis hermanos por siempre darme los ánimos y las alegrías en los momentos que más los necesité, por su paciencia, cariño, comprensión y calidez.

A mis padres, por creer en mí, apoyarme en todos los sentidos, brindarme su amor; por las palabras y actos de aliento y motivación que sin duda fueron clave para forjar seguridad, resiliencia, y sembrar en mí el deseo de formarme y superarme como persona y profesionista. Por ser mi más grande soporte e inspiración a lo largo de mi vida, muchas gracias.

De igual forma, agradezco a mi director de tesis, el Dr. Jesús Manuel Bernal Camacho, por depositar su confianza en mis competencias como estudiante, para adentrarme al mundo de la investigación, y por ofrecer gran apertura y disposición en cuanto a orientación, conocimiento y tiempo. Así mismo, le doy las gracias a mi codirectora de tesis, la Dra. Rosa Edilma Garzón González, que, con su notable experiencia, convicción y dedicación, pudo pulir el contenido del presente trabajo, y compartir conocimientos y consejos valiosos, para poder desarrollar un trabajo íntegro.

Finalmente, agradezco a la Universidad Autónoma de Sinaloa, por ofrecerme una casa de estudios digna y accesible, que me brindó las herramientas adecuadas para mi desarrollo académico, personal y profesional, y que me permitió coincidir con personas inspiradoras.

¡Muchas gracias!

Índice de contenido

Índice de contenido	3
Introducción	7
1. Generalidades.....	9
1.1. Antecedentes	9
1.2. Justificación.....	10
1.3. Objetivos	11
1.4. Hipótesis.....	12
2. Marco teórico y normativo.....	12
2.1. Descripción general del concreto	12
2.1.1. Antecedentes y origen	12
2.1.2. Concreto	16
2.1.2.1. Producción	16
2.1.2.1.1. Materia prima	16
2.1.2.1.1.1. Cemento.....	17
2.1.2.1.1.1.1. Tipos de cemento en México	18
2.1.2.1.1.1.2. Agregados	20
2.1.2.1.1.1.3. Agua	21
2.1.2.1.2. Aditivos.....	21
2.1.2.1.3. Adiciones minerales	22
2.1.2.1.3.1. Microsílice.....	23
2.1.2.1.3.2. Ceniza volante.....	23
2.1.2.1.3.3. Metacaolín.....	23
2.1.2.1.3.4. Escoria de alto horno.....	24
2.1.2.2. Demolición.....	25
2.1.2.3. Impacto ambiental	26
2.2. Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD)	28
2.2.1. Definición de RCD.....	28
2.2.2. RCD aptos para el reciclaje	30
2.2.2.1. Madera	30
2.2.2.2. Metal	31
2.2.2.3. Concreto.....	32
2.2.2.4. Pavimento asfáltico	33
2.2.2.5. Yeso en paneles.....	34
2.2.2.6. Otros	34

2.3.	Concretos reciclados para la obtención de agregado grueso.....	35
2.3.1.	Antecedentes	35
2.3.2.	Panorama actual	37
2.3.3.	Proceso	38
2.3.4.	Características y propiedades.....	39
2.3.4.1.	Físicas y mecánicas	39
2.3.4.1.1.	Módulo de elasticidad.....	40
2.3.4.1.2.	Resistencia a compresión	41
2.3.4.1.3.	Resistencia a tracción	43
2.3.4.1.4.	Resistencia al corte	44
2.3.4.1.5.	Trabajabilidad.....	45
2.3.4.1.6.	Durabilidad	46
2.3.4.1.7.	Permeabilidad	49
2.3.4.1.8.	Densidad	50
2.3.5.	Reglamentación y normatividad	50
2.3.5.1.	Internacional.....	51
2.3.5.2.	Nacional	53
2.3.6.	Ventajas	59
2.3.7.	Implicaciones	61
2.3.8.	Reciclaje del concreto en México.....	62
2.4.	Panorama internacional del reciclaje del concreto	63
2.4.1.	Reino Unido	64
2.4.2.	Japón	64
2.4.3.	Estados Unidos	66
2.4.4.	Alemania	68
2.4.5.	Países Bajos	69
2.5.	Investigación relacionada con el concreto reciclado.....	70
3.	Metodología	80
4.	Resultados, análisis e interpretación de la información	82
4.1.	Encuesta aplicada al Colegio de Ingenieros Civiles de Mazatlán A.C. sobre los RCD. 82	
4.2.	Conclusiones.....	84
4.3.	Recomendaciones.....	85
Anexos	87
Referencias	92

IMAGEN 1 APRECIACIÓN DE LAS SECCIONES DEL PANTEÓN AGRIPA EN ROMA. TOMADO DE: (RODRÍGUEZ A. , 2022)	13
IMAGEN 2 FARO DE J. SMEATON (1759-1877). TOMADO DE: (GALINDO, S.F.).....	14
IMAGEN 3 SECCIÓN DE CONCRETO CON ADITIVO INCORPORADOR DE AIRE. TOMADO DE: (HORMIGON, 2018).	22
IMAGEN 4 MUESTRAS DE ADICIONES MINERALES. TOMADO DE: HTTPS://WWW.NRMCA.ORG/WP-CONTENT/UPLOADS/2020/04/CIP30ES.PDF	24
IMAGEN 5 RESIDUOS DE MADERA GENERADOS EN OBRA.....	31
IMAGEN 6 DEMOSTRACIÓN DE RESIDUOS DE ACERO EN OBRA	32
IMAGEN 7 RESIDUOS DE CONCRETO, TIERRAS Y AGREGADOS MEZCLADOS QUE DISTURBAN EL ASPECTO DE LAS CALLES DE LAS URBES.	33
IMAGEN 8 FALLA EN LAS VIGAS PROBADAS EN LA INVESTIGACIÓN DONDE, VIGA CON AGREGADO NATURAL: (A) SIN ESTRIBOS, (C) CON ESTRIBOS, (E) REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO; VIGA CON AGREGADO RECICLADO: (B) SIN ESTRIBOS, (D) CON ESTRIBOS, (F) REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO, SEGÚN (YOUNIS, EL-SHERIF, & EBEAD, 2022).....	45
IMAGEN 9 FORMA DE FALLA DEL CONCRETO DESPUÉS DE SIETE DÍAS PARA TODOS LOS ESPECÍMENES (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).	75
IMAGEN 10 FORMA DE FALLA DEL CONCRETO DESPUÉS DE 56 DÍAS PARA TODOS LOS ESPECÍMENES (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).	75
IMAGEN 11 MUESTRAS TRITURADAS CON DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).	76
FIGURA 1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO GENERAL DE LA PRODUCCIÓN DEL CEMENTO.	18
FIGURA 2 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA GENERACIÓN DE RCD EN EL 2010 EN CDMX, DE ACUERDO CON LA AUTORA RENEE MORS.	28
FIGURA 3 EJEMPLOS DE LA CLASIFICACIÓN DE RCD.....	30
FIGURA 4 ESQUEMA QUE SIMPLIFICA EL PROCESO DE RECICLAJE DEL CONCRETO.....	39
FIGURA 5 TIPOLOGÍA DEL AGREGADO DE CONCRETO, SEGÚN EL AUTOR JEONGHYUN KIM. ADAPTADO DE (KIM, 2022).	40
FIGURA 6 ESQUEMA QUE REPRESENTA UNA PARTÍCULA DE AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO, DE ACUERDO A (ADAMS & JAYASURIYA, 2019).	42
FIGURA 7 COMPORTAMIENTO DEL CEMENTANTE EN 325KG/M3 ANTE LA RCMT, DE ACUERDO CON (MOSTAFA & FARZAD, 2022).	47
FIGURA 8 COMPORTAMIENTO DEL CEMENTANTE EN 375KG/M3 ANTE LA RCMT, SEGÚN (MOSTAFA & FARZAD, 2022).	48
FIGURA 9 COMPORTAMIENTO DEL CEMENTANTE EN 425KG/M3 ANTE LA RCMT, SEGÚN (MOSTAFA & FARZAD, 2022).	48
FIGURA 10 TASA DE RECICLAJE DE RCD EN JAPÓN. TOMADO DE: HTTPS://WWW.UNCRD.OR.JP/CONTENT/DOCUMENTS/2661PARALLEL%20ROUNDTABLE(2)- PRESENTATION(4)-HIDEKO%20YONETANI.PDF.	65
FIGURA 11 AGREGADO DE CONCRETO (CAR) RECICLADO COMO AGREGADO GRUESO (KHAN, 2005).....	67
FIGURA 12 CAR COMO AGREGADO BASE (KHAN, 2005).	67
FIGURA 13 CAR EN DIFERENTES APLICACIONES (KHAN, 2005).	67
FIGURA 14 CAR PARA CONCRETO SIMPLE (KHAN, 2005).	67
FIGURA 15 COMO AGREGADO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (KHAN, 2005).	67
FIGURA 16 GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).....	72
FIGURA 17 ESFUERZO A COMPRESIÓN (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019)....	74
FIGURA 18 ESFUERZO A TENSIÓN DEL CONCRETO (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).	76

FIGURA 19 MÓDULO DE ELASTICIDAD (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).	77
FIGURA 20 RESULTADOS DE PRUEBA RÁPIDA DE PERMEABILIDAD DE CLORUROS (RCPT) (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).	79
TABLA 1 CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND SEGÚN SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN,	19
TABLA 2 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LOS CEMENTOS PÓRTLAND, SEGÚN LA NMX-C-414-ONNCCE-2017	20
TABLA 3. ESPECIFICACIONES DE LOS PATRONES DE LOS AGREGADOS RECICLADOS PARA QUE SEAN DE MAYOR CALIDAD, EN JAPÓN (RODRÍGUEZ J. P., 2016).	53
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE LOS RCD SEGÚN LA NORMA AMBIENTAL PARA LA CIUDAD DE MÉXICO NACDMX-007-RNAT-2019.	56
TABLA 5. APROVECHAMIENTO DE LOS AGREGADOS RECICLADOS EN ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES SEGÚN LA NORMA AMBIENTAL PARA LA CIUDAD DE MÉXICO NACDMX-007-RNAT-2019.	58
TABLA 6. IMPUREZAS MÁXIMAS EN EL AGREGADO RECICLADO DE ACUERDO A LAS NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS MEXICANAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO (NTC, 2021).	59
TABLA 7. VALORES MÁXIMOS DE CONTENIDO DE ION CLORURO EN EL CONCRETO AL MOMENTO DEL COLADO (NTC, 2021).	59
TABLA 8 DATOS SOBRE GENERACIÓN Y TRATAMIENTO DE RCD EN ALEMANIA, INCLUIDOS SUELOS Y PIEDRAS (BIO, 2015).	68
TABLA 9 DATOS SOBRE GENERACIÓN Y TRATAMIENTO DE RCD EN ALEMANIA, EXCLUYENDO SUELO Y PIEDRAS (BIO, 2015).	68
TABLA 10 PROPIEDADES DEL AGREGADO RECICLADO (AR) (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).	72
TABLA 11 PROPORCIONES DE LAS MEZCLAS. CHSC = CONCRETO CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA; A/C = RELACIÓN AGUA-CEMENTO (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).	73
TABLA 12 PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO (AL AJMANI, SULEIMAN, ABUZAYED, & TAMIMI, 2019).	73

Introducción

Cuando se hace alusión a la palabra *Construcción*, la mente lo relaciona de forma inmediata al concreto, este hecho no es mera coincidencia, pues se trata del material compuesto más empleado en el sector constructivo, incluso las ciudades con grandes edificios vienen a ser denominadas *concrete jungles*, tal es el caso de Nueva York, refiriéndose a los exorbitantes volúmenes de concreto concentrado en las diversas edificaciones que conforman esas ciudades. Pero, ¿qué ocurre con esa masiva cantidad de concreto una vez que alcanza su vida útil y es demolido?

Derivado que en las últimas décadas se ha dado un uso incesante de este material, hoy en día la mayor cantidad de nuevos proyectos implican la demolición de estructuras fabricadas en concreto, lo cual produce una gran cantidad de residuos de la construcción. Es por este fenómeno que la comunidad científica internacional relacionada con el ámbito de la ingeniería civil, específicamente en el área de materiales de construcción y tecnología del concreto, trabaja diariamente en el diseño de técnicas de reciclaje de los materiales de construcción para su uso en la fabricación del concreto, siempre buscando dar un sentido sustentable a este material que tanto contamina debido al uso de grandes cantidades de cemento.

La elaboración de proyectos de investigación que aborde esta temática dará la pauta para la generación de conocimiento de frontera relacionado al tema, que coadyuve a la optimización de los procesos de reciclaje de materiales de construcción y su uso estratégico en la fabricación de mezclas de concreto.

El presente documento de investigación se desarrolla a través de 4 Capítulos, los cuales fueron nutridos por una investigación documental, donde se recopiló información existente en la bibliografía, tesis de distintos grados, reseñas, artículos de investigación y sitios web que competen al área de estudio, procurando la obtención de información confiable y actualizada, y así brindar un panorama general disponible sobre el reciclaje del concreto y su uso como agregado en la fabricación de nuevas mezclas.

En el capítulo 1. Generalidades, se dan a conocer la identidad y características de la temática a desarrollar. En primer lugar, se tienen los antecedentes, que representan los eventos que encaminaron al surgimiento del problema. También se encuentra la justificación, que expone datos que le dan soporte y sustento a la elección de este mismo; le continúan los objetivos, mismos que expresan los puntos que se pretenden conseguir

tras la culminación del presente trabajo, y que le dan razón y estructura. Así mismo, se tiene la hipótesis de investigación del tipo *causalidad*, donde se menciona claramente la relación de causa-efecto entre las principales variables del tópico, el reciclaje del concreto y sus residuos en el medio ambiente.

El capítulo 2. Marco teórico y normativo, contiene el meollo del presente documento, es donde se concentra la información obtenida de diversas fuentes, con la finalidad de exponer conocimientos que engloban al reciclaje del concreto. En el apartado Descripción general del concreto, se abordan elementos claves de este material para contextualizar y entender el tema principal, se define brevemente su origen y trayectoria, producción, demolición e impacto ambiental. En el apartado, Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD), se otorga una explicación de lo que estos representan, así como datos cuantitativos que reflejan su importancia a nivel ambiental. En la sección Concretos reciclados para la obtención de agregado grueso, se desarrolla específicamente el estudio del reciclaje del concreto, donde se exponen sus propiedades fisicomecánicas, de acuerdo a experimentaciones publicadas en artículos de divulgación científica. La sección 4, Panorama internacional del reciclaje del concreto, da a conocer de manera global cómo es la gestión de los residuos de concreto en países que promueven su reciclaje. Y finalmente, en Investigación relacionada con el concreto reciclado, se expone un trabajo de investigación donde se emplea agregado reciclado para fabricar concreto bajo ciertas condiciones y de esa manera conocer la factibilidad de su uso.

Respecto al capítulo 3. Metodología, se explica el tipo de método en este caso, cualitativo, empleado para la realización de este trabajo, así como las técnicas utilizadas para la adquisición de información, como la documental y la aplicación de la encuesta. Finalmente, en el capítulo 4. Resultados, análisis e interpretación de la información, se demuestran los datos que arrojó la encuesta aplicada acerca de los RCD a personas involucradas en el área de la ingeniería civil y la construcción; así como las conclusiones generales y recomendaciones que se tienen en materia de la temática.

1. Generalidades

1.1. Antecedentes

El concreto es un material tan longevo y cambiante como el hombre, no importa que tan distinta sea su composición actual de la que se usaba hace algunas épocas, el común denominador radica en que se ha buscado hacerlo lo más parecido posible a una roca, tratando de alcanzar su rigidez, y que todo ello implica la extracción de materia prima.

Sus nobles propiedades físicas y mecánicas lo han posicionado como el material de construcción por excelencia, siendo capaz de conformar cualquier tipo de estructura. Sin embargo, una de las preguntas reflexivas que ha salido a flote en las últimas décadas es ¿Qué ocurre con el concreto después de su vida útil?

Sucesos históricos han sido de cierta forma catalizadores del planteamiento de estas interrogantes, tal es el caso de la segunda guerra mundial, donde se evidenció por medio de los escombros, la ausencia de un protocolo para la correcta gestión de éstos, activando de esa manera, la filosofía del reciclaje del concreto en distintos países, como Alemania e Inglaterra. También, el devastador terremoto de septiembre del 2017 en varios estados de México, demostró que es necesario planificar el *después de la vida del concreto*, puesto que los residuos contribuían a un potente foco de contaminación ambiental por la falta de un correcto lugar de almacenamiento para su posterior tratamiento.

Aunado a ello, resulta inquietante saber que este imponente material requiere de la extracción de materia prima de fuentes agotables para su producción, y que esto desencadena no sólo la explotación de recursos naturales, sino la mayúscula emisión de gases de efecto invernadero, siendo la generación del cemento uno de los mayores aportadores de estos gases a nivel global.

Por lo tanto, se cree que la práctica del reciclaje del concreto contribuya de cierta medida a la disminución de la explotación acelerada de canteras, la emisión de gases de efecto invernadero, y la acumulación de desechos que podrían desarrollar peligrosos puntos de infección. Esta acción no es realizada en todo el mundo, pues aún se tienen ideas no tan favorables respecto a sus propiedades, y aunque hay investigaciones que respaldan dichas ideas, no descartan su uso en áreas donde sus propiedades no se ven empobrecidas.

En este sentido, en México existe una falta de información sobre el reciclaje del concreto, por lo que se sugiere que se desarrollen investigaciones que puedan aportar conocimientos y métodos que involucren la creación de concretos funcionales a base de concreto reciclado. La presente investigación ofrece un panorama que establece las directrices del concreto reciclado, la cuales sirven de base para hacer un llamado a profundizar sobre el tema y mejorar aún más el acervo científico, para que se proyecte un México más sustentable, brindando apertura al reciclaje del concreto.

1.2. Justificación

Al ser el concreto un material protagónico en el área de la construcción, implica que su producción requiera de la explotación mayúscula de materias primas, demandando una gran cantidad de combustibles para la gran energía necesaria y, liberando gases de efecto invernadero como es el dióxido de carbono CO₂.

Entre los compuestos del concreto, la producción del cemento es la que tiene mayor peso en la contribución de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, es responsable de alrededor del 5% de las emisiones de CO₂; cada año, la industria del concreto usa aproximadamente 1.6 billones de toneladas de cemento, y en cada una de éstas se emite 1 tonelada de CO₂ a la atmósfera (Aceves-Gutierrez, Lopez-Chávez, Mercado-Ibarra, & Arevalo-Razo, 2020).

Los datos mencionados anteriormente sólo abarcan la fase de fabricación del cemento, pero seguramente las cifras de las fases de construcción, uso y posterior demolición serían también de gran importancia.

En México, se producen alrededor de 41 millones de toneladas de cemento al año; su fabricación produce más del 4% de las emisiones totales de equivalentes de dióxido de carbono (CO₂), en 2013, liberó aproximadamente 20 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, así mismo, su uso de energía sumó 9 millones de toneladas de CO₂ (Mors, 2018).

La industria de la construcción en México derivó 6 millones de toneladas de residuos en promedio entre 2006 y 2012; de los cuales, el 80% del concreto se depositó con planes para reusarse, sin embargo, no resultó ser un hecho. En la Ciudad de México en 2010, se estimaron 7 mil toneladas diarias de residuos de construcción, de las cuales el 1% se reciclaron y el 80% terminaron en vertederos (Mors, 2018).

Lamentablemente en México el reciclaje del concreto no es una actividad a la que se le preste mucha prioridad, un hecho que evidenció el deficiente manejo de residuos de construcción y demolición (RCD) fue el terremoto de septiembre del 2017, pues la cantidad de escombros que se registraron, al menos 26, 000 toneladas, se encontraban ocupando espacios de la ciudad por un periodo prolongado (RCM, 2017).

En sólo algunos estados de México se ha implementado el manejo de los residuos de demolición, la gestión en materia de estos, presenta serias deficiencias, son pocos los que tienen la infraestructura adecuada para su manejo, lo cual refleja una clara necesidad de promover e inculcar esta actividad.

Después de conocer de manera poco profunda los datos referidos, queda más que claro que el sector de la construcción toma un papel protagónico en el cambio climático, he ahí la importancia de buscar mejores alternativas y soluciones en todos sus rubros (fabricación, transporte, construcción, uso y demolición), y de esa manera poder efectuar un cambio que seguramente será notorio en el planeta; y el reciclaje del concreto, vendría a ser sin duda, un gran paso hacia ese objetivo en nuestro país.

De acuerdo a lo anterior se llega al siguiente objetivo general:

1.3. Objetivos

Objetivo general

Estudiar el proceso de reciclado del concreto para su uso en la fabricación de nuevas mezclas de concreto, haciendo énfasis en la normativa vigente nacional e internacional que regula la producción de este material para su implementación.

Objetivos específicos

- Identificar los principales residuos de construcción y demolición para detectar sus ventajas y limitantes en su empleo en la construcción.
- Estudiar el uso de concreto reciclado en la fabricación de concreto, destacando sus propiedades para compararlas con las de un concreto convencional.
- Reconocer las principales aplicaciones del concreto reciclado para su óptimo aprovechamiento en diferentes áreas de la construcción.
- Indagar la situación actual en México en relación a la presencia de programas o estrategias de reciclajes de los residuos de la construcción y demolición.

- Revisar la normativa vigente nacional e internacional para detectar los organismos que regulan la correcta fabricación e implementación del concreto reciclado.
- Evaluar el estado actual de Sinaloa respecto al manejo de residuos de construcción y demolición, para detectar la necesidad de mejoras en éste.

En función al problema mencionado relativo a la ausencia de la práctica del reciclaje del concreto, se considera importante plantear la siguiente hipótesis.

1.4. Hipótesis

La optimización del proceso de reciclado del concreto para su uso en la producción de nuevas mezclas bajo la normativa vigente nacional e internacional, permitirá garantizar el aprovechamiento adecuado de los residuos atendiendo los criterios técnicos y abordando la temática medioambiental.

2. Marco teórico y normativo

2.1. Descripción general del concreto

2.1.1. Antecedentes y origen

Para que el concreto llegara a ser como lo conocemos actualmente, tuvieron que pasar milenios y épocas de constante evolución; no resultaría atrevido decir que es un material longevo y al mismo tiempo joven, al tratarse de un compuesto, donde cada uno de sus componentes presenta una historia que encauzó al concepto actual del concreto; vendría a ser inconcluso el entendimiento del origen de este material como un todo, sin antes entrar en contexto con sus antecedentes, o mejor dicho, en el estudio general de las partes, que conforman este sublime material de la construcción.

Es bien sabido que el ser humano, gracias a su instinto de supervivencia, desarrolló refugios para su protección, usando técnicas intuitivas y rudimentarias como frotar rocas para adentrarse en cavernas. Cuando éste se volvió sedentario, surgieron nuevas necesidades y estrategias de construcción, se optó por unir rocas en hileras aprovechando su morfología, pues no se usó algún tipo de conglomerante, por lo que éstas eran frágiles, posteriormente comenzaron a agregar una mezcla de arcilla apisonada con cantos rodados. Los historiadores sitúan este hecho en la época del Paleolítico y Neolítico (Nistal Cordero, Retana Maqueda, & Ruiz Abrio, 2012).

En la reseña histórica (Romea, 2014) se menciona que el historiador griego Estrabón (c. 64/63 a.C. - c. 19/24 d.C.) dedujo que mucho antes de la llegada de los Romanos a la

península Ibérica, ya se usaban aglomerantes, la fabricación de yeso común (que procede del sulfato cálcico CaSO_4) era una práctica repetitiva; calcinaban las piedras de origen calcáreo y las deshidrataban, produciendo un material con nuevas propiedades.

Es importante destacar que en las antiguas civilizaciones, como la egipcia, se empleaban ya los conglomerantes, en este caso a la cal apagada $\text{Ca}(\text{OH})_2$, consistía en hidratar en exceso el óxido de calcio (cal viva). Esta técnica se adoptó por los griegos y más tarde por los romanos.

Los romanos dejaron un legado, en lo que respecta a la construcción de una manera formidable, perfeccionaron la fabricación de conglomerantes y fueron pioneros de la introducción de agregados en éstos, favoreciendo sus propiedades físicas y químicas, y reduciendo en desmedida la fuerza obrera, pues ya no era muy necesario trasladar enormes rocas como en las antiguas civilizaciones.

El período republicano de Roma (509 a.C-27 a.C) marcó un hito en el concreto, introdujeron el *opus caementicium*, se basaba en agregarle a la cal, arena y agua, tierra volcánica de la zona de Pozzuoli, gracias a ello se lograron propiedades hidráulicas nunca antes vistas. Esta misma mezcla se usó para la construcción del Panteón Agripa en Roma (actualmente una iglesia) caracterizada por su gran cúpula de concreto sin refuerzo. A partir de ello se desarrollaron mejoras produciendo concretos más auténticos.

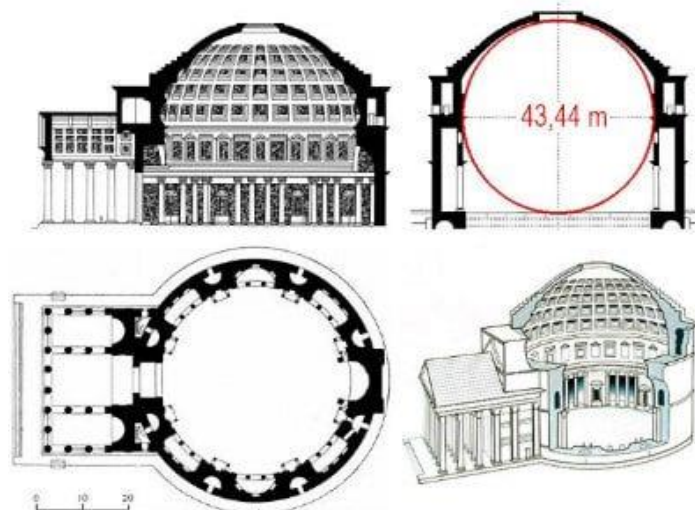


Imagen 1 Apreciación de las secciones del Panteón Agripa en Roma. Tomado de: (Rodríguez A. , 2022)

No cabe duda de que los romanos eran excelentes ingenieros, constructores y administradores, pues todo ello se reflejaba en sus indelebles construcciones,

despertando el interés de sus contemporáneos sobre el secreto de dicho éxito, actualmente se sabe que un factor clave fue en lo cuidadosos y perfeccionistas que resultaban con las dosificaciones y condiciones de las mezclas de sus concretos. Sin embargo con la caída del imperio romano (476 d.C.) se tuvo un estrepitoso declive en la construcción, pues los cementos y por ende, concretos, se vieron empobrecidos, quedando durante algún tiempo en el olvido.

Fue hasta el siglo XVIII, cuando el ingeniero inglés John Smeaton (1724-1792) se encargó de la reconstrucción del Faro de Eddystone (Inglaterra), que se volvió a hablar del concreto romano. Tras los intentos fallidos de la construcción de dicho faro, Smeaton decidió guiarse por las técnicas romanas de construcción, así como del concreto puzolánico. Incluso, solicitó que trajeran los ingredientes de Italia para garantizar la calidad de los romanos.

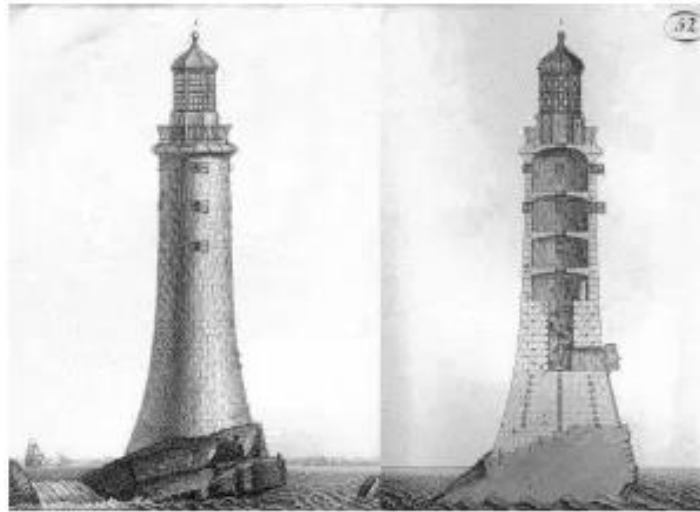


Imagen 2 Faro de J. Smeaton (1759-1877). Tomado de: (Galindo, s.f.)

Se siguió perfeccionando el *concreto romano* como lo hizo el científico francés Louis Vicat (1786-1861), encontró buenas prestaciones hidráulicas al cocer la mezcla de piedra caliza con arcilla. En 1824 el albañil y constructor inglés Joseph Aspdin, se denominaba el creador del cemento Portland, cuyo nombre se le atribuye a su dureza comparada con las rocas de la Isla Portland. Este cemento consistió en una mezcla de clinker molido obtenido por calcinación entre 1350-1450 °C con una adición de yeso.

Una de las principales características del concreto es su resistencia bondadosa a la compresión, sin embargo no se puede decir lo mismo de la tracción, el hierro es el que presume de esta propiedad, (su uso data desde construcciones antiguas griegas y

bizantinas, en elementos como arcos); así que unieron el concreto y hierro por su buena *simbiosis* formando el concreto armado.

En 1848 es cuando se aplicó el primer uso del concreto armado, al fabricarse una barca reconocida por el ingeniero francés Joseph-Louis Lambot, de inmediato salieron a la luz más patentes de éste material, como lo fueron Joseph Monier con sus macetas la horticultura. En 1853 François Coignet presentó el primer inmueble con estructura de hormigón, reforzado con varillas de hierro.

El ingeniero y constructor belga François Hennebique impulsó la industrialización del concreto armado, en 1892 patentó la viga de sección T, así mismo es un impulsor del prefabricado, otro de sus legados fue la construcción del puente Risorgimento, una estructura con una delgadez desafiante para su época.

Pese a que en un principio el concreto armado no era plenamente aceptado por ingenieros puristas debido a que lo encontraban sustentado en el empirismo e intuición y no habían fórmulas para sus cálculos, la aceptación de éste se difundió ya que se apreciaron las cualidades físicas y mecánicas; así que en el periodo de entre guerras (I y II guerra mundial), proliferaron especialistas en cálculo y diseño estructural, y consigo reglamentos y normalizaciones.

Paulatinamente se comenzaron a notar particularidades en algunas estructuras como retracciones en el volumen del concreto, poca resistencia a la tracción, fisuración, pandeo, esto llevó a que el pretensado saliera a la luz, surgieron ideas en varios países (Francia, Alemania, E.U.A) sin embargo se considera al ingeniero Eugène Freyssinet (1879-1962) como el pionero del concreto armado pretensado, con su patente definitiva en 1928, gracias a su estudio del mecanismo de fluencia.

La aplicación del pretensado tomó fuerza después de la Segunda Guerra Mundial, pues la demanda constructiva se disparó por los bienes inmuebles afectados. Entrando en la década de 1980, al concreto armado se le añadieron mejoras para moldear aspectos como trabajabilidad, durabilidad, propiedades físico-mecánicas, estética, etc., con ello nacieron los aditivos, estrategias para el pretensado, nuevas tecnologías como los concretos armados con fibras, ya sean metálicas, de vidrio, polipropileno, por mencionar algunas. Podría decirse que resurgió una revolución en el concreto que no tendría fin en los tiempos.

2.1.2. Concreto

Son muchas las connotaciones que se le han dado al concreto, unas más rigurosas y técnicas que otras, no obstante, en el presente capítulo se abordará dicho concepto desde una perspectiva más cualitativa.

El concreto (Solís, Moreno, & Arjona, 2012) es *una piedra artificial que está sujeta a esfuerzos internos que equilibran las cargas y otras acciones accidentales que reciben las construcciones durante su vida de servicio*; por lo que viene a ser una imitación de una roca natural, cuya estructura interna es tan rígida como los esfuerzos externos a los cuales es capaz de someterse. Es el material, a parte del agua, más usado en la construcción, se compone de agregados, como la arena, piedra y grava representando entre el 60 y 75% del volumen total del concreto premezclado; un aglomerante, generalmente cemento; agua y determinados aditivos. En Latinoamérica es más conocido como concreto, derivado del inglés *concrete* y a su vez del latín *concrētus*, “crecer unidos”, “unir”. En España es denominado concreto de *hormigo*, “gachas de harina”.

El concreto armado se basa en la combinación de concreto y acero de refuerzo, estos materiales unidos bien adheridos, trabajan conjuntamente, pues el concreto tiene excelentes prestaciones frente a la compresión mientras que el acero a la tracción, logrando una coexistencia con grandes propiedades mecánicas.

2.1.2.1. Producción

La producción del concreto abarca varios ciclos o etapas, que a grandes rasgos ocupan la extracción de agregados y otras materias primas como arena y minerales, su transporte a las fábricas donde se procesarán, producción de sus componentes como del cemento, aditivos; distribución de dichos componentes a plantas de concreto, que generalmente son compañías que suministran concretos premezclados, o traslado directo a obras donde se hará la mezcla *in situ*.

2.1.2.1.1. Materia prima

Es también sabido que la industria de la construcción es una de las principales consumidoras de materia prima, pues solamente con la fabricación del concreto se requiere la extracción de áridas rocas provenientes de diversas regiones, de depósitos naturales formados en cauces de ríos o llanuras. A continuación, se describirá de manera general la obtención de las principales materias primas que conforman al concreto.

2.1.2.1.1.1. Cemento

El inicio de la producción del cemento es la extracción de la materia prima, es decir, de la caliza y la arcilla de canteras o depósitos, siempre buscando que cuenten con propiedades óptimas, como, una buena densidad. Para derribar y fraccionar las rocas, se realizan perforaciones con el uso de explosivos (se requiere de gran energía). Después se trituran hasta el tamaño de 1" de diámetro y se almacenan, enseguida se envían al parque de prehomogenización, donde dosifican los distintos tipos de arcilla y caliza para distribuir uniformemente el tamaño y lograr las propiedades físicas y químicas deseadas.

A continuación, se llevan los materiales mezclados a los molinos para formar un polvo fino llamado crudo, mismo que se almacena en un silo para aumentar la uniformidad de la mezcla, es cuando surge la homogenización. El crudo es transportado a un gran horno calentado inicialmente a temperaturas de aproximadamente 850°C. A partir de 550°C, se producen diversas reacciones, la que destaca es la formación del silicato tricálcico (C_3S).

El Silicato tricálcico (C_3S) es estable a 1250°C (temperatura mínima requerida para la cocción del Clinker), sin embargo, requieren de 1450°C-1500°C para acelerar la clinkerización. Se puede favorecer la cocción del clinker añadiendo fundentes y mineralizadores. Al final del horno el material se expone a una corriente de aire de hasta 120°C (aire secundario) en un enfriador rotatorio, pasando así del estado líquido a una consistencia más sólida. Algunas de las reacciones que ocurren son Silicatos tricalcico y dicálcicos, $3CaOSiO_2$ y $2CaOSiO_2$, hundiéndose en aluminato tricálcico, $3CaOAl_2O_3$, y ferroaluminato tetracálcico, $4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$ (fase líquida del Clinker).

El siguiente paso es moler el Clinker en molinos tubulares de bolas, junto con alrededor de 5% de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), y otras adiciones como puzolana, hasta lograr la granulometría deseada, es cuando se crea el cemento gris, mismo que es empacado para su distribución (Oficemen, 2017).

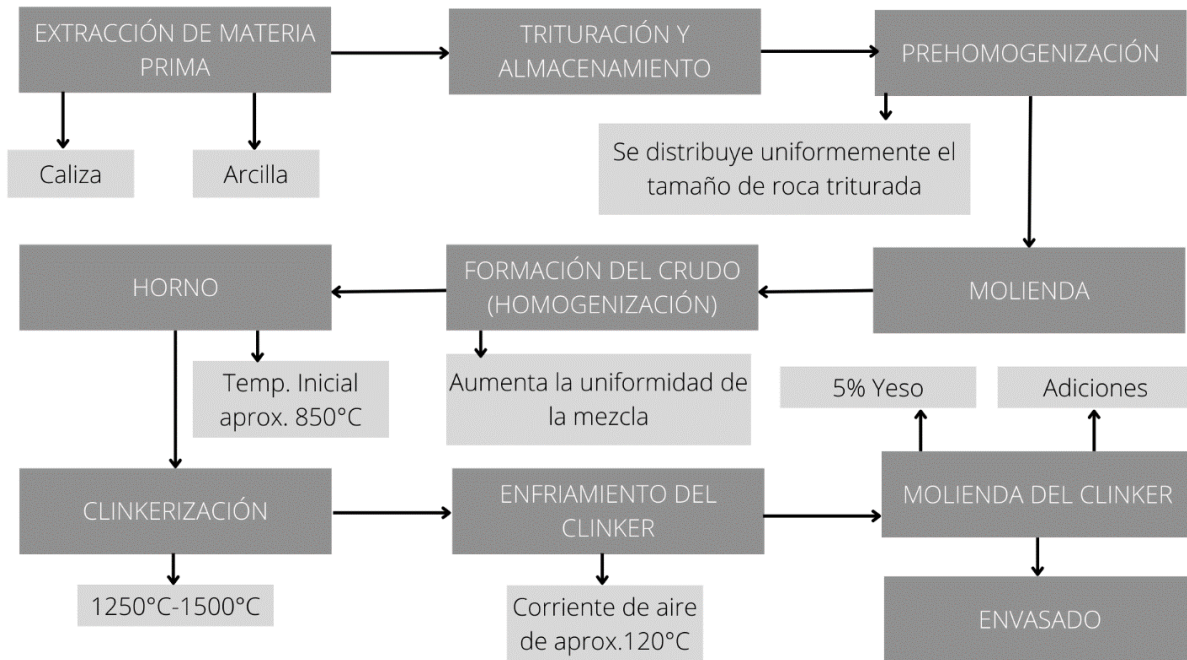


Figura 1 Diagrama de flujo del proceso general de la producción del cemento.

2.1.2.1.1.1. Tipos de cemento en México

Actualmente en México, la clasificación del cemento es regida por la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017, misma que los distingue por sus componentes, su resistencia a la compresión, y sus características especiales.

Según su composición:

- Tipo CPO (cemento Pórtland ordinario): El producido mediante la molienda del clinker Pórtland y sulfato de calcio (yeso). Cuando el proyecto no establezca el tipo de cemento Pórtland por usar en cada caso, se entenderá que se trata de cemento Tipo CPO, pues su uso es muy generalizado.
- Tipo CPP (cemento Pórtland puzolánico): El que resulta de la molienda conjunta del clinker Pórtland, puzolanas y sulfato de calcio. Es empleado en diversos elementos estructurales, aunado a ello, es diseñado para emplearse en ambientes agresivos como suelos salinos.
- Tipo CPEG (cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno): El producido mediante la molienda conjunta del clinker Pórtland, sulfato de calcio y escoria granulada de alto horno; siendo ésta última un producto no metálico de minerales de hierro cuando son expuestos a alta temperatura y enfriados con agua o vapor.

- Tipo CPC (cemento Pórtland compuesto): El que se obtiene de la molienda conjunta del clinker Pórtland, puzolanas, escoria de alto horno, caliza y sulfato de calcio. En este tipo de cemento la caliza puede ser el único componente adicional al clinker Pórtland con el sulfato de calcio. Tiene gran durabilidad en prefabricados para alcantarillado, presenta mayor resistencia y menor desprendimiento de calor.
- Tipo CPS (cemento Pórtland con humo de sílice): El que resulta de la molienda conjunta del clinker Pórtland, humo de sílice y sulfato de calcio. El humo de sílice le aporta más resistencia y permeabilidad a los concretos elaborados con este tipo de cemento.
- Tipo CEG (cemento con escoria granulada de alto horno): El producido mediante la molienda conjunta del clinker Pórtland, sulfato de calcio y mayoritariamente escoria granulada de alto horno (N.CMT.2-02-001/02, 2002).

Según su resistencia a la compresión:

En esta clasificación se presta atención a la resistencia mecánica del cemento adquirida con el tiempo, se representan mediante clases resistentes a las cuales se le asignan los valores 20, 30 y 40 haciendo referencia a los Megapascales mínimos a obtener del cemento y añadiéndole una “R” cuando alcanzan resistencias rápidas (las clases 30 y 40).

Clase resistente	Resistencia a la compresión		
	unidades en Mpa(kg/cm ²)		
	A 3 días	A 28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	–	20 (204)	40 (408)
30	–	30 (306)	50 (510)
30R	20 (240)	30 (306)	50 (510)
40	–	40 (408)	–
40R	30 (306)	40 (408)	–

Tabla 1 Clasificación del cemento Portland según su resistencia a la compresión, Según la norma: NMX-C-414-ONNCCE-2017.

Por lo tanto, la nomenclatura que se le designa a un cemento en esta clasificación, está configurada con la denominación del tipo de cemento de acuerdo a su composición, seguida por la resistencia de este. Por ejemplo, CPEG 40R, si se requiere un cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno, que tenga una resistencia normal mínima

de cuarenta (40) megapascales (408.kg/cm²) y deba cumplir con una resistencia inicial mínima de treinta (30) megapascales (306 kg/cm²) (N·CMT·2·02·001/02, 2002).

Según sus características especiales:

Los cementos Pórtland pueden presentar una o más de las características especiales que se muestran en la siguiente tabla:

Característica especial	Nomenclatura
Resistente a los sulfatos	RS
Baja reactividad álcali-agregado	BRA
Bajo calor de hidratación	BCH
Blanco	B

Tabla 2 Características especiales de los cementos Pórtland, según la NMX-C-414-ONNCCE-2017

Para identificar un cemento Pórtland con una característica especial, la nomenclatura de ésta será anotada después de la designación del tipo de cemento y de la clase resistente. De tener dos o más características especiales, sus nomenclaturas se anotan siguiendo el orden descendente de la Tabla 2, separándolas con una diagonal, por ejemplo: CPEG 40R BRA/BCH, si se requiere un cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno, que tenga una resistencia normal mínima de cuarenta (40) megapascales (408.kg/cm²), una resistencia inicial mínima de treinta (30) megapascales (306 kg/cm²), baja reactividad álcali agregado y bajo calor de hidratación (N·CMT·2·02·001/02, 2002).

Cabe destacar, que el cemento en México era anteriormente clasificado según las normas mexicanas NMX-C-001, NMX-C-002 y NMX-C-175, mismas que se basaban en la norma ASTM C-150, en cemento Tipo I (Portland Normal), Tipo II (Portland Moderada resistencia a los sulfatos), Tipo III (Portland Fraguado rápido, alta resistencia inicial), Tipo IV (Portland Bajo calor de Hidratación), Tipo V (Portland Alta resistencia a los sulfatos); fue hasta el año 2004 que se reemplazó esta clasificación por la que se declara la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004 (actualmente NMX-C-414-ONNCCE-2017) (Torres & Urquiza, 2012).

2.1.2.1.1.2. Agregados

Los agregados son parte fundamental del concreto, pues conforman entre el 60% y 75% de su volumen total. Son materiales pétreos que se encuentran en forma de matriz rocosa (donde se requieren técnicas como explosivo para obtenerlos y procesarlos, dando lugar a los agregados artificiales) o en depósitos de fragmentos de distintos tamaños como

gravas o arenas (a éstos se les llaman naturales, pues sólo se recolectan, se refinan y clasifican).

Al hablar de agregados nos referimos a gravas, los cuales pasan por la malla de 3" y se retienen en la No. 4; y a arenas, que pasan por la No. 4 y se retiene en la No. 200. El proceso de producción de las gravas de acuerdo a (Mora, 2016) consiste en explorar una cantera de agregados para localizar los depósitos minerales de interés, y definir las características más competentes a nivel geológico.

Después del estudio del sitio, se comienza con la explotación de la cantera, este paso estará en función del tipo de roca que se encuentre, ya que determinará si se usará maquinaria pesada o explosivos. Si el material es proveniente de una matriz rocosa se tritura hasta conseguir la granulometría deseada, para posteriormente cribarla y clasificarla; si se obtuvo de un depósito, es decir, de manera fragmentada, se triturará en caso de ser necesario.

Por consiguiente, los agregados son disgregados y sometidos a un proceso de lavado en la máquina de rodillo. Cabe aclarar que el proceso descrito abarca tanto a agregados gruesos como finos.

2.1.2.1.1.3. Agua

El agua es la materia prima más usada en el mundo, tan sólo en el sector de la construcción es utilizada en todos los ámbitos, gracias a sus nobles propiedades físicas y químicas. Hablando del concreto, es de suma importancia que el agua cumpla con los estándares de calidad, pues influirá directamente en sus propiedades, por ejemplo, el desarrollo de su capacidad ligante, consistencia, trabajabilidad, hidratación, resistencia, etcétera.

El agua potable es un excelente recurso para la construcción, incluso para la elaboración del concreto, ya que carece de impurezas que afecten sus propiedades internas; ésta debe ser clara, libre de cantidades considerables de aceites, ácidos, sales, orgánicos, si cuenta con olor, sabor o color que crea inconsistencias, se debe revalorar. Además, es necesario seguir normas que rijan la calidad de ésta.

2.1.2.1.2. Aditivos

Los aditivos químicos son materiales que se añaden al concreto antes o durante el mezclado, con el propósito de modificar convenientemente su comportamiento en el

estado fresco o de inducir mejoras en determinadas propiedades del concreto endurecido (004. Calidad de Aditivos Químicos para Concreto Hidráulico, 2004).

Existe una amplia gama de aditivos en el mercado para programar las propiedades del concreto, como ya se definió, sin embargo, sólo se harán mención de algunos de los más empleados, tal es el caso de los reductores de agua, como el nombre lo indica, es para reducir la cantidad de agua, incrementar la resistencia, y aumentar la trabajabilidad.

Con respecto a los retardantes y acelerantes, se logra retardar el fraguado y aumentar el tiempo de manejo, para acelerarlo y obtener la mayor resistencia a corta edad, respectivamente. Además, con los superplastificantes, se reduce la cantidad de agua en el concreto manteniendo su consistencia del concreto sin endurecer, los vuelve muy fluidos sin afectar sus propiedades mecánicas. Con base a los inclusores de aire, estos crean numerosas burbujas pequeñas de aire, su función es producir espacios, para las posteriores expansiones del agua cuando alcance bajas temperaturas y se congele, evitando así el agrietamiento.

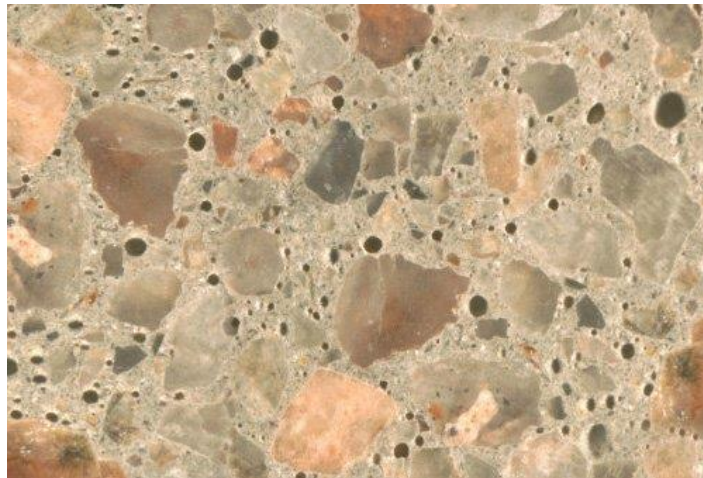


Imagen 3 Sección de concreto con aditivo incorporador de aire. Tomado de: (Hormigon, 2018).

2.1.2.1.3. Adiciones minerales

Las adiciones minerales no difieren mucho en lo propósitos que se tienen sobre el concreto con los aditivos, pues éstos también buscan manipular sus propiedades en estado fresco y endurecido, como lo es la trabajabilidad, durabilidad y resistencia. En general, el concreto contiene cementos con estas adiciones, los cuales son productos de origen natural o subproductos de otros procesos. A continuación, se describirán las características intrínsecas de algunos de ellos.

2.1.2.1.3.1. Microsílice

La microsíllice (dióxido de silicio amorfo SiO_2) o también conocido como humo de sílice adoptado con esta denominación por la ASTM (American Society for Testing and Materials) y el ACI (American Concrete Institute) en referencia al humo de sílice condensado. Es un subproducto industrial derivado de la producción de silicio metálico (ferrosilicio), expresado coloquialmente (Toxement, 2016) *es el hollín que queda adherido a las mangas del filtro del horno cuando los gases pasan a través de éste*. Sus partículas son alrededor de 100 veces más pequeñas que las del cemento.

Al hidratarse el cemento libera cal, la cual reacciona con el microsíllice en condiciones de humedad y a temperatura ambiente, formando cementantes secundarios estables favoreciendo las resistencias del concreto. además, éstos no generan reacciones exotérmicas en la hidratación (liberación de calor). El tamaño de partícula hace ocupar la mayoría de los vacíos, volviéndolo más denso.

2.1.2.1.3.2. Ceniza volante

Las cenizas volantes corresponden a un subproducto de la quema de carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad. Son unas puzolanas, es decir que contienen materiales aluminosos y silíceos formando cemento en presencia de agua, éstas representan un ahorro económico en los concretos, sin embargo, su uso como mezcla en lugar de como reemplazo del cemento, es más aceptado (CHRYSO Aditivos España, 2020).

Comúnmente se cuenta con dos tipos de cenizas volantes: la clase F y C, que reducen el riesgo de expansión al ataque de sulfatos, las primeras con más bajo contenido de calcio que las segundas. Éstas están finamente divididas en aluminosilicatos con cantidades variables de calcio, cuando se mezcla con cemento y agua, reaccionará con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento para producir varios hidratos de silicato de calcio (C-S-H) e hidratos de aluminato de calcio. Los beneficios de estas reacciones son la reducida demanda de agua, menor sangrado y segregación, mejor cohesión, durabilidad, resistencia a largo plazo.

2.1.2.1.3.3. Metacaolín

El metacaolín es un material cementante que se produce al calcinar el caolín a temperaturas que oscilan entre los 500°C y 600°C , donde se da lugar a una

transformación en su estructura cristalina. Se usa como puzolana artificial en la producción de morteros y concretos.

El metacaolín reacciona con el hidróxido de calcio de la hidratación del cemento y forma silicatos, silicoaluminatos y aluminatos de calcio hidratados, éstos se adentran en los espacios del cemento, dando lugar a una matriz concentrada y al aumento de la resistencia, a la reducción de la permeabilidad y de la reactividad álcali-sílice, al incremento de resistencia al ataque químico y al ciclo hielo/deshielo, mejorando así la durabilidad (ARCIRESA, 2012).

2.1.2.1.3.4. Escoria de alto horno

Es un producto derivado de la manufactura del hierro fundido a alto horno, material granular vítreo, se originan en un alto horno a partir de las impurezas en los minerales de hierro, consiste principalmente en silicatos y aluminosilicatos de calcio. Se requiere mezclar con otros materiales cementantes que activen sus propiedades cementosas.

Algunas de las características en las que destacan sobre el cemento Portland, es el menor calor de hidratación, gran resistencia a sulfatos, reducción a la reacción agregado-álcalis. No obstante, presenta inconvenientes como una reducción de la resistencia a edades tempranas y una resistencia similar o mayor a edades más avanzadas.

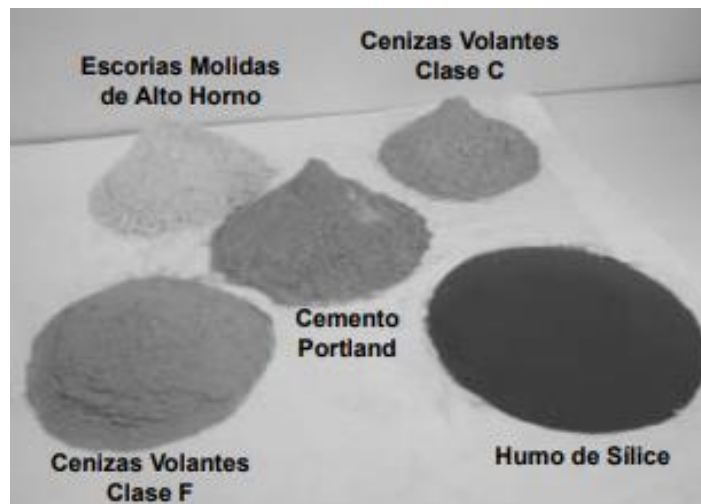


Imagen 4 Muestras de adiciones minerales. Tomado de: <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2020/04/CIP30es.pdf>

2.1.2.2. Demolición

Las demoliciones y desmantelamientos son los trabajos que se ejecutan con el objeto de deshacer o desmontar una estructura o parte de ella, seleccionando los materiales aprovechables y retirando los escombros de acuerdo con lo fijado en el proyecto u ordenado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (02. Estructuras, 2000). A pesar de que la definición anterior dada por la Norma N·CTR·CAR·1·02·013/00, hace referencia a la demolición en carreteras, se observa que puede ser aplicado a diferentes áreas de la construcción. La demolición es, entonces, el resultado de las actividades ejecutadas mediante diversos mecanismos y procedimientos, con el fin de derribar una estructura portante o construcción.

La demolición, es una etapa del ciclo de vida de las construcciones más compleja y profunda de lo que se creó, pues más allá de derribar estructuras, abarca temas que competen a diversos sectores (construcción, salud y ambiental).

En este proceso se deben seguir pasos que garanticen seguridad, hay distintos tipos de demolición de acuerdo a la magnitud, técnicas y condiciones de ésta, se encuentran desde mecánicas, tradicionales, en siniestros, con explosivos. A grandes rasgos se llevan a cabo las siguientes fases: Gestionar los productos peligrosos existentes en la edificación, preparar la zona a demoler, mantener el terreno en condiciones adecuadas para su reutilización, recolección y transporte de los escombros a almacenes para su procesamiento y reciclaje. Sin embargo ¿en realidad se aplican todos estos pasos?

La Cámara Mexicana de la industria de la Construcción (CMIC) en una colaboración con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), plantearon un Plan Nacional de Manejo de Residuos de la Construcción, con el fin de alcanzar las metas ambientales del Plan Nacional de Desarrollo (2013-2018) y promover la aplicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo.

En el Plan Nacional de Manejo mencionado anteriormente, se realizó un estudio para estimar la cantidad de residuos generados para la construcción y demolición. Los resultados arrojados indican una *Generación Anual Estimada de 6 millones de toneladas de RCD para el año de referencia (2011)*, lo que significa una generación diaria de cerca de 17,000 toneladas, a nivel nacional (CMIC & SEMARNAT, 2013). La cantidad de

escombros que se registraron en el terremoto de septiembre del 2017, fueron al menos de 26, 000 toneladas, una suma con una escala notoriamente alta (RCM, 2017).

Después del catastrófico escenario derivado del sismo de septiembre del 2017, la SEMARNAT estableció un documento con los criterios para el manejo de los residuos de construcción y demolición generados por este evento para México, Morelos, Puebla y Ciudad de México, con el fin de evitar amenazas a la salud y al medio ambiente.

En dicho documento se consideraban ubicación de sitios para disposición final, donde resaltaba el evitar arrojar dichos escombros a áreas naturales protegidas; operación de los sitios de disposición final y almacenes temporales, aquí se describen las condiciones que deben cubrir éstos depósitos, por ejemplo contar con un sistema de dren de aguas de escorrentía y lluvias; aprovechamiento y reciclaje de residuos de construcción y demolición, que consiste en separar los residuos, y en el caso del concreto tratarse para su reúso pétreo; y por último el saneamiento y clausura de sitios de disposición final.

Pero, ¿se llevó a cabo el protocolo sugerido por la SEMARNAT respecto a los escombros de dicho sismo? Eso aún es un misterio, ya que en noviembre del 2017 el gerente técnico de Concretos Reciclados, Enrique Granell, declaró que no había recibido ningún m³ de esos escombros, y aseguraba que sus clientes eran particulares, empresas socialmente responsables, o con alguna certificación tipo ISO que los obligaba a reciclar sus materiales (RCM, 2017).

En sólo algunos estados en México se ha implementado el manejo de los residuos de demolición, la gestión en materia de éstos, presenta serias deficiencias, son pocos los que tienen la infraestructura adecuada para el manejo de éstos, lo cual refleja una clara insuficiencia en el desarrollo de esta actividad (CMIC & SEMARNAT, 2013).

2.1.2.3. Impacto ambiental

Se ha mencionado reiteradas veces que el concreto es el material más usado en la construcción y en el mundo después del agua; eso conlleva a que su producción requiera de la explotación mayúscula de materias primas, demandando una gran cantidad de combustibles para la gran energía necesaria y, a consecuencia de ello, liberando gases de efecto invernadero como es el dióxido de carbono CO₂. Su unidad de referencia es el carbono equivalente (CO₂eq). Un parámetro conocido por todo el globo es la huella de carbono, se refiere a la cantidad de emisión de gases que contribuyen al cambio climático.

De entre los compuestos del concreto, la producción del cemento es la que tiene mayor peso en la contribución de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, tan sólo hay que analizar los siguientes datos: es responsable de alrededor del 5% de las emisiones de CO₂; cada año, la industria del concreto usa 1.6 billones de toneladas de cemento, y en cada una de éstas se emite 1 tonelada de CO₂ a la atmósfera. Además, al construir se usa maquinaria pesada, produciendo más emisiones de CO₂, también ocurre con el transporte de los materiales al lugar de la obra, representando entre un 6 a 8% de las emisiones totales de GEI para una obra (Aceves-Gutierrez, Lopez-Chávez, Mercado-Ibarra, & Arevalo-Razo, 2020).

Los datos mencionados anteriormente sólo abarcan la fase de fabricación del cemento, pero seguramente las cifras de las fases de construcción, uso y posterior demolición serían también de gran importancia.

En México, el panorama que concierne al concreto con relación al impacto ambiental tampoco resulta alentador, se producen alrededor de 41 millones de toneladas de cemento al año, representando 325 kg por habitante; su fabricación produce más del 4% de las emisiones totales de equivalentes de dióxido de carbono, en 2013, liberó aproximadamente 20 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, así mismo, su uso de energía sumó 9 millones de toneladas de CO₂eq. (Mors, 2018).

Otro de los aportes destacables que se tienen en reporte final, perspectivas para promover la sustentabilidad de la industria de la construcción con un enfoque al concreto de la autora Renee Mors, es que la industria de la construcción en México derivó 6 millones de toneladas de residuos en promedio entre 2006 y 2012; de los cuales, el 80% del concreto, se depositó con planes para reusarse, lo cual no era un hecho. También menciona un hecho decepcionante, en la Ciudad de México en 2010, se estimaron 7 mil toneladas diarias de residuos de construcción (RCD), el 1% se reciclaron y el 80% terminaron en vertederos.

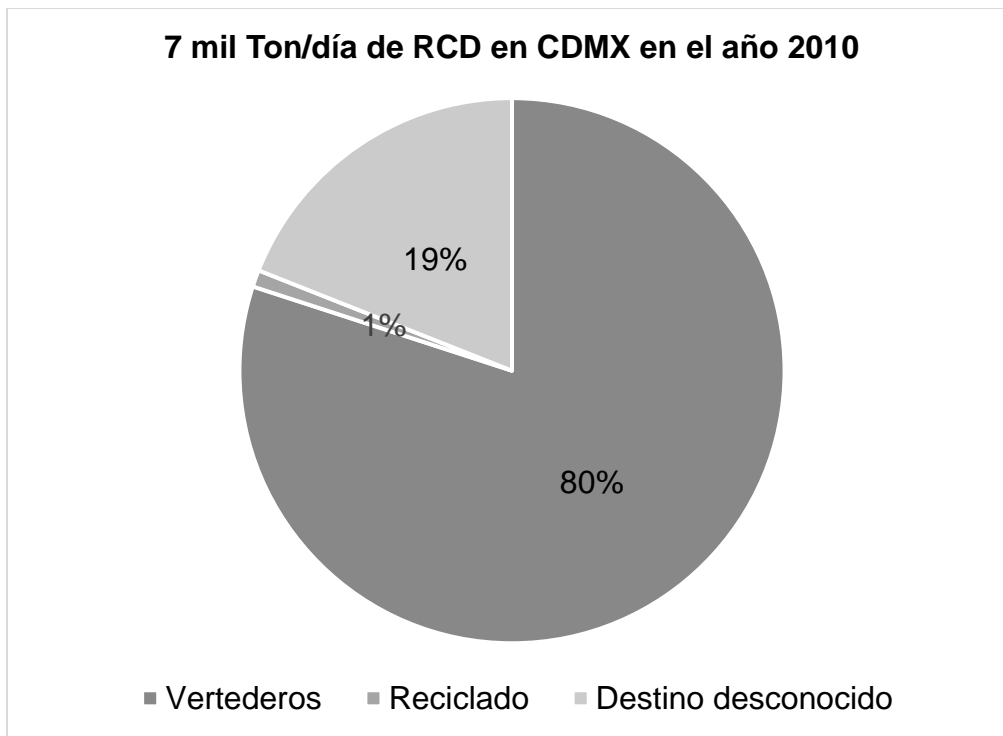


Figura 2 Representación gráfica de la generación de RCD en el 2010 en CDMX, de acuerdo con la Autora Renee Mors.

Después de conocer de manera poco profunda los datos numéricos referidos arriba, queda más que claro que el sector de la construcción toma un papel protagónico en el cambio climático, he ahí la importancia de buscar mejores alternativas y soluciones en todos sus rubros (fabricación, transporte, construcción, uso, demolición), para así poder efectuar un cambio que seguramente será notorio en el planeta.

2.2. Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD)

En el capítulo anterior se pudieron apreciar aspectos como su producción, demolición y el impacto ambiental que genera; pese a las virtudes que ofrece al sector de la construcción, no se pueden ignorar los efectos no tan benévolos que brinda al planeta. Una de las problemáticas que se desencadenan de la producción del concreto, es la excesiva demanda de materias primas, las cuales, cada día están más cerca del agotamiento, esto requiere de una inmediata solución; el reciclado de los residuos de construcción y demolición, podría ser una práctica para amortiguar los estragos de este material sustancial.

2.2.1. Definición de RCD

Los residuos de construcción y demolición, conocidos por sus siglas como RCD, son materiales esencialmente desechados, como su nombre lo dice, por el sector de la

construcción, abarcando principalmente las etapas de creación, demolición y restauración de edificaciones y cualquier obra civil. Éstos no consideran a los Residuos Sólidos Urbanos (generados por actividades domésticas o de establecimientos públicos -empaques, envases, etc-).

Generalmente los materiales que entran en esta categoría son inertes (no son química ni biológicamente reactivos), conformados por: tierras y agregados mezclados, restos de concreto, restos de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, ladrillos, cristal, plásticos, yesos, metal (acero de refuerzo), y maderas, principalmente. (Ambiental, 2006-07)

Son diversos los parámetros para clasificar a los RCD, algunos de ellos son de acuerdo a su origen o a su naturaleza. Según su origen pueden ser materiales de excavación: tierra, arena, grava, rocas. Construcción y mantenimiento de obras civiles: asfalto, arena, grava y metales, etc. Materiales de demolición: bloques de concreto, ladrillos, yeso, porcelana y cal-yeso.

Otra de las clasificaciones es por su naturaleza: inertes, que como ya se mencionó, no producen cambios químicos ni biológicos significativos, y no amenazan la salud humana, por ejemplo, restos de concreto, los ladrillos, las tejas, el vidrio y cualquier tipo de tierra o canto. Residuos no peligrosos, no presentan problemas de toxicidad, pero producen en otras sustancias cambios físicos y químicos, como la madera, plástico, papel, yeso, textiles, metales. Residuos peligrosos, contienen sustancias tóxicas, pueden ser, pinturas, disolventes, plomo, amianto, productos radioactivos (de Santos Marián, Monercillo Delgado, & García Martínez, 2011).

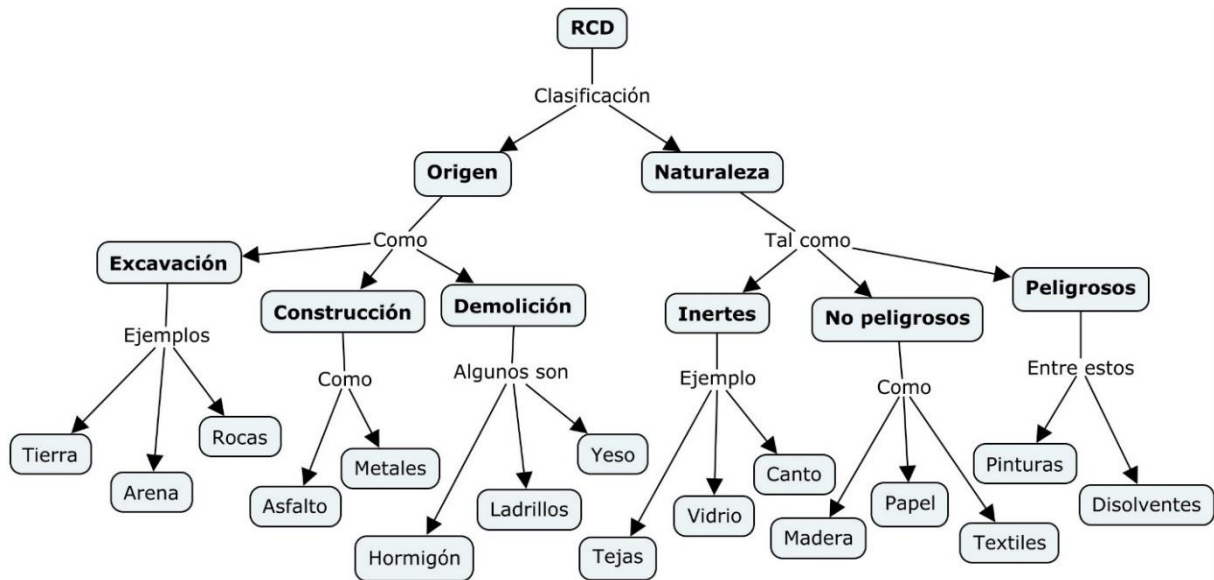


Figura 3 Ejemplos de la clasificación de RCD.

2.2.2. RCD aptos para el reciclaje

Es notable que en la clasificación de los RCD se mencionan residuos peligrosos, y aquellos que producen cambios químicos en otros materiales, por lo que es necesario una evaluación y análisis de éstos, para determinar si cumplen con requisitos para ser reciclados. Es necesario una correcta gestión de los RCD, para que exista una adecuada selección y garantizar materiales competentes y libres de residuos peligrosos. A continuación, se mencionarán algunos de los RCD más propensos al reciclaje.

2.2.2.1. Madera

La madera representa entre el 10-15% de los residuos que se generan en el proceso de construcción de obras civiles, especialmente la utilizada en obras falsas, este porcentaje es digno para su reciclaje. A lo largo del bosquejo de información de esta temática, se pudo abstraer, que España es uno de los países impulsores del reciclaje de madera, ya que no sólo colabora con el planeta, sino que no goza de una inmensa variedad de zonas para extraer esta materia prima.

El proceso de reciclaje de madera no es tan complejo ni complicado, primero es necesario una correcta selección, clasificación, limpieza, es necesario separar todo aquello que no sea madera, como clavos, tornillos, cartón etcétera; posteriormente se tritura para volverla aserrín. El destino de la madera reciclada es fuente de energía, compost, tableros de aglomerado para crear muebles, carpintería interior (puertas, techos y paredes no

estructurales). Como dato curioso, El pabellón Clydesdale para los juegos olímpicos en Sidney (2000) fue hecho con madera reciclada.



Imagen 5 Residuos de madera generados en obra.

2.2.2.2. Metal

Es bien sabido que los metales se manifiestan en la construcción de variadas formas, debido a sus versátiles propiedades, como su maleabilidad, rigidez, durabilidad, por mencionar algunas; las principales maneras en las que se les aprovechan son como refuerzo de estructuras y para crear otras que soporten grandes pesos. Los metales más omnipresentes son el hierro y aluminio, así como la aleación entre éstos que dan lugar al acero.

La representación de los metales en los RCD varía en cada país, en España de acuerdo con la CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) el Plan de Gestión de Residuos y Construcción y Demolición de la comunidad de Madrid menciona que éstos componen el 2.5% de los RCD, un artículo de la Universidad del Norte en Colombia, muestra que en Barranquilla componen el 5% (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo, Sánchez Cotte, & Rondón Quintana, 2017). Mientras que, en México, según la CMIC, éstos vienen incluidos en el 12% de los RCD clasificados como *Otros*.

Una de las ventajas que presentan los metales sobre otros materiales, es que éstos a pesar de ser reciclados, recuperan, o, mejor dicho, no pierden sus propiedades intrínsecas gracias a su configuración interna y a los enlaces de sus átomos; es por ello que alrededor del 95% de los metales usados en los edificios se reciclan, además este proceso ofrece un ahorro energético entre el 60% y 95% comparado con su producción original (primaria) (Metals & La).



Imagen 6 Demostración de residuos de acero en obra.

2.2.2.3. Concreto

En relación a las fuentes mencionadas en el apartado anterior que corresponde al metal, el concreto, figura aproximadamente el 12%-25% de los RCD en España, Colombia y México, que se traduce a un porcentaje significativo comparado con otros componentes, además, considerando que su producción requiere de una gran demanda de recursos naturales y energéticos, como ya se comentó anteriormente, su reciclaje debe ser enfatizado a nivel global.

Uno de los principales provechos que se tiene del reciclaje del concreto, es la obtención de agregado grueso, de esta forma se mitiga el uso de pétreas vírgenes; cabe mencionar que esta práctica aún no es tan impulsada en México como en otros países desarrollados.



Imagen 7 Residuos de concreto, tierras y agregados mezclados que disturbaban el aspecto de las calles de las urbes.

2.2.2.4. Pavimento asfáltico

El pavimento está expuesto a condiciones hostiles, en primer lugar, por la constante movilización de los vehículos, y, en segundo lugar, las condiciones climáticas (bajas y altas temperaturas, lluvias, etc), aunado a ello, su envejecimiento natural, vienen a ser factores para que su deterioro tienda a ser más apresurado; eso da lugar a que su mantenimiento sea más constante, y que su reciclaje sea considerado significativamente para ahorrar recursos, pues puede sólo requerir entre 1% al 3% de asfalto adicional, comparado contra un 6% necesario para una carpeta asfáltica nueva (Mendoza, Adame, & Marcos, 2020).

Las primeras técnicas de reciclaje de asfalto que se desarrollaron en Estados Unidos en la década de los 70, consistían en el transporte del material a una planta para tratarla, agregarle aditivos y pétreas vírgenes, esto implicaba realizar varios viajes de materiales. Posteriormente, se desarrollaron estrategias para reciclar en el sitio, los métodos más conocidos son: Reciclado en caliente (HMA), mezcla de asfalto a temperaturas de 165°C; reciclado en tibio (WMA), a temperatura de 100°C por medio de aditivos; reciclado en frío (CMA) *mezcla del pavimento flexible retirado y molido con una emisión asfáltica o con asfalto espumado y puesto de nuevo en sitio, compactada y sellada con una última capa de asfalto mezclado en caliente* (Mendoza, Adame, & Marcos, 2020).

2.2.2.5. Yeso en paneles

Gracias a su gran capacidad de moldearse, el yeso, es un material muy empleado en la construcción, principalmente como acabado de interiores, aislante térmico y acústico, en mampostería como mortero, etc. El yeso en paneles es uno de los formatos que mejor se aprovechan de este material, se le puede ver en paredes interiores de edificios. Éste consiste en yeso cubierto en papel y cartón.

El yeso en general, ocupa entre 0.2% hasta 1.5% de los RCD, varía de acuerdo a la región, y aunque el porcentaje relativamente bajo, no se debe ignorar ni omitir su reciclaje, pues la falta de depósitos de los residuos provoca la liberación de sustancias tóxicas; además conserva gran parte de sus propiedades aún después de su reciclaje.

La posibilidad de reciclar enteramente el yeso en paneles no es una fantasía, existen métodos que permiten hacerlo, podría reemplazar hasta el 25% del yeso natural para la formación de nuevos paneles, otra de sus aplicaciones es el mejoramiento de suelos, estabilización de taludes, absorción de grasa, por mencionar algunos. (Begliardo, Sánchez, Panigatti, & Garrappa, 2013).

2.2.2.6. Otros

En los desechos de la construcción también se encuentra mampostería, especialmente fragmentos de ladrillo rojo recocido, que, al ser mezclado con trozos pequeños de tejas, y cal, forma el cocciopesto, este es un material para revestir, se caracteriza por ser impermeable y muy resistente. *Es un material conformado por fragmentos de objetos y mamposterías de arcilla, pedacitos de mármol, barro, arena, fibras y un aglutinante de cemento. De esta mezcla resulta un compuesto muy compacto e impermeable* (Enolife, 2020).

Como antecedente es importante mencionar que, desde hace aproximadamente 2.000 años, en la antigua Roma se usaba el cocciopesto como revestimiento para construir tanques, baños termales, caminos y acueductos. Denominado originalmente como *opus signinum*; etimológicamente del latín: *opus*, "obra", y *signinum*, "procedente de Signia", hoy en día Segni, ciudad de que todavía existe hoy cerca de Roma.

Ofrece unas prestaciones tecnológicas tan elevadas que, a partir de orígenes en la antigua Roma, fue trasladado a las fachadas de los edificios de la laguna de Venecia, las

cuales están sometidas durante todo su ciclo de vida al deterioro causado por el agua salobre (Newsletter, 2019).

2.3. Concretos reciclados para la obtención de agregado grueso

Nuestro estilo de vida consumista está gobernado por la economía lineal; la gran mayoría de los productos que utiliza una persona promedio para cubrir sus necesidades básicas, pasan por el mismo proceso, extracción, producción y desecho, acto que se replica en escenarios de mayor envergadura como lo es en la industria de la construcción.

El concreto había estado regido por la economía lineal durante mucho tiempo, siendo un ejemplo perfecto del modelo *creadle to grave* (de la cuna a la tumba) en el análisis del ciclo de vida, es decir, que su punto inicial es su fabricación, y su punto final, su desecho. Sin embargo, la alarmante explotación de recursos no renovables encauzó a ciertas naciones a la implementación de una economía circular en el concreto, con el fin de reciclarlo, para que no se convirtiera en basura, sino, en materia prima de un nuevo producto para un nuevo ciclo de vida.

2.3.1. Antecedentes

El tema del concreto reciclado no surgió de un día a otro, aunque actualmente su práctica no se ha esparcido de manera uniforme en todo el planeta, se había hablado de ello desde la época de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945); al finalizar ésta, no era de extrañar que las naciones involucradas sufrieron daños de todo tipo, entre éstos, en sus construcciones, producto de los ataques explosivos.

Era necesaria la restauración inmediata de las ciudades, como las de Reino Unido y Alemania, ante esa necesidad, se tomaron los escombros de los bombardeos para reconstruir, además de que éstos representaban un problema de acumulación, eso marcó un hito en el reciclaje del concreto, pues motivó a Inglaterra, Alemania y Rusia a realizar investigaciones sobre las propiedades y comportamiento de éste, arrojándoles buenos resultados, lo que produjo que Estados Unidos se uniera al estudio del tópico.

A pesar de las gratas noticias del comportamiento del concreto reciclado, en Rusia se realizaron posteriores investigaciones, de entre los más reconocidos es el del Instituto de Investigación Gidrotrskhnicheskoge Stroiteistvo en 1946, en donde se realizó un estudio experimental, empleando los residuos del concreto como agregados, se concluyó que el

peso específico de éstos agregados era menor que el natural, además de que el concreto mostraba una resistencia más baja a la compresión pero más alta a la flexión.

Más investigaciones sobre el tema en cuestión salieron a la luz, en 1973 A. D. Buck, prosiguió con el estudio de las resistencias a compresión de este tipo de concreto, con una relación agua/cemento y trabajabilidad constantes, notó que, en su mayoría, las resistencias eran menores que las de las mezclas de control; pero, comprobó que la resistencia del concreto nuevo, es mayor que la resistencia del concreto original que en este caso se usa como agregado. Él menciona en su estudio “[...] *Tanto investigaciones anteriores como recientes indican que el concreto viejo triturado tendrá mayor absorción y rendimiento de concreto de menor resistencia, a igual relación agua-cemento y revenimiento que el concreto hecho con agregados similares no utilizados previamente. Cuando el hormigón original fue de baja resistencia a la acción de las heladas, el hormigón hecho usándolo como agregado había mejorado la resistencia a las heladas. Está concluido que es factible reciclar concreto para usarlo como agregado en concreto nuevo y puede convertirse en rutina*” (Buck, 1976).

La investigación “*Strength of concrete made from crushed concrete coarse aggregate*” (Resistencia del concreto hecho de agregado grueso de concreto triturado) realizada por Torben C. Hansen en 1983, aprobaba la factibilidad de crear concretos de resistencias bajas, sin que influyera el origen de concreto para el agregado reciclado, y que, al emplear sutilmente más cantidad de cemento, se podrían obtener mayores resistencias comparadas con el concreto original.

Parte de las aportaciones a estas investigaciones se tiene la de I.E. Martínez–Soto y C.J. Mendoza–Escobedo, en 2006, quienes establecieron que los concretos reciclados son apropiados para para las estructuras clasificadas en el grupo B como Subgrupo B2 (viviendas, oficinas, locales).

Un suceso destacable en la historia del concreto, es la inauguración del primer puente atirantado en el mundo construido únicamente con concreto reciclado, en abril de 2009 en la región de Valencia, en la carretera que une Manises y Paterna. Ese mismo año, a nivel mundial se lanzó la Iniciativa por la Sostenibilidad del Cemento CSI – Cement Sustainability Initiative, a través del Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible, el cual recluta empresas potenciales para desarrollar estrategias en pro de la sustentabilidad.

Como antecedente en México se tiene la creación de la empresa CONCRETOS RECICLADOS, S.A, encargada del reciclaje, trituración y clasificación de RCD (Robledo, 2020).

2.3.2. Panorama actual

La presente investigación ha mostrado de manera general, datos no favorables en cuanto a las aportaciones que tiene el sector de la construcción en la afectación del medio ambiente. Es de los principales emisores de gases de efecto invernadero, además de que se estima que el 50% de la explotación de los recursos naturales son aprovechados por ésta misma.

Dichas estimaciones sólo abarcan la fase de generación de algunos de los materiales más usados en la industria, como lo es el objeto de estudio presente, el concreto. Ahora bien, no se deben pasar desapercibido los RCD, en especial si abarcan una cantidad considerable en cuanto a los desechos generados en el mundo.

Se habla de que, en el año 2016, la Unión Europea generó alrededor de 2538 millones de ton de residuos de los cuales la contribución de la construcción fue del 36.4%. Esta industria es responsable del 29% de los vertederos en Estados Unidos, 40% en Brasil, 44% en Australia y el Reino Unido, 27% en Canadá y 23% en Hong Kong (Hasan Almusawi, Bin Abd Karim, & Ethaib, 2022).

Resulta imposible pensar que se debería frenar por completo el desarrollo de la construcción para evitar más daños al planeta, pues éste ha sido históricamente un factor clave para el crecimiento de la humanidad, lo que se traduciría a un retroceso de la misma; sin embargo, el continuar con la explotación desmedida de los recursos naturales no renovables, y por ende de la contaminación del planeta, representaría un retroceso aún más catastrófico.

En consecuencia, el sector de la construcción tiene que desempeñar un papel importante en la reducción de la amenaza a los recursos del planeta; una de las medidas que se han tomado para efectuar un cambio positivo, es, como ya se ha mencionado, el reciclaje de del concreto, ello contribuiría a la disminución de desechos acumulados y demanda de materia prima, sumándole ventajas económicas.

Actualmente, las potencias mundiales se encuentran motivadas en el impulso del manejo adecuado de RCD, entre los que destacan Alemania, Holanda, Dinamarca, Suiza, Japón,

España y Estados Unidos, que incluso han formado marcos legales, con una apropiada legislación y normas que promueven su correcta práctica, especialmente en la obtención de agregados.

En dichos países se han llevado una serie de proyectos elaborados con materiales reciclados, conformando el concreto estructural de un máximo de 20% de este tipo de material, por ejemplo, viaductos en Holanda, viviendas en Alemania, losas de entrepiso en Reino Unido, carreteras, estructuras de escollera, obras exteriores en Japón (Rivera, Guerrero, Espinoza, Millon, & Áreas, 2020).

Internacionalmente se han realizado investigaciones exhaustivas respecto a la calidad del concreto derivado de material reciclado. El Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés), creó el comité 555 “Concrete with Recycled Materials” (Concreto con Materiales Reciclados), mismo que ha publicado investigaciones sobre la factibilidad de este tipo de concretos (Rivera, Guerrero, Espinoza, Millon, & Áreas, 2020).

2.3.3. Proceso

El proceso para reciclar concreto no es tan sofisticado como suena, pues generalmente engloba los siguientes pasos: en una planta de reciclaje, se reciben los residuos que estén libres de agentes peligrosos y contaminantes, y se someten a una primera fase que consiste en una pre-separación, donde se apartan de manera manual los plásticos, papel, madera, entre otros que no sean metálicos, e incluso se emplean máquinas que incorporan cuchillas de aire para remover esos materiales ligeros.

Enseguida, el concreto libre se introduce a una machacadora o trituradora, para posteriormente, por medio de un sistema de imanes separar los metales, se reincorporan las cuchillas de aire para eliminar todos aquellos componentes ligeros que se infiltraron de la primera fase.

Cabe mencionar que el tamaño de los agregados requeridos puede variar de acuerdo a la maquinaria empleada, el proceso generalmente inicia con una trituradora primaria, reduciendo el tamaño a diámetros de entre 8 -10 cm, en algunas plantas los reducen a un tamaño máximo de 3”, si se requieren agregados de menores dimensiones, se puede incluir una trituración secundaria.

En la siguiente etapa, se clasifica el agregado de acuerdo a la granulometría que se deseé, mediante equipos de cribado, seguido de un lavado y una nueva posible clasificación mediante tamizado.

También es muy común encontrar plantas móviles en la obra, para realizar la trituración requerida in situ, las cuales consisten simplemente en el machaqueo y cribado, trayendo como ventaja, el ahorro en costes de traslado del material a reciclar.

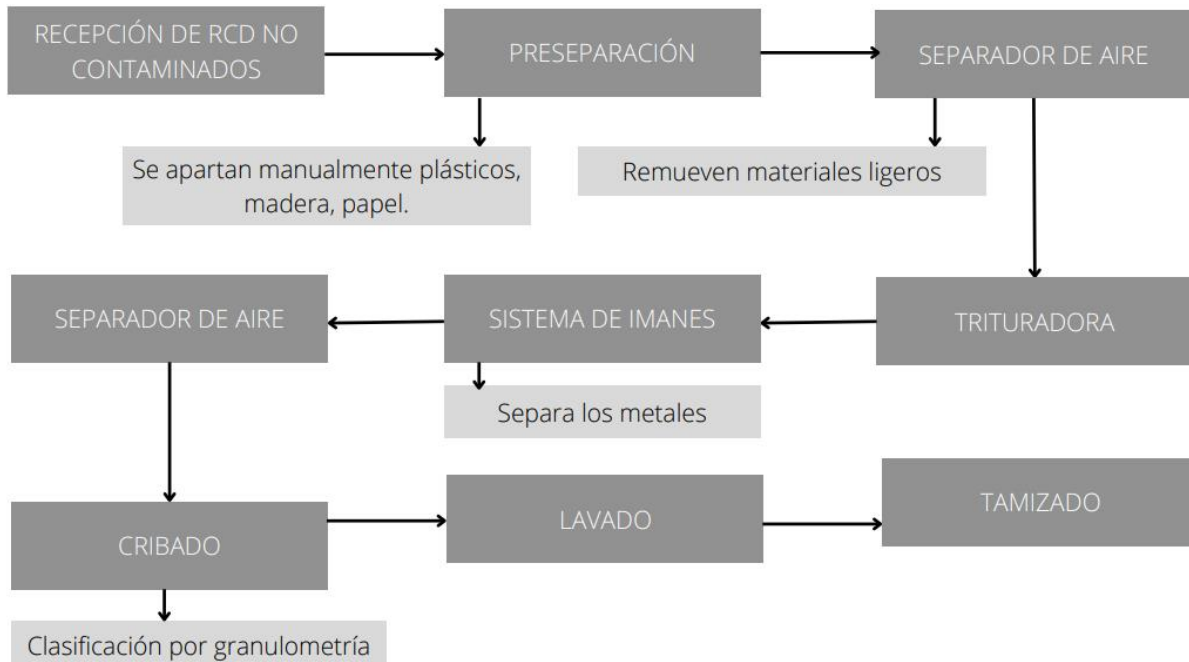


Figura 4 Esquema que simplifica el proceso de reciclaje del concreto.

2.3.4. Características y propiedades

Los concretos reciclados habían sido estigmatizados por mucho tiempo, debido a la creencia de que al ser producto de algo que ya cumplió su función, éste perdería calidad. Sin embargo, se han realizado investigaciones que refutan esas ideas, demostrando que sus propiedades aún son dignas para una revaloración.

2.3.4.1. Físicas y mecánicas

Las características físicas y mecánicas del concreto son las que lo convierten en el material más empleado en la construcción, ya que se prestan para crear estructuras de formas versátiles sometidas a considerables esfuerzos. Ahora bien, resulta interesante analizar dichas propiedades en el concreto conformado de cierto porcentaje de agregado grueso reciclado, para de esta forma, obtener datos más objetivos, romper con los

estigmas sobre este material, y fomentar su empleo. Para ello, se obtendrán resultados de diversos experimentos realizados, que se encuentran disponibles en Tesis y artículos del área.

2.3.4.1.1. Módulo de elasticidad

Esta propiedad mecánica demuestra la capacidad que tiene el concreto para deformarse elásticamente, misma que se puede obtener al aplicar cargas conocidas a un espécimen para valorar su deformación, es un elemento importante para la determinación de la rigidez (Pauw, 1960).

De acuerdo a experimentaciones, el módulo de elasticidad es una de las propiedades que más modificaciones sufre en el concreto reciclado, una de las razones, es debido al mortero adherido, el cual tiene un módulo de elasticidad menor, reduciendo el módulo de elasticidad del concreto reciclado comparado con el concreto conformado íntegramente con agregados naturales; además, el agregado reciclado adquiere una menor densidad, es más poroso, y se crea un vínculo débil entre el cemento ya existente y el nuevo.



Figura 5 Tipología del agregado de concreto, según el autor Jeonghyun Kim. Adaptado de (Kim, 2022).

Investigaciones arrojan que en sustituciones de hasta 20% de agregado grueso natural por reciclado, no demuestra gran incidencia en el desempeño del módulo de elasticidad; sin embargo, cuando se sustituye el 25%, hay una disminución del 15% de esta propiedad, comparado con un concreto convencional con la misma dosificación. Al sustituir un 100% se estima que el decremento sea de un 40%; además es importante señalar que, al adicionar agregado fino, la disminución del módulo se tendría de hasta un 80% aproximadamente (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, 2015).

En el artículo de (Kim, 2022) se hace mención de un estudio titulado *The effect of residual mortar in recycled aggregate on behavior of recycled aggregate concrete* (El efecto del mortero residual en el agregado reciclado en el comportamiento del concreto con

agregado reciclado) realizado en la Universidad de Tecnología y Educación de Corea en el año 2016, se experimentó utilizando agregados reciclados de concreto de alta calidad (ARA), y de baja calidad (ARB) obtenidos de la misma fuente de residuo de concreto, al reemplazar 25%, 50% y 100% de agregados, se obtenía un módulo de elasticidad en los concretos de ARA de 22.7 GPa, 22.4 GPa, y 23.6 GPa respectivamente; mientras que en los concretos de ARB los resultados eran 20.6 GPa, 19.3 GPa, y 17.4 GPa. Dicho hallazgo demuestra que lógicamente la calidad del agregado reciclado va a influir en las propiedades mecánicas del nuevo concreto.

Se menciona que algunos estudios arrojan que al agregar 100% de ARA en el concreto, se observa una disminución del 3-17% del módulo de elasticidad, otros deducen que con sólo reemplazar el 25% se obtiene una pérdida aproximadamente de 33% de esta propiedad, incluso se llega a concluir que hay una pérdida 7-14% al agregar completamente ARB. En el mismo artículo (Kim, 2022), se explica que dichas “discrepancias” se deben a que la calidad del agregado reciclado no es el único factor que influye en el desempeño de esta propiedad, sino que también están involucrados los materiales cementantes, diseños de mezcla y todo lo que engloba la tecnología del concreto.

Para argumentar lo anterior, se comparte en el artículo los resultados de un experimento, se produjeron concretos del mismo lote de agregado natural con esfuerzos a compresión de 40 MPa, 60MPa, y 100 MPa; los cuales se trituraron y obtuvieron agregados reciclados para fabricar concretos, cuyos módulos de elasticidad fueron evaluados, obteniendo 37.2 GPa, 40.1 GPa, y 46.1 GPa, con respecto a los concretos originales, lo que demuestra que se tuvieron pérdidas relativamente diferentes a pesar de que los agregados reciclados provinieron de la misma fuente y por ende con la misma calidad.

2.3.4.1.2. Resistencia a compresión

Se dice que es la característica mecánica principal del concreto, inclusive en el mercado es identificado por esta propiedad. Se refiere a la capacidad que tiene este, de soportar una carga por unidad de área, se expresa en esfuerzo (kg/cm^2 , MPa, etc). Esta propiedad es de suma importancia ya que determina la utilidad que se le vaya a destinar.

Hay un declive en la resistencia a compresión de los concretos convencionales al sustituir determinado porcentaje de agregado natural por agregado reciclado, para las mismas condiciones y relación agua/cemento. La disminución de resistencia se acentúa a medida

que aumenta la cantidad de agregado reciclado en la mezcla; y la situación se agrava si el agregado fino también es reciclado.

Estudios de la materia describen que al sustituir el 100% del agregado natural por el reciclado en el concreto, la resistencia a la compresión se ve disminuida en un 20-30%. Si se añade un 50%, las pérdidas son de 2-15%; al reemplazar un 20 % y/o 30%, decrece hasta menos del 5%. Como se mencionó en el apartado anterior, la calidad de los agregados juega un papel importante en las propiedades del nuevo producto, así mismo, algunas de las causas de que se tengan disminuciones, son la mayor absorción y porosidad, y aumento de zonas débiles en los enlaces pasta-agregado del concreto original y la zona de contacto entre la pasta nueva y la pasta contenida en el agregado reciclado, lo que se conoce como la zona de transición interfacial (ITZ, Interfacial Transition Zone) (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, 2015).

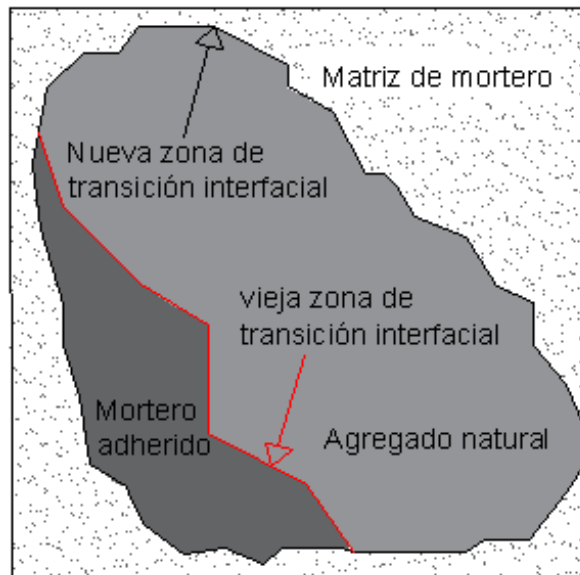


Figura 6 Esquema que representa una partícula de agregado de concreto reciclado, de acuerdo a (Adams & Jayasuriya, 2019).

Existe una gran relación entre la ITZ y la relación a/c ; con una elevada a/c en el concreto reciclado, la nueva ITZ será más débil que del concreto original, pero la resistencia del agregado reciclado (AR) será la misma que la del agregado natural (AN); y viceversa, con una baja a/c , la nueva ITZ será más resistente que la antigua, y disminuye la resistencia del AR comparada con la del AN. Esta condición depende mucho de la calidad del agregado original.

Es sabido que al haber presaturación en los agregados, disminuye la relación a/c, aumentando la resistencia a la compresión, significa que, al aumentar la cantidad de AR, disminuirá la a/c efectiva, ya que presentan un grado de absorción alto, reduciendo el agua superficial, hecho que traerá ventajas a largo plazo.

2.3.4.1.3. Resistencia a tracción

Como ya se ha mencionado, el concreto presenta propiedades mecánicas excelentes, como lo es la resistencia a la compresión, sin embargo, no se puede decir lo mismo frente a la tensión, ésta es mucho menor que la primera, en torno a un 10%. El concreto se fisura fácilmente ante los esfuerzos de tracción, volviéndolo débil, razón por la cual el armarlo con acero de refuerzo se ha vuelto una práctica cotidiana, pues éste tiene una gran capacidad de resistir la tensión.

Es lógico pensar que a medida que se sustituye agregado natural por reciclado en el concreto se vea un decremento en su resistencia a la tracción; es sorprendente que experimentos han demostrado que en ocasiones los concretos reciclados desarrollan similares o incluso ligeramente mejores resultados en lo que respecta a la resistencia a la tensión. Este hecho está íntimamente relacionado con la calidad del agregado.

El concreto elaborado con ARA puede desempeñar similar resistencia a tracción que el de agregado natural sin importar al porcentaje ARA añadido, lo que hace suponer que esta propiedad no se ve muy afectada por este factor.

En un estudio realizado por (Yang & Kim, 2016) se usó concreto con agregado reciclado de media calidad (ARM), con sustituciones de 30%, 50% y 100%, donde se obtuvo que la resistencia a tensión disminuyó un 1%, 6% y 11-17% respectivamente. En el artículo (Kim, 2022) se menciona que algunos estudios señalan que concretos con agregados de baja y media calidad presentan características similares en tensión, mientras que en otros estudios se reducía del 27-46% en un reemplazo del 100%. Sin embargo, a través de más estudios se llegó a la conclusión de que la cantidad de agregado reciclado no era tan relevante en la tensión como lo es en la compresión, pero que la calidad de este, sí.

Irónicamente se observó que la resistencia a la tensión era más baja en concretos con ARA, que en los que contenían ARB, ARM, AN, bajo el mismo nivel de esfuerzo a compresión, dicho acto es atribuido por las formas y texturas del agregado. Los ARB y ARM, tienden a ser más ásperos con formas angulares, debido a la presencia más

acentuada de mortero, contrario al ARA, éste presenta formas más redondas lo cual desfavorece a la adherencia por fricción (Kim, 2022).

2.3.4.1.4. Resistencia al corte

La resistencia al corte del concreto no es una propiedad que se tenga muy bien explayada, además de que su cálculo resulta un tanto complejo, pues en realidad no se sabe el momento exacto de su ocurrencia. Por ejemplo, al observar la falla en diagonal de una viga, en realidad se está apreciando el producto de la combinación de otros esfuerzos, como la tracción, que a su vez es una combinación con el cortante, pero en sí, no se ha tratado de la resistencia al corte puro, y es que generalmente surge cuando el momento flexionante y las cargas axiales están presentes; una de las causas de esta limitación, es el hecho de que el concreto es más débil a la tracción que al corte, por lo que la falla se debe a esfuerzos a tensión. Sin embargo, se han dado a conocer valores de esta propiedad, pero con ciertas discrepancias debido a los diversos métodos y criterios que se adoptan.

(Younis, El-Sherif, & Ebead, 2022) Demuestra una experimentación realizada a especímenes de vigas, elaboradas con concretos con AN y AR, de los cuales derivó 6 vigas, variando 3 condiciones de refuerzo para el cortante (sin estribos, con estribos, y refuerzo con fibra de vidrio -del cual no se profundizará-), como se muestra en la imagen 8, se evaluaron en 3 puntos de carga para comparar su resistencia al corte.

De la investigación, se obtuvo que, como era de esperar, la capacidad de carga en los concretos con AN era mayor que en los de AR, generalmente por 12%, dato que coincide con previas investigaciones. Esto se debe a que la fuerza de corte fue resistida por el entrelazamiento de los agregados en los concretos con agregado natural (CAN), en cambio, en los CAR al tener mayor porosidad, presencia de microgrietas, y débil zona de transición interfacial (ITZ) entre el mortero viejo con el nuevo, la resistencia al corte se vuelve débil.



a) Viga con agregado natural sin estribos



b) Viga con agregado reciclado sin estribos



c) Viga con agregado natural con estribos



d) Viga con agregado reciclado con estribos



e) Viga con agregado natural reforzada con fibras de vidrio



f) Viga con agregado reciclado reforzada con fibras de vidrio

Imagen 8 falla en las vigas probadas en la investigación donde, viga con agregado natural: (a) sin estribos, (c) con estribos, (e) refuerzo de fibra de vidrio; viga con agregado reciclado: (b) sin estribos, (d) con estribos, (f) refuerzo de fibra de vidrio, según (Younis, El-Sherif, & Ebead, 2022).

2.3.4.1.5. Trabajabilidad

La trabajabilidad del concreto es sin duda un aspecto físico fundamental en la tecnología del mismo, pues no sólo es un parámetro para determinar su uso, sino que en la obra representa un factor incidente en los procesos constructivos; determina la facilidad de su manipulación en estado fresco, abarcando su manejo desde su transporte, colocación, compactación, sin que éste sufra segregaciones; esta viene dada por su consistencia y cohesividad.

Una de las vertientes para medir la trabajabilidad del concreto es su revenimiento. En el artículo que se ha citado (Kim, 2022), se dan a conocer resultados de estudios realizados, en un experimento se usaron dos mezclas de CAR, con misma cantidad de dosis, a/c y cantidad de agregado; una con densidad seca al horno de 2.54 g/cm^3 y absorción de agua de 2.26%; y la otra con 2.58 g/cm^3 y 1.82% respectivamente. En la prueba de revenimiento se observó que en la primera hubo una disminución de 9cm a 8cm, mientras que en la segunda aumentó a 11cm.

En otro experimento se usó un CARM (concreto de agregado reciclado de mediana calidad), con una densidad de 2.16 g/cm^3 y absorción de agua del 7.65%; donde se reemplazó 25%, 50%, 75% y 100% del agregado, se advirtió que el revenimiento tendió

a disminuir a 9.5 cm, 8 cm, 7.5 cm, y 7 cm, correspondientemente; traduciéndose a que a medida que aumentaba la cantidad de AR, disminuía el revenimiento, y con ello, la trabajabilidad, sin embargo, algunos autores no aprecian una gran relación entre el revenimiento con la calidad y cantidad de los agregados en el concreto reciclado.

Existe otra variante que podría determinar la trabajabilidad, el estado de humedad del agregado, mismo que tiene mayor peso en los AR, estos en su estado saturado superficialmente seco, tienen humedad en los poros del mortero adherido, aumentando el contenido de agua en el concreto, esto trae como consecuencia una disminución en el esfuerzo a fluencia y un aumento de revenimiento. A partir de distintos estudios se dedujo que conforme se añadía más cantidad de AR en el concreto, aumentaba la a/c , esto gracias a los poros del mortero original (Kim, 2022).

Un estudio demostró que se requirió 3.1-9.4% más agua en un CAR que en un CAN, para lograr una trabajabilidad similar, esto debido al aumento de fricción intergranular por la forma angular y la textura áspera del AR; hecho comprobado por otro estudio donde se usó AR con forma más redonda, produciendo el efecto de rodamiento de bolas, volviéndolo más fluido. Aunque se ha reportado que sin influir la calidad del agregado ni su concentración en la mezcla, se puede alcanzar una buena trabajabilidad con sólo usar aditivos y un buen método de prehidratación (Kim, 2022).

2.3.4.1.6. Durabilidad

La durabilidad es un aspecto de vital importancia para determinar la vida útil de una estructura, se refiere a la capacidad que tiene el concreto para resistir los agentes físicos, químicos, biológicos y climáticos que lo rodean en el ambiente (Ramírez, Transferencia Tec, 2020).

Reiteradas veces se ha mencionado que las propiedades del CAR no resultan las más favorables comparadas con CAN (a menos que se use la tecnología y metodología adecuada), esto debido a una de las principales diferencias entre el AR y el AN, el antiguo mortero adherido en el primero. Desencadenando algunos de los factores que comprometen la durabilidad del concreto como la absorción del agua, porosidad, dilatación térmica y la penetración de cloruros.

El ataque por cloruros representa una gran amenaza para el concreto, sobre todo, para el concreto armado; es por eso que, en la fase de su diseño, se le presta detallada

atención, pues es un gran determinante de su durabilidad, una de las pruebas más comunes en relación a esta propiedad, es la de rápida migración de cloruro (RCMT en inglés). En uno de los experimentos realizados en la investigación (Mostafa & Farzad, 2022) se crearon diferentes ejemplares de concreto, con las siguientes condiciones: a/c de 0.35, 0.40 y 0.45; dosificaciones de cementante en 325, 375 y 425 kg/m³, y con una sustitución de AN por AR del 25% y 50%; dichas muestras se sometieron a la RCMT. Los resultados indicaron que de acuerdo a las porciones de aglutinante 325, 375 y 425 kg/m³, en CAR (25%) el índice promedio de RCMT alcanzado fue de 6%, 6.9% y 7.3% respectivamente, comparado con el espécimen de referencia. Mientras que en CAR (50%), fue de 15.7%, 17.6%, y 18.4%.

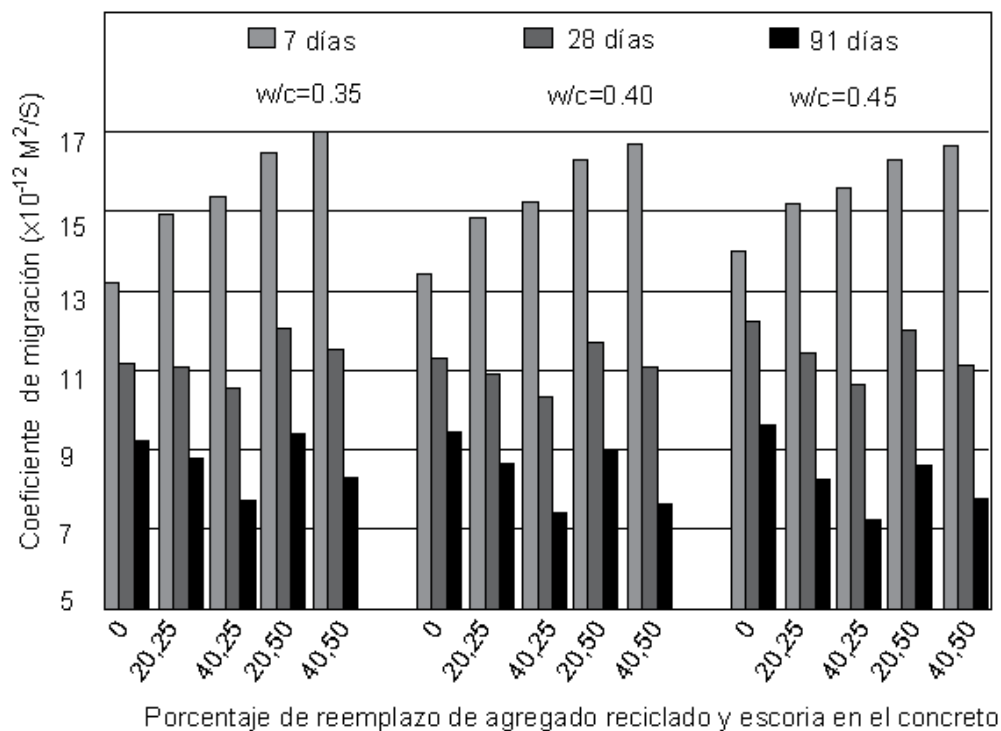


Figura 7 Comportamiento del cementante en 325kg/m³ ante la RCMT, de acuerdo con (Mostafa & Farzad, 2022).

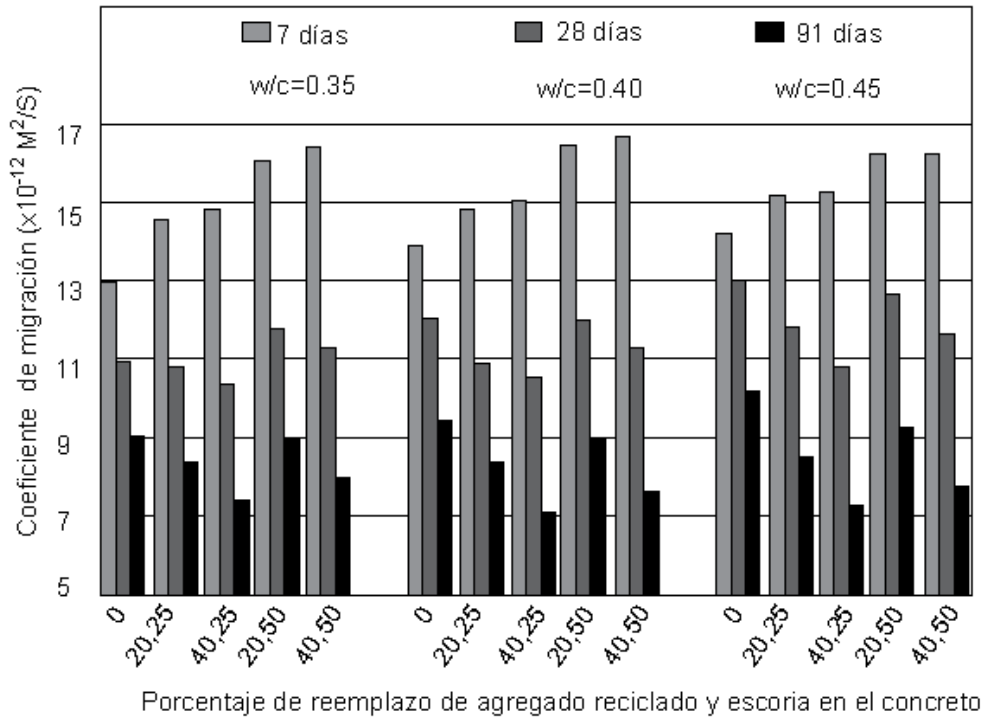


Figura 8 Comportamiento del cementante en 375kg/m³ ante la RCMT, según (Mostafa & Farzad, 2022).

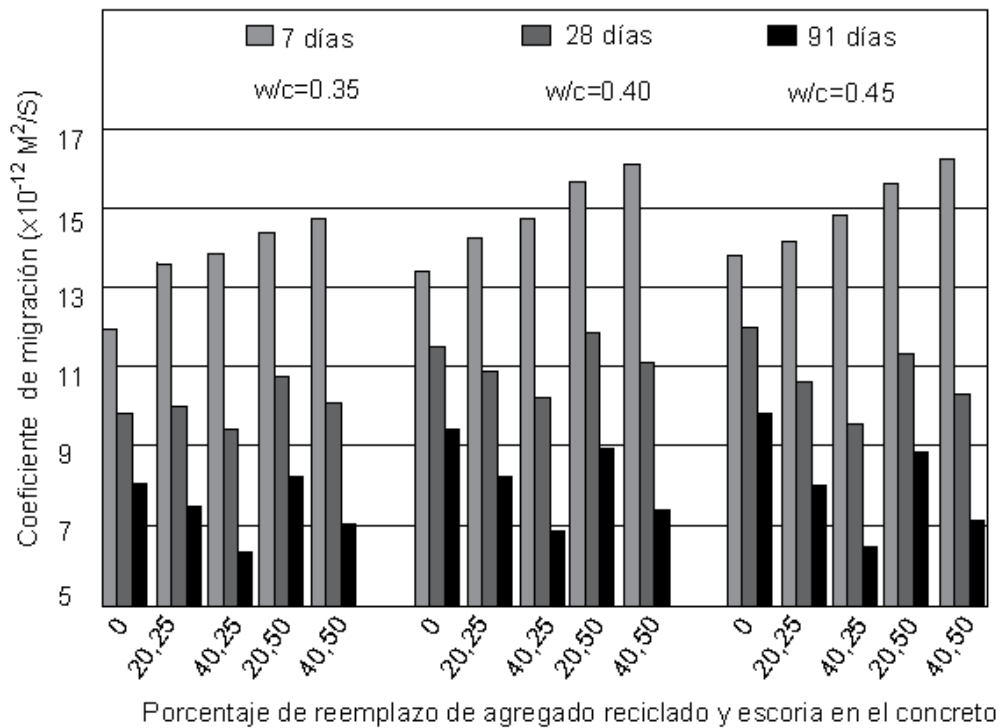


Figura 9 Comportamiento del cementante en 425kg/m³ ante la RCMT, según (Mostafa & Farzad, 2022).

De lo anterior se concluye que agregar más cantidad de aglutinante a los CAR, produce una mayor incidencia de cloruros, afectando su durabilidad. Así mismo, se propuso reemplazar en las muestras el 20% y 40% del volumen del aglutinante por escoria, lo que

provocó una mejora en la resistencia contra la penetración de iones de cloruro conforme aumentaba su edad, pues después de 91 días su durabilidad incrementó en un promedio de 14.5% y 26.3% respectivamente, comparado con la muestra de referencia (concreto convencional).

De manera general, la durabilidad del CAR se ve afectada por la porosidad, gracias a lo que se ha explicado anteriormente, la conexión entre el mortero antiguo con el nuevo, algunos investigadores aseguran que tiene más importancia la capilaridad de los poros que su tamaño en la incidencia de cloruros, otros dicen que ambas son relevantes; sin embargo, cualquier postura recae en la porosidad, por lo que el desarrollo de propuestas en la mejora de este inconveniente, garantizará un mejor rendimiento en esta propiedad.

En una investigación (Malhotra) se evaluó la resistencia al congelamiento/deshielo del concreto, a través de mediciones de la velocidad del pulso ultrasónico durante y después del ciclo congelamiento/deshielo y mediciones de resistencia a la flexión, y se encontró que la resistencia a este fenómeno del concreto reciclado, era similar al del concreto de control; sin embargo en otras investigaciones se descubrió que en concretos preparados con agregados de sílice reciclados, se encontraba mejor resistencia que el concreto con grava de sílice original; se debe a que el mortero adherido en el agregado reciclado obstruye la entrada del agua a las partículas de sílice con tendencia al congelamiento (Cruz García & Velázquez Yáñez, 2004).

2.3.4.1.7. Permeabilidad

La permeabilidad es la cualidad que define con qué facilidad puede incidir un sólido, un gas o cualquier otro agente externo, al concreto a través de sus poros. Esta propiedad está íntimamente relacionada con la durabilidad, ya que los agentes que pueden ingresar, tienden a modificarlo químicamente, y en su mayoría de manera negativa, por ejemplo, el dióxido de carbono, cloruros, sulfatos, oxígeno, afectándolo a corto o largo plazo.

En el concreto reciclado, se encuentra el gran inconveniente del mortero ya adherido en el AR, esto desencadena la proliferación de poros, tanto en el mortero mismo por los estragos del uso antiguo y del proceso de trituración al que se sometió, como en la débil adherencia con el nuevo mortero; por lo tanto, la permeabilidad es mayor.

Cuando se hay una gran sustitución de AN por AR, hay una mayor tendencia a que se encuentren pequeñas fisuras o grietas por el uso previo, esto facilita la incidencia del aire,

y con ello del carbono, oxígeno, cloruros, humedad. Así mismo, se da lugar a la permeabilidad al agua, que generalmente en el CAR se da el doble que en el CAN pues se reportó en una investigación que la profundidad de penetración del agua en concreto con 100% agregado fino reciclado fue de 4.1 cm, mientras que en un CAN fue de 2.1 cm (Bahraq, Jose, Shameem, & Maslehuddin, 2022).

A pesar del inconveniente, se han planteado técnicas para mejorar esta propiedad, por ejemplo, remover el mortero adherido al AR, remojo previo en nano-sílice para llenar vacíos, así como reemplazar cierto porcentaje del cemento por ceniza volante, pues ayuda a la microestructura, llegando a disminuir la permeabilidad al agua, a niveles más bajos comparados con CAN.

2.3.4.1.8. Densidad

De manera simple, la densidad representa el espacio que ocupa una determinada cantidad de materia, es decir, *es la relación entre la masa de una sustancia y el volumen que abarca la misma*. Esto, viene a ser un requisito importante en la calidad del concreto, pues puede ser la punta angular para la resistencia de este frente a esfuerzos y agentes físicos y químicos del ambiente.

No resulta sorprendente que el CAR sea menos denso que el CAN; pues gracias a los poros existentes en el mortero adherido al AR, así como a la débil unión con el mortero nuevo (que además crea nuevas interfaces y con ello más “huecos” que en el CAN), se generan pequeños vacíos, que macroscópicamente representan una disminución en la masa del concreto para prácticamente el mismo volumen ocupado. Según (Daniel, 2013) la densidad de un CAR es de entre 2100 y 2400kg/m³, en tanto la del CAN se encuentra entre 2300 y 2500 kg/m³.

2.3.5. Reglamentación y normatividad

Debido a las problemáticas que se derivan a partir del concreto, particularmente el impacto negativo al ambiente y su manejo cuando pasa a ser un RCD, surgieron estrategias e investigaciones con el fin darle solución o al menos mitigar los estragos de esta situación, y que, a su vez, se encuentran regidas por reglamentos y normas establecidos nacional e internacionalmente. En la presente sección, se proporcionará un panorama general de dichas normas.

2.3.5.1. Internacional

Existen diversas normas y leyes a nivel internacional que tienen acercamiento con el reciclaje del concreto, sin embargo, normalmente engloban aspectos como las regulaciones sobre los recursos naturales (restricciones sobre la oferta de material virgen), ambientales (incentivos a la reutilización y reciclaje), desechos (restricciones a vertederos, impuestos sobre el vertimiento de basura, clasificación de los RCD para su correcta gestión), y de construcción de vías, códigos y estándares de construcción (estándares sobre el uso de materiales reciclados) (Initiative, 2009).

En el caso de Estados Unidos, el reciclaje del concreto ha sido fomentado por La administración Federal de Carreteras (FHWA), en su empleo como base y subbase vial; la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM), y Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO), han aceptado el concreto reciclado como fuente de agregados siguiendo los requerimientos de calidad de ASTM C 33 "Especificación estándar para agregados de concreto" (Standard Specification for Concrete Aggregates), y AASHTO M 80 "Agregado grueso para concreto de cemento Portland " (Coarse Aggregate for Portland Cement Concrete).

Instituciones como la Agencia de Protección Medioambiental (EPA), el Cuerpo de Ingenieros Militares, la Administración Federal de Aviación (FAA) y los Departamentos Estatales de Transporte (DOTs), utilizan concretos reciclados en diferentes concentraciones. Incluso, hay elementos de política pública que le incluyen un valor agregado a las construcciones con materiales reciclados en contratos gubernamentales, por ejemplo, en Michigan, o modifican regulaciones de los desechos, como en Texas (Initiative, 2009).

En Europa las políticas están enfocadas en recuperar los residuos, que se ha llegado a prohibir arrojar RCD a vertederos, así que, como parte de la Estrategia para la Prevención y Reciclaje de Desechos, se tomó como una Directiva Marco de Residuos revisada. En Reino Unido y Dinamarca se han implementado tarifas e impuestos en el vertimiento de estos residuos.

En Finlandia una rígida legislación e implementación emite que todo material producto de una demolición y con óptimas condiciones, debe ser estrictamente reciclado. En Colombia, la primera normatividad con carácter hacia la protección de recursos naturales fue la ley 23 de 1973, la cual busca controlar la contaminación, conservar y restaurar los

recursos naturales. Y la lista de normas que encauzan a la gestión de RCD y reducción de exploración de materia prima, se alarga más y más (Lizarazo, 2015).

En Japón en 2009, se emitió La Ley sobre el Reciclaje de Materiales de Construcción la cual exige la separación obligatoria de los RCD y la reutilización/reciclaje del concreto, el asfalto y la madera (Initiative, 2009), en esta se requiere que tanto los clientes como los contratistas firmen acuerdos que garanticen el cumplimiento de dichas actividades.

Ahora bien, en cuanto a las normas que establecen los estándares que deben cumplir los agregados reciclados, se debe mencionar que estas varían de acuerdo a regiones y países. En España destaca la Norma-EHE-08, la cual mencionan en uno de sus puntos que para concreto estructural *se limita el uso del agregado reciclado a la fracción gruesa en un contenido inferior al 20% en peso sobre el total del agregado grueso*; usándolos solamente para concretos en masa y armados a resistencias no superiores 40N/mm², excluyendo su empleo para concretos pretensado.

Además, dicha norma menciona especificaciones que deben cumplir los agregados, como el origen, presencia de impurezas, forma, tamaño mínimo de 4mm, almacenamiento (su correcta separación, como concreto estructural y no estructural), el contenido de terrones de arcilla (en una relación del 20% de sustitución) no debe ser mayor al 0.6% (Rodríguez J. P., 2016).

En Estados Unidos el comité 555 de ACI (American Concrete Institute) realiza un documento donde se mencionan las características técnicas del concreto reciclado, y los clasifica en las siguientes categorías: residuos procedentes de trituraciones; de demolición clasificados y limpios; residuos cerámicos limpios; y de concreto limpios. A los cuales se les exige que presente buena dureza para una buena resistencia, que no sean químicamente inestables y que tengan una granulometría y forma óptimas para favorecer su trabajabilidad; de acuerdo a su uso, la clasificación anterior se le incorpora en los siguientes tipos: agregados para rellenos en general, para drenajes, bases y sub-bases de carreteras, para la fabricación de concreto.

En Australia, El Ministerio de Medio Ambiente y Patrimonio junto con la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO), creó una guía nacional para el uso de concreto no estructural, donde divide a los concretos reciclados en clase 1, aquellos que sus propiedades físicas son similares a los de los agregados naturales y

se usan para la fabricación de concreto; y en clase 2, como relleno y bases y subbases en carreteras y pavimentos. A las dos clases se les solicita una absorción inferior al 6% y una densidad mínima de 2100kg/m³. En Japón se les clasifica a los agregados reciclados en 3 tipos, designados por las letras H, M, y L, según su calidad alta, media y baja, respectivamente, y a su vez están regulados por las normas JIS A 5021, JIS A 5022, JIS A 5023, puestas en marcha entre 2005 y 2007. Los requisitos exigidos tienen que ver con características físicas, la reactividad álcali-agregado y las impurezas que contengan (Rodríguez J. P., 2016).

Propiedad	Agregado grueso	Agregado fino
Densidad en seco (kg/m ³)	≥2500	≥2500
Absorción %	≤3%	≤3%
Abrasión %	≤35%	—
% que pasa por el tamiz de 75mm	≤1%	≤7%
Contenido de ion cloruro	0.04%	≤0.04%

Tabla 3. Especificaciones de los patrones de los agregados reciclados para que sean de mayor calidad, en Japón (Rodríguez J. P., 2016).

Con el fin de promover la cultura de las edificaciones sustentables, El Consejo de Construcción Verde (GBC), agrupa consejos locales e internacionales interesados en la iniciativa, adoptando en su mayoría, sistemas de calificación LEED o BREEAM. El Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (Leadership in Energy and Environmental Design - LEED) es muy empleado en E.U.A. Se implementa en proyectos del sector público y privado, que obtienen certificaciones a través de calificaciones de puntajes. 8 de los 85 puntos posibles tienen que ver con el manejo de RCD y el uso de materiales reciclados. El Centro de Investigación de Edificaciones (Building Research Establishment Ltd - BREEAM), en esta se obtienen puntos al reciclar RCD y al usar agregados reciclados, así mismo promueve SMARTWaste para minimizar la generación de desechos (Initiative, 2009).

2.3.5.2. Nacional

En México, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), es la ley máxima de carácter ambiental. De acuerdo al artículo 1º. de la misma, *la presente Ley es reglamentaria de [...] la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional [...].* Sus

disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable (LGEEPA, 1988).

En el capítulo II de la LGEEPA, titulado como: “Distribución de Competencias y Coordinación”, uno de los puntos que establece es que la Federación tiene la facultad de regular y controlar la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas, y para la preservación de los recursos naturales, así como de residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos, y de vigilar la aplicación de las normas oficiales mexicanas. También se debe desarrollar, la evaluación del impacto ambiental de las obras como hidráulicas, vías generales de comunicación, explotación y beneficio de minerales entre otras.

En capítulo III de dicha ley, “Política Ambiental”, el artículo 15° (IV), determina que quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique.

Además, existe también la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, que presenta las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria para las entidades públicas y privadas responsables de la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial (Diario Oficial de la Federación, 2004).

En el 2003 la SEMARNAT publicó la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), que busca la participación de todos los sectores sociales en valorizar y gestionar los residuos generados. En el título tercero de dicha ley, emite que la secretaría clasificará, los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial, en categorías, para tomar decisiones basados en precaución y manejo de los mismos. Además, incluye a los residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general en los residuos de manejo especial (SEMARNAT, 2003).

Otra de las normas que más se reconocen enfocadas al manejo de residuos especiales es la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, *que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan*

de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. Uno de los principales aportes que busca esta norma es controlar y reducir la masiva producción de estos residuos y su acumulación en sitios de almacenamiento inadecuados.

Ahora bien, también se encuentran normas que sólo se enfocan a los RCD, tal es el caso de la Norma Ambiental para La Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019 (explayada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal), que establece la clasificación y especificaciones de manejo integral para los residuos de la construcción y demolición en La Ciudad de México.

Según esta norma, los RCD se deben clasificar de la siguiente manera, para posteriormente entregarse en sitios autorizados por la Secretaría o por la autoridad ambiental competente.

Clasificación de los residuos de construcción y demolición	
Categorías	Residuos
A) Concreto simple	Concreto de elementos prefabricados. Concreto de elementos estructurales y no estructurales. Sobrantes de concreto (sin elementos metálicos).
B) Concreto armado	Elementos de concreto armado prefabricados y colados en obra.
C) Metales	Residuos metálicos como: Acero de refuerzo Metales ferrosos Metales no ferrosos (aluminio, cobre, etc.)
D) Mampostería con recubrimiento	Residuos de mampostería y pétreos con recubrimiento y mortero de juntas, como: blocks, tabicones, adoquines, block cerámico, prefabricados de arcilla recocida (tabiques, ladrillos, tejas, etc) muros de piedra braza, etc.
E) Pétreos	Materiales pétreos sin recubrimiento o sin juntas de mortero.
F) Mezcla asfáltica	Provenientes de bases asfálticas o negras.
G) Excavación	Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales.

H) Elementos prefabricados con materiales mixtos	Paneles y sistemas prefabricados conformados por materiales mixtos (como panel de yeso, panel de tabla cemento y otros paneles en general).
I) Otros residuos de manejo especial generados en obra	Residuos con tratamiento y manejo especial, listados de manera enunciativa y no limitativamente: Residuos de instalaciones eléctricas, residuos electrónicos, lámparas, balastras y baterías Llantas Textiles Madera Lodos bentoníticos Unicel

Tabla 4. Clasificación de los RCD según la Norma ambiental para La Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019.

En el apartado de Aprovechamiento de Agregados Reciclados de la misma norma, menciona que los generadores de RCD después de analizar los requisitos propuestos en las normas, deben determinar si sus desechos son aptos para reusarse en el mismo sitio de generación, y por consiguiente enviar los restos a los centros de acopio para su procesamiento. Los RCD aprovechables, se incorporarán a obras privadas y públicas de construcción. En la tabla se muestran los agregados reciclados y sus usos, cabe destacar que éstos son exclusivos para elementos no estructurales.

Aprovechamiento de los agregados reciclados en elementos no estructurales			
Categoría origen del agregado (de acuerdo con la tabla 2)	Usos del agregado reciclado	Porcentaje mínimo de contenido de agregado reciclado	Porcentaje de uso en la obra o edificación
A) Residuos de concreto	Bases y sub-bases	100%	100%
B) Residuos de concreto armado	Bases hidráulicas en caminos y estacionamientos.	100%	100%
E) Residuos pétreos	Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones	100%	100%
	Bases para ciclistas, firmes, guardiones y banquetas.	100%	100%
	Construcción de Andadores y trotapistas.	100%	100%
	Construcción de terraplenes.	35%	100%

	Construcción de pedraplenes.	35%	100%
	Material de relleno o para la elaboración de suelo-cemento.	35%	100%
	Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno total de cepas.	35%	100%
	Material para la conformación de terrenos.	35%	100%
	Rellenos en cimentaciones.	35%	100%
	Plantillas para cimentación.	35%	100%
	Concreto ciclópeo.	35%	100%
	Rellenos en jardines.	35%	100%
	Mobiliario urbano.	100%	100%
	Lechos, acostillamientos y rellenos de tuberías.	100%	100%
	Conformación de parques y parterres.	100%	100%
	Zanjas drenantes.	35%	100%
D) Residuos de mampostería o pétreos con recubrimiento	Bases y sub-bases.	100%	100%
	Sub-bases en caminos y estacionamientos.	100%	100%
	Construcción de terraplenes.	35%	100%
	Cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios.	35%	100%
	Construcción de andadores y trotapistas.	100%	100%
	Bases para ciclistas, firmes, guardiciones y banquetas.	100%	100%
	Material de lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas.	35%	100%
	Construcción de pedraplenes.	35%	100%
	Material para la conformación de terrenos.	35%	100%
	Relleno en jardineras.	35%	100%
	Relleno en cimentaciones.	35%	100%
	Caminos de jardines.	35%	100%
F) Asfálticos	Construcción de banquetas, guarniciones y bordillos.	35%	100%
	Bases asfálticas o negras.	90%	100%
	Concretos asfálticos elaborados en caliente.	90%	100%

Concretos asfálticos templados o tibios.	90%	100%
Concretos asfálticos elaborados en frío.	90%	100%
Bases asfálticas espumadas.	35%	100%
Microcarpetas en frío (slurries).	35%	100%

Tabla 5. Aprovechamiento de los agregados reciclados en elementos no estructurales según la Norma ambiental para La Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019.

Entrando de lleno a los requerimientos que se solicitan de parte del concreto reciclado, se encuentran las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (versión 2017), misma que en la sección 12 *Concretos Especiales*, expone las características generales de los concretos reciclados.

En esta norma, se trata al concreto reciclado como los fabricados con agregado grueso reciclado, producto de la trituración de residuos de concreto. Y deja en claro, que para su uso como concreto estructural sólo debe representar el 20% del peso total del agregado grueso a usar, coincidiendo de esta manera, con algunas de las investigaciones citadas en el apartado de *propiedades del concreto reciclado* del presente capítulo. Además, la norma establece que está descartada la sustitución total o parcial de agregado fino reciclado, y de agregado grueso proveniente de estructuras con patologías que comprometan la calidad del concreto.

Entre otros de los requerimientos están, el agregado grueso reciclado puede emplearse tanto para concreto simple como para concreto reforzado. La resistencia especificada, f_c' , será inferior a 40 MPa (407 kg/cm²); y especifica claramente que no se permite su empleo en estructuras de concreto presforzado, ni en estructuras con marcos dúctiles.

Un requisito destacable es el tamaño mínimo para el agregado grueso reciclado, donde se menciona que este es de 4.75 mm (malla #4). Además, que el contenido de partículas que pasan la malla #4 no debe superar el 5%. El contenido de terrones de arcilla en el agregado grueso reciclado no debe ser superior a 0.6% y en el agregado grueso natural a 0.15%.

En los concretos reciclados con contenido de agregado grueso reciclado inferior a 20%, la absorción de este agregado debe ser inferior a 7%, y la del agregado grueso natural deberá ser inferior a 4.5%. Para la resistencia al desgaste de la grava se mantiene el requisito aplicado para los agregados naturales: coeficiente de los Ángeles no superior a 40% (NTC, 2021).

En la siguiente tabla se muestra los valores máximos de contenido de impurezas en los agregados reciclados:

Impurezas	Máximo contenido de impurezas, % del peso total de la muestra
Material cerámico	5
Partículas ligeras	1
Asfalto	1
Otros materiales (vidrio, plásticos, metales, madera, papel, etc.)	1

Tabla 6. Impurezas máximas en el agregado reciclado de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias mexicanas para diseño y construcción de estructuras de concreto (NTC, 2021).

Se deberá determinar el contenido total de cloruros y aplicar el mismo límite recomendado en la tabla 7; además, los agregados reciclados no presentarán reactividad potencial con los álcalis del cemento (NTC, 2021).

Tipo de miembro	Máximo contenido de iones de cloruro (CL) solubles en agua en el concreto, porcentaje en peso del cemento
Concreto preesforzado	0.06
Concreto reforzado expuesto a cloruros en condiciones de servicio húmedas	0.15
Concreto reforzado expuesto a cloruros en condiciones de servicio secas o protegidas de la humedad	1
Otras construcciones de concreto reforzado	0.3

Tabla 7. Valores máximos de contenido de ion cloruro en el concreto al momento del colado (NTC, 2021).

Es perceptible que los requerimientos técnicos presentes en esta norma para los concretos reciclados, coinciden mayormente con los de algunas normas internacionales descritas anteriormente, lo que se podría traducir a una cercana unificación global en materia de esta área.

2.3.6. Ventajas

Las investigaciones sobre las características físicas y mecánicas del concreto reciclado, demuestran que es posible obtener un concreto con propiedades competentes frente al concreto convencional, bajo ciertas condiciones, que incluso llegan a mejorar algunas propiedades a largo plazo; dichos estudios son un respaldo para impulsar la producción

de concreto reciclado, (práctica que se lleva a cabo cada vez más frecuente a nivel internacional), trayendo consigo ventajas significativas en diversas áreas.

Algunos beneficios en cuanto al desempeño del concreto reciclado son:

- Demuestra buenas características de durabilidad, ya que tiene gran resistencia al congelamiento/deshielo, así que resulta beneficioso en las zonas con mucha variación atmosférica.
- Los agregados reciclados con formas más angulares y texturas más ásperas pueden presentar mayor resistencia a la tracción, debido a la mayor adherencia entre estas.
- El agregado reciclado se compacta hasta dos o tres veces más rápido que el agregado natural. Eso aumenta la durabilidad cuando se usa en la base de la carretera.
- Las partículas de agregado reciclado se comparan bien con los agregados naturales en que poseen buena forma de partícula, alta absorción y baja gravedad específica (Khan, 2005).

De igual forma, el concreto reciclado, atrae beneficios al medio ambiente, a pesar de no reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero (ya que en la etapa de creación del cemento es donde se producen la mayor parte de ellos), ayuda a mitigar la contaminación atmosférica en la etapa de transporte, trayendo a su vez, reducción de costos.

- Mejora la imagen de los espacios al evitar grandes acumulaciones de RCD, en particular, de concreto, minimizando los residuos en vertederos.
- El reciclado puede ser utilizado en la misma zona donde se generan, esto favorece el ahorro de energía, ya sea por el transporte y extracción y procesamiento de nuevos agregados.
- Produce un impacto positivo en los recursos naturales, pues disminuye la demanda de materias vírgenes, fomentando así, su preservación.
- Los costos del transporte se ven reducidos porque es común que las plantas de tratamiento de concreto se encuentren en las urbes o en zonas aledañas a los sitios de construcción, mientras que los agregados naturales se encuentran en canteras o en zonas más distantes.

- El reciclar en sitio o separar los RCD y vender el concreto a empresas encargadas del tratamiento para el reciclaje de estos, resulta más asequible que enviar los residuos a vertederos, pues muchas veces estos incluyen tarifas.
- En Estados Unidos se estiman ahorros de entre 50%-60% por emplear agregados reciclados en comparación a la utilización de agregados nuevos. Así mismo, en países como Alemania, Holanda y Dinamarca resulta menos costoso el reciclar agregado que adquirir nuevo, ya que cuentan con la infraestructura y carecen de canteras (Initiative, 2009).
- Abre indirectamente espacio a nuevos empleos.

2.3.7. Implicaciones

Se han expuesto los beneficios que se derivan al reciclar concreto, entre lo que destacan preservación al medio ambiente, ahorros económicos y el tener un desempeño físico-mecánico satisfactorio, bajo ciertas condiciones. Sin embargo, no todo puede ser impecable, se han documentado casos en donde se aprecian desventajas en sus propiedades.

En (Pérez García, Garnica Anguas, & Rivera, 2018) se cita un caso en el cual reportaron 10 estudios usando agregado reciclado, 5 en laboratorio y 5 en campo, en estos últimos se observó el sistema de drenaje de pavimentos donde se usaron agregados reciclados, que este tenía el potencial de precipitar calcita CaCO_3 (muy alcalino), registraron valores de pH hasta 11 y 12, y se percató que las plantas que estaban cerca se marchitaron. Sin embargo, señalaron que, si el agregado se lavaba antes de ser colocado, se eliminaba la formación de CaCO_3 .

Una de las reacciones que son de sumo interés en el concreto, es la reacción álcali-agregado (AAR) o reacción álcali-sílica (ASR), cuando hay un exceso de álcali en el concreto endurecido, más del necesario para su fraguado, provoca reacciones que causan el aumento de su volumen, deteriorando así las estructuras. Este problema tiende a agudizarse en los concretos reciclados.

El ataque de los sulfatos es otra de las amenazas en estos concretos, pues son más propensos su incidencia por la porosidad del mortero ya adherido. No obstante, existen técnicas para controlar esta desventaja, como remover en lo posible el mortero.

Es un hecho de que el concreto reciclado se esté empleando en diversos países debido a los resultados satisfactorios que ha mostrado. Sin embargo, estos mismos alcanzarán el fin de su vida de servicio, serán demolidos, pasarán a ser residuos para formar nuevos agregados, y por ende estos tendrán diferentes propiedades, no hay muchas investigaciones sobre el análisis de los múltiples reciclajes a los que se somete el concreto, pero las que hay coinciden en que las propiedades se empobrecen a medida que aumenta el número de ciclos, aunque en dichas investigaciones se han usado agregados de distintos orígenes (Abreu, Evangelista, & Jorge, 2018).

En (Abreu, Evangelista, & Jorge, 2018) se produjeron agregados triturando un concreto original con el mismo diseño de mezcla y propiedades, para posteriormente medir sus cambios a través de ciclos de reciclaje. Se sustituyeron los agregados naturales por estos en un 25% y 100%. Se observó lo mismo que investigaciones anteriores que hacen mención en su experimento, entre más recicló tenía el agregado, las propiedades se volvían deficientes. La absorción del agua se veía aumentada, mientras que el módulo de elasticidad, el esfuerzo a compresión, y a tracción disminuidas. Sin embargo, este hallazgo representa un avance en la materia, pues a partir de ello es posible definir un *rendimiento mínimo de agregado*, que tomará en cuenta los valores mínimos de cada propiedad relevante, para que, en un futuro, las veces que se ha sido reciclado un concreto, no sea una preocupación.

2.3.8. Reciclaje del concreto en México

Para dimensionar el panorama en México en cuanto a los RCD, la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) en su Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición, (CMIC & SEMARNAT, 2013), calculó que en el 2011 se producían aproximadamente 6 toneladas de RCD por año, y tomándolo como referencia, estimó que para el 2018, considerando dos escenarios diferentes en cuanto al comportamiento del crecimiento de la construcción se tendrían 9.2 o 9.9 millones de toneladas/año, de los cuales el 25% está conformado por concreto.

Se estima, sólo el 4% de los RCD se aprovechan, 3% se recicla y 1% se reusa. En algunos estados de la República han implementado personal que incluye la recolección y el transporte de los residuos, y en ocasiones sitios de disposición final. Sin embargo, aún se presentan deficiencias en la gestión de los residuos y los estados que lo hacen son una minoría.

Actualmente en la Ciudad de México se generan entre 12mil y 14 mil toneladas de RCD al día, el gobierno de la CDMX emitió la actualización de la norma NADF-007-RNAT-2004, donde señala que, para realizar guarniciones y banquetas en la capital, se deberá usar concreto reciclado. Por lo que se emitió una convocatoria para la instalación de plantas recicladoras de RCD (Flores, 2021).

El Ingeniero Enrique Granell declaró que al recorrer las áreas verdes de la CDMX donde solía practicar actividad física, se percató que ya no se encuentran en las mismas condiciones que hace más de una década, pues ahora gran parte de dicha área está cubierta por escombros afectando la imagen de la zona. El ingeniero Granell dirige Concretos Reciclados, la empresa que surgió en 2004, como una iniciativa para combatir esta problemática. Fue la primera en México y forma parte de las pocas plantas recicladoras de RCD que hay en el país.

Concretos Reciclados localizado en Iztapalapa, recicla 1500 toneladas diarias de las 14,000 que se generan en la capital, y a grandes rasgos, su proceso incluye 3 principios básicos, limpiar, triturar y separar, mismo del que se explicó con más detalle en páginas anteriores. Uno de los requisitos para admitir residuos, es que se encuentren libres de materiales no deseados (papel, plástico, tela, cartón, madera) ni peligrosos, admitiéndose solamente agregados pétreos y aglutinante. Destaca el Ing. Granell que no usan una tecnología sofisticada, sino una muy parecida a la empleada en la minería.

A pesar de que las leyes establecen que los RDC deben localizarse en un algún sitio de disposición final, la mayoría de los constructores omiten esta práctica, y peor aún las autoridades no hacen gran esfuerzo por cerciorarse de que se cumplan. Además, no hay muchas plantas oficiales, monitoreos, o sanciones a quien infrinjan las normas.

Otra cuestión del reciclaje de concreto en México es que la mayoría de las empresas no consumen agregados reciclados, por lo que la demanda es escasa, Granell expresa que es necesario que las leyes promuevan el consumo de estos productos al obligar a conformas determinadas construcciones con cierto porcentaje de estos concretos (Rueda, 2020).

2.4. Panorama internacional del reciclaje del concreto

En el presente capítulo se dará a conocer de manera general el contexto del reciclaje del concreto en países que se han considerado pioneros e impulsores de esta práctica.

2.4.1. Reino Unido

Una las razones por las que se le considera a Reino Unido (UK) uno de los impulsores del reciclaje del concreto, es por los estragos de la Segunda Guerra Mundial, era indispensable la reconstrucción inmediata de sus ciudades, la materia prima no abastecía dicha demanda, y los escombros abundaban, por lo que se optó por los agregados reciclados.

El Reino Unido produce en promedio unos 220 millones de toneladas de desechos al año (9% del total de la Unión Europea), de los cuales el 62% son RCD, sin embargo, las pautas medioambientales de Europa y las acciones impulsadas por el gobierno británico, como las mejoras tecnológicas en los vertederos, han logrado que la gestión de RCD haya aumentado en los últimos años, alcanzándose una tasa de reciclaje del 48,5 %, muy superior a la media del 37,8 % de la UE (Bermejo Presa, 2020).

Alrededor de 200 millones de toneladas de agregados son usados en el UK como materia prima de construcción, y de ello, 57 millones de toneladas ya son derivadas del reciclaje o de fuentes secundarias; el 28% de la demanda de agregados es cubierta con estas fuentes sustentables (Guidance, 2013).

La estrategia seguida por Gran Bretaña es una economía circular. Por lo que se ha dotado de infraestructura adecuada y una normativa rigurosa como el cobrar impuestos al uso de vertederos. Además, de que se rigen por normas que garantizan la calidad de los materiales, como lo es la BS 8500-2:2015+A2:2019, norma británica complementaria a BS EN 206, donde muestra la especificación para materiales constituyentes y concreto.

2.4.2. Japón

Al igual que Europa, Japón también se vio afectado por la Segunda Guerra Mundial, tan solo con mencionar las dos bombas nucleares lanzadas a Hiroshima y Nagasaki que causaron grandes pérdidas humanas y materiales. A pesar de ello, logró una destacable restauración de sus ciudades, alcanzando avances tecnológicos en la industria de la construcción, por ejemplo, la reducción de la demanda de cemento.

En Japón, la generación anual de RCD es de aproximadamente 80 millones de toneladas, representando entre el 16% y 20% de los residuos en todas las industrias en general. Se ha desarrollado un acercamiento más estandarizado al reciclaje. En 1977 el reciclaje de RCD fue más impulsado por Building Constructors Society, presidido por Kasai et al, en

1986 lanzaron guías de recomendaciones por el ministerio de la construcción, sin mencionar las exigencias para el concreto reciclado (Miranda, 2020). En 1998 el comité de Ingeniería Civil JIS (Japanese Industrial Standards) hizo una recomendación para mejorar los estándares e impulsar el reciclaje del concreto bajo la supervisión del Japan Concrete Institute (JCI), uno de los proyectos presentados por el comité fue el Informe técnico JIS, TR A 0006 "Agregado de concreto reciclado" (Khan, 2005).

En 1992 el Ministerio de Construcción (MOC), presentó el programa Reciclar 21 estableciendo objetivos numéricos para el reciclaje de diferentes tipos de bi-productos de construcción (concreto demolido, asfalto, suelo, madera), los cuales fueron mejorando. En el 2003 el reciclaje del asfalto y concreto alcanzaron el 98 y 98.5% respectivamente.

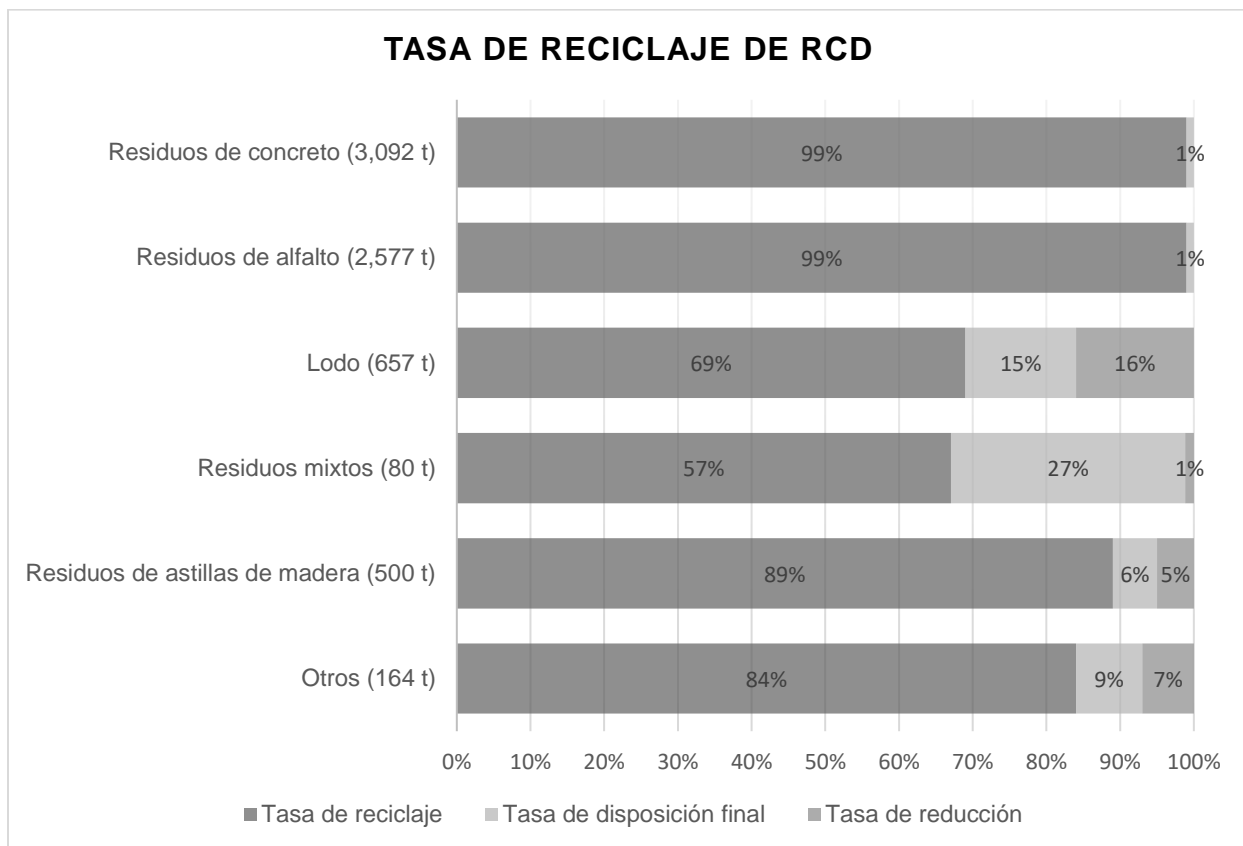


Figura 10 Tasa de reciclaje de RCD en Japón. Tomado de: [https://www.uncrd.or.jp/content/documents/2661Parallel%20Roundtable\(2\)-Presentation\(4\)-Hideko%20Yonetani.pdf](https://www.uncrd.or.jp/content/documents/2661Parallel%20Roundtable(2)-Presentation(4)-Hideko%20Yonetani.pdf).

Actualmente Japón desarrolla tecnología para mejorar la calidad de los agregados, por ejemplo, el método de calentamiento y molienda, hace que el mortero adherido se ablande al someter el agregado reciclado a 300° C, y posteriormente se separa a través de un proceso de molienda; el método de molienda de tornillos, usa un tornillo de eje que

consiste en una parte intermedia y otra de escape con un cono pandeado para también remover el mortero adherido; el método de molienda mecánica, utiliza un cuerpo de tambor que separa finamente tabloneros divisorios con orificios del mismo tamaño, unas esferas de acero se mueven horizontal y verticalmente al rodar el tambor, la calidad mejora al estrecharse los espacios internos usando los tabloneros divisorios; el método de concentración de gravedad, después del procesamiento con una trituradora de mandíbula, una trituradora de impacto y un molino de barras de mejora, los agregados de más de 8 mm se separan en agregado grueso reciclado y partículas de mortero, los que tienen tamaños menores a 8 mm se dividen en dos tipos: agregado fino reciclado de 5 mm y 5-8 mm. La máquina de concentración por gravedad húmeda se usa para mover: 1) cosas ligeras (partículas de mortero y residuos de madera hacia arriba); y 2) cosas pesadas (grano agregado hacia abajo) (Tam, 2009).

2.4.3. Estados Unidos

Un caso muy reconocido en Estados Unidos sobre los primeros usos de agregado de concreto reciclado en pavimentos fue en la Ruta 66 de EE. UU en Illinois, en la década de 1940; concreto de una parte de la calzada de concreto existente fue triturada y reservada para su uso como agregados en los segundos dos carriles de la carretera, que fue expandida a cuatro carriles después de la Segunda Guerra Mundial. El concreto reciclado fue más común en los siguientes años, y más fomentado a partir de 1970.

En E.U.A la cantidad de RCD que se produce anualmente es de 250-300 millones de toneladas por año, alrededor del 70% está compuesto por concreto. La producción anual de agregados reciclados (productos de pavimentos y demoliciones) es de 140 millones de toneladas anuales. El concreto reciclado para aplicaciones de pavimento es implementado en al menos 41 estados de E.U.A (Technology, 2018).

Según (Jin & Chen, 2015), en 1998 el 85% del total de concreto reciclado fue destinado como base de carretera, se fue usando cada vez más como reemplazo de agregado natural en aplicaciones de construcción de carreteras como mezcla de concreto y asfalto de capa superior, el ahorro del costo del transporte de los residuos de concreto ha promovido el reciclaje de éste, sin embargo, ha sido principalmente usado como relleno y base de construcción.

La Agencia Federal de Carreteras (FHWA), en colaboración con la AASHTO, la Agencia de Protección ambiental de EE.UU (EPAs) y la ACI, desarrollan guías sobre cómo los

estados puede usar agregados reciclados en aplicaciones de carreteras. La FHWA realizó un estudio sobre los usos del agregado reciclado en E.U.A, los resultados se muestran en las siguientes imágenes (Khan, 2005).

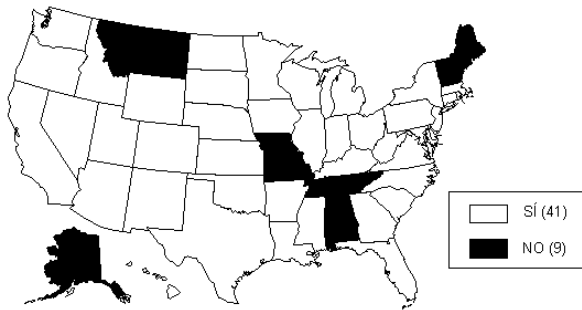


Figura 11 Agregado de concreto (CAR) reciclado como agregado grueso (Khan, 2005).

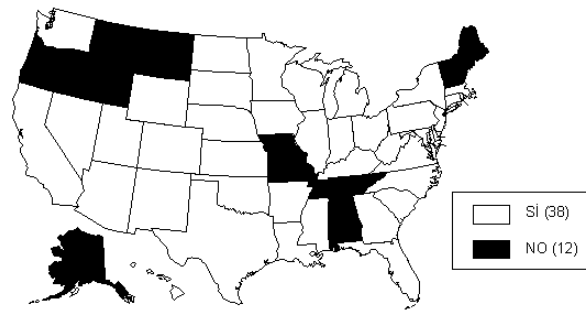


Figura 12 CAR como agregado base (Khan, 2005).

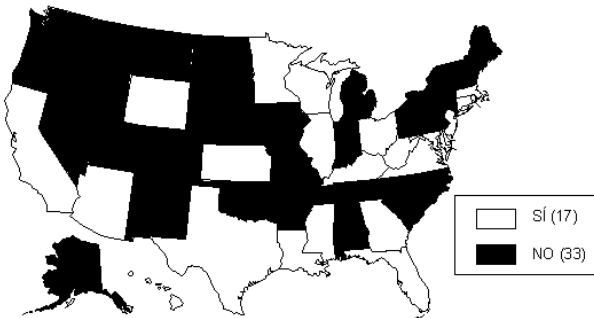


Figura 13 CAR en diferentes aplicaciones (Khan, 2005).

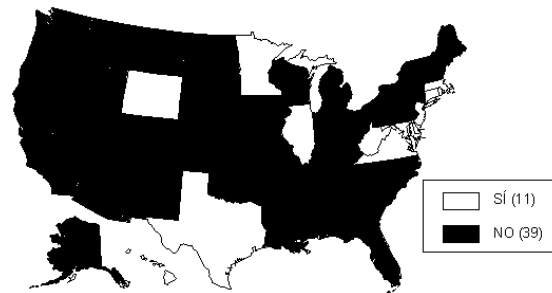


Figura 14 CAR para concreto simple (Khan, 2005).

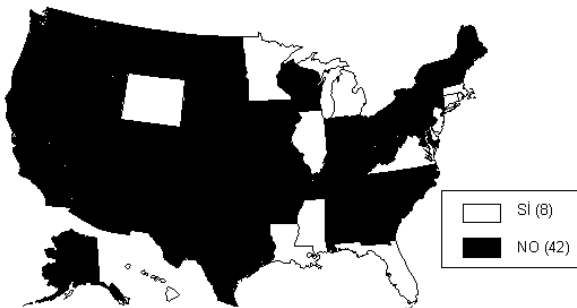


Figura 15 Como agregado de mezcla asfáltica en caliente (Khan, 2005).

De acuerdo a (Jin & Chen, 2015) se realizó una encuesta a alrededor de 25 empresas concreteras, sobre aspectos que engloban al reciclaje del concreto, y uno de los datos que comparten, que resulta muy relevante es que el 77% de estas empresas usan el concreto reciclado como “relleno/base de la carretera” y sólo el 23% seleccionó

“agregado para producir concreto nuevo”. Otras aplicaciones seleccionadas incluido relleno de agregado, sub-base, calzadas y plataformas de construcción, roca base, roca de drenaje, arena, etc. Una de ellas mencionó el uso de RCA para paredes no estructurales y entradas de vehículos en edificios residenciales.

2.4.4. Alemania

No es sorprendente que Alemania haya sido una de las naciones más afectadas después de la Segunda Guerra Mundial, el Gobierno, Ingenieros y Arquitectos notaron de inmediato los grandes volúmenes de RCD que albergaban en las ciudades, 600 millones de m³ en total, tan sólo 75 millones de m³ se encontraban al oeste de Berlín (García Temoltzi, 2014).

Cada año, Alemania genera alrededor de 200 millones de toneladas de RCD, de los cuáles, gran parte está constituido por suelo y piedras, por lo tanto, al descartar éstos, el total estimado por año es de 80 millones de toneladas.

En 1995 se arrancó una iniciativa entre la industria y el Gobierno Federal llamada “*Kreislaufwirtschaft Bau*”, Economía Circular en Edificación, que básicamente consiste en reducir la cantidad de residuos minerales de la construcción y tomar en cuenta su potencial de reuso y reciclaje, la meta era reducir hasta un 50% de residuos en 10 años, para en 2012, ya se había alcanzado un 90%.

RCD (t)	2008		2010		2012	
Generado	192 000 000		186 500 000		192 000 000	
Reciclado	66 600 000	35%	65 200 000	35%	66 200 000	34%
Otro tratamiento	105 208 000	55%	105 831 000	57%	108 907 000	57%
Vertido	20 192 000	11%	15 469 000	8%	16 893 000	9%

Tabla 8 Datos sobre generación y tratamiento de RCD en Alemania, incluidos suelos y piedras (bio, 2015).

RCD (t)	2008		2010		2012	
Generado	84 700 000		80 800 000		82 200 000	
Reciclado	57 700 000	68%	55 400 000	69%	55 500 000	68%
Otro tratamiento	22 608 000	27%	22 431 000	27%	23 007 000	28%
Vertido	4 392 000	5%	2 969 000	4%	3 693 000	4%

Tabla 9 Datos sobre generación y tratamiento de RCD en Alemania, excluyendo suelo y piedras (bio, 2015).

Gran parte de la gestión de RCD se basa en el reuso de materiales, ya que se encuentran compuestos en su mayoría por suelo y piedras, abarcando el 57%. En el 2012 alrededor

del 27% de los RCD estaba formado por residuos de demolición (concreto, ladrillo, cerámica), representando 51.6 millones de Toneladas, de éstos el 78,3% se recicló, el 16.9% se prestó para otro uso mientras que el 4.8% terminó en un sitio de disposición final (bio, 2015).

La legislación y normatividad para el manejo de RCD en Alemania, está basada en la Ley de la Unión Europea, las leyes federales, las leyes de los gobiernos regionales y los estatutos de los servicios de gestión de residuos de las autoridades locales. El desarrollo de estándares nacionales en esta área, posicionó a Alemania en los pioneros del reciclaje del concreto; es muy común encontrar referencias donde señalan las primeras edificaciones construidos con agregados reciclados como lo son Vilbeler Weg y Waldspirale.

2.4.5. Países Bajos

En los países bajos, al año se generan 24 millones de RCD, de los mismos, el 95% es procesado para reciclaje sin embargo este alto porcentaje se debe en gran parte a la práctica de down-cycling (no se vuelven a emplear para el uso original, pero sí para un uso “inferior”), se quiebra la parte pedregosa para agregado de base de carretera. En el 2009, el 96.9% de RCD se usó para base de carretera, y sólo 1.9% para la industria del concreto; sin embargo, esto había contribuido a cubrir la demanda de agregado de base de las construcciones de carreteras que iban en aumento para ese entonces (Hu, Di Maio , Lin, & van Roekel).

La falta de recursos geológicos hace que el mercado de agregados en Países bajos dependa del reciclaje de estos o su importación de otros países. A pesar de que la mayor parte de los agregados reciclados se emplean en aplicaciones de baja tecnología como terraplenes o cimientos de carreteras, se están desarrollando estrategias para mejores aplicaciones, pues actualmente la demanda de estos para carreteras está decreciendo; por lo que se vuelve competente para el uso de “concreto común” (concreto simple), donde no se tienen altos estándares de calidad respecto a durabilidad, trabajabilidad, resistencia. En este país, el 80% de la producción anual del concreto es para concreto ordinario con resistencia hasta de 25MPa, lo que incentiva a la aplicación agregados reciclados en esta área (Pietersen & Fraay, 2015).

Desde la década de 1980, varios comités RILEM (Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, Sistemas y Estructuras de Construcción) han trabajado en el área

del reciclaje del concreto como materia prima secundaria, una de las recomendaciones que emite, es preparar el concreto con agregado de acuerdo al uso que este vaya a tener, esta recomendación se basó en experimentaciones de Países Bajos, Dinamarca y Bélgica.

Actualmente hay una consolidación entre los estándares de calidad de la Unión Europea y la de los Países Bajos. A lo largo de 15 años, se han llevado a cabo proyectos en materia de los agregados reciclados, así que se han producido concretos de diferentes niveles y tipos, los estándares neerlandeses validan el reemplazo del 20% de los agregados naturales por reciclados para un concreto con esfuerzo a compresión de 65MPa. En un proyecto de vivienda cerca de Derft, se usaron agregados completamente mixtos en casi todos los elementos prefabricados (paredes, pisos) para una resistencia de 45MPa (Pietersen & Fraay, 2015).

2.5. Investigación relacionada con el concreto reciclado

En la presente sección se dará a conocer la investigación titulada: *Evaluación de la Resistencia del Concreto Hecho con Agregado reciclado (Evaluation of Concrete Strength Made with Recycled Aggregate)*, cuyos autores son Haitham Al Ajmani, Ferass Suleiman, Ismail Abuzayed y Adil Tamimi; publicado en la revista *Buildings*, (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019), trata sobre las propiedades mecánicas que adquiere el concreto elaborado con un porcentaje de agregado reciclado, con el fin de sustentar la información proporcionada en las páginas anteriores y apreciar de una manera más objetiva los cambios que adquiere este tipo concreto.

Evaluación de la Resistencia del Concreto Hecho con Agregado reciclado

Haitham Al Ajmani¹, Ferass Suleiman², Ismail Abuzayed¹ y Adil Tamimi^{3,*}

1. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Americana de Sharjah, P.O. Box 26666, Sharjah, Emiratos Árabes Unidos; b00031824@alumni.aus.edu (H.A.A.); b00054173@alumni.aus.edu (I.A.).
2. Proceq Oriente Medio, Sharjah 8365, Emiratos Árabes Unidos; Ferass.Suleiman@proceq.com.
3. Ingeniería Civil, Universidad Americana de Sharjah, P.O. Box 26666, Sharjah, Emiratos Árabes Unidos.

* Correspondencia: atamimi@aus.edu; Teléfono: +00-971-515-2958

Objetivo

El objetivo de la investigación mencionada, es el diseñar, producir y evaluar un concreto de alto rendimiento (HPC), elaborado con cierto porcentaje de agregados reciclados (AR). Dichos porcentajes son 20, 50 y 80%, denominados como AR20, AR50 y AR80 respectivamente. Así mismo, se utilizaron como materiales cementantes, micro sílice (MS) y ceniza volante (FA). Se analizaron las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto tal como, revenimiento, contenido de aire, esfuerzo a compresión, esfuerzo a tensión, módulo de elasticidad, y penetración de iones de cloruro; para de esta forma, compararlos con el concreto convencional de alta resistencia (CHSC).

Materiales y métodos empleados

Las mezclas empleadas en la investigación con un reemplazo de agregados naturales (AN) por AR en un 20, 50 y 80%, fueron denominadas AR20, AR50 y AR80 respectivamente y comparadas con CHSC. Todas las mezclas utilizadas en el estudio fueron diseñadas bajo la versión modificada del método de diseño ACI 211-1. Se empleó micro sílice y ceniza volante como materiales cementantes para mejorar el desempeño del concreto, y se añadieron en diferentes cantidades en cada una de las mezclas (AR20, AR50, AR80), excepto en el CHSC, manteniendo una relación constante de Agua/Cemento de 0.31. Para evaluar las propiedades, se utilizaron los métodos: ASTM C231-10 (contenido de aire), ASTM C172-99 (densidad fresca), ASTM C143 (revenimiento), ASTM C109 (esfuerzo compresión), ASTM C-496 (esfuerzo a tensión), ASTM C469-10 (módulo de elasticidad) y ASTM C1202 (penetración de iones de cloruro).

Se usaron 36 cubos de 150 × 150 × 150 mm para la prueba de esfuerzo a compresión. Se usaron ocho cilindros de dimensiones 150 × 300 mm, de los cuales 4 se analizaron para esfuerzo a tensión y 4 para el módulo de elasticidad. Doce especímenes fueron usados para la Prueba Rápida de Permeabilidad de Cloruros (RCPT), cada mezcla consistió en 3 muestras. Los ejemplares fueron desmoldados después de 24h del momento de la colada y se prosiguió al curado en agua, en un ambiente controlado en el laboratorio de 20 ± 5 °C.

Materiales

Concreto con agregado reciclado (CAR), agregado grueso natural (NA), cemento Portland ordinario (OPC), MS, FA, agua potable, agregado fino triturado, Superplastificante Glenium Sky 502. Los CAR empleados en esta investigación se obtuvieron de la organización Bee'ah en los Emiratos Árabes Unidos. Dos grupos de agregados del mismo

tipo (5–10 mm y 10–20 mm), se mezclaron y usaron en el experimento. Se determinaron propiedades físicas de acuerdo a los métodos: ASTM C136-01 (análisis granulométrico), ASTM C131 (valor de trituración de agregados), ASTM D75-97 (gravedad específica), ASTM C702-98 (absorción de agua) y ASTM C131-96 (abrasión de Los Ángeles). La tabla 10 resume las propiedades de los agregados.

La Figura 16, representa la distribución del tamaño de partícula del AR. Se aprecia que el agregado estaba bien graduado y bien distribuido. Todas las mezclas incluían OPC con una gravedad específica de 3,14 y MS con una gravedad específica de 2,2. El superplastificante tenía una la gravedad específica es 1.115 y un contenido sólido de 46%. La gravedad específica de FA era 2,8.

Agregado reciclado	Muestra #1 (10-20)mm	Muestra #2 (5-10)mm
Valor del agregado triturado	18.88	0.22
Peso específico a granel	2.48	2.56
Peso específico aparente	2.78	2.77
Absorción de agua	4.20%	2.80%
Pérdida porcentual (L.A. valor de abrasión)	70.80	77.2

Tabla 10 Propiedades del agregado reciclado (AR) (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).

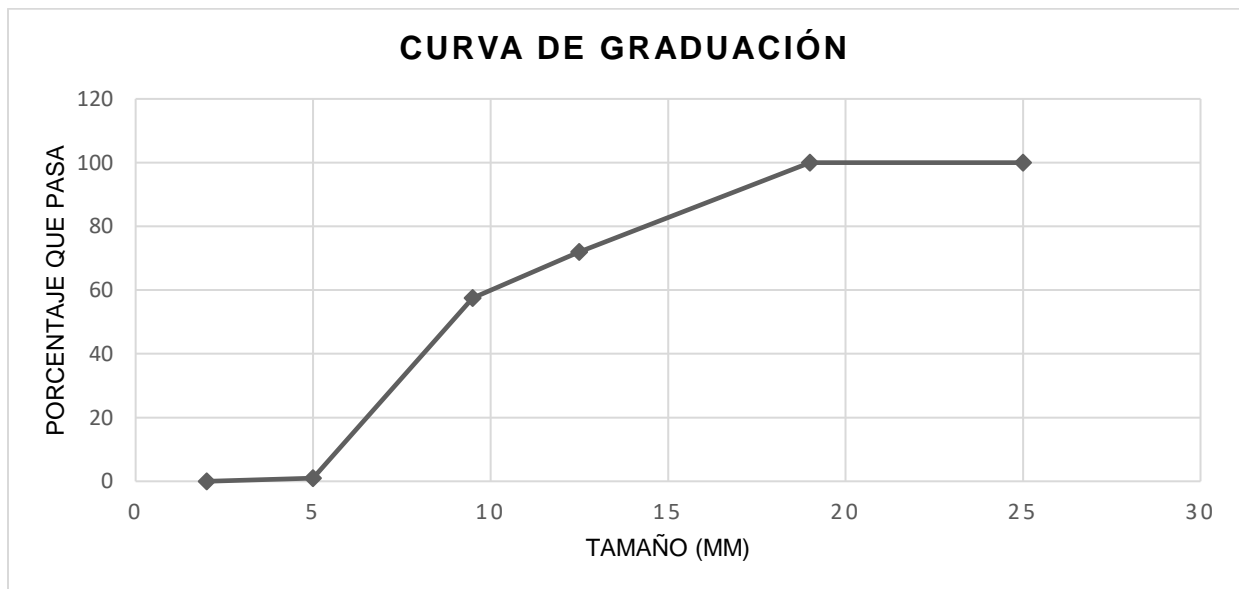


Figura 16 Granulometría del agregado (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).

Las proporciones de las mezclas se describen en la tabla.

Mezclas	CHSC	AR20	AR50	AR80
Cemento (kg)	432	381.3	312	240
Ceniza volante (kg)	—	48	120	191

Micro sílice (kg)	48	48	48	48
Agua (L)	148	149	153	158
a/c	0.31	0.31	0.31	0.31
Agregado grueso reciclado (kg)	—	217	542	861
Agregado grueso normal (kg)	1089	870	542	215
Agregado fino (arena triturada) (kg)	685	667	636	571
Superplastificante (L/m ³)	21.85	21.85	21.85	21.85

Tabla 11 Proporciones de las mezclas. CHSC = concreto convencional de alta resistencia; a/c = relación agua-cemento (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).

Resultados y discusiones

Propiedades en estado fresco

Las propiedades en estado fresco se encuentran descritas en la tabla, los valores de contenido de aire fueron de entre 1.3 y 1.7, aumentando conforme al uso de AR, una explicación para ello, sería la presencia de poros en el agregado, así como sus formas irregulares. La densidad de cada mezcla de concreto reciclado fue mayor que CHSC, excepto AR80. Esto podría atribuirse al llenado de los poros por el material cementoso y el gel de hidrato de silicato de calcio (CSH) del cemento hidratado. En el caso de AR80, los poros excesivos no eran accesibles para que el material cementoso y el gel los ocuparan, lo que generó poros vacíos en el concreto.

	CHSC	AR20	AR50	AR80
Contenido de aire (%)	1.30%	1.70%	1.60%	1.60%
Densidad del concreto fresco (kg/m ³)	2356	2408.7	2389.9	2259.5
Revenimiento (mm)	53.5	54.5	55	53.5

Tabla 12 Propiedades del concreto fresco (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).

Todas las mezclas AR tuvieron un mayor revenimiento que CHSC, excepto AR80. El aumento de la depresión se debió principalmente debido al alto contenido inicial de agua libre. El agua libre fue el resultado de la alta capacidad de absorción de agua de AR. Los revenimientos de todas las mezclas HPC recicladas tuvieron un promedio de 54,3 mm, lo que fue una indicación que todas las mezclas tenían muy buena fluidez. La depresión aumentó ligeramente entre CHSC y AR50, donde se maximizó, pero luego se redujo a 53,5 mm para AR80, que es similar a CHSC.

Resistencia a compresión

En la figura 17, se pueden apreciar los resultados del esfuerzo a compresión del espécimen de concreto a los 7, 28 y 56 días, cabe destacar que éstos son los promedios

de los tres cubos de cada mezcla respectiva. A los siete días, la fuerza de compresión para AR20, AR50 y AR80, resultó ser de 68, 75 y 66% del esfuerzo a compresión del CHSC; a los 28 días fue de 71, 76 y 73%; y a los 56 días de 74, 84 y 85% respectivamente. La disminución de la resistencia a la compresión ocurrió debido a la presencia de polvo de cemento viejo en el AR, lo cual contribuyó al debilitamiento del agregado. Sin embargo, el debilitamiento de las propiedades mecánicas del concreto podría compensarse con la utilización de material cementoso, los cuales mejoraron las propiedades por la reacción puzolánica, misma que ocurrió entre el hidróxido de calcio del cemento hidratado y los silicatos para producir gel CSH.

La tasa de ganancia de resistencia para los especímenes de AR, aumentó conforme incrementaba el periodo de curado, reduciendo de ese modo, la pérdida de resistencia para todos los especímenes en comparación con el CHSC. El aumento de la resistencia se debió principalmente a la reacción retardada de FA, la cual es conocida por desarrollar resistencia a largo plazo. A los 7 días, la resistencia a compresión promedio de AR80 (40%FA) fue menor que AR20 (15%FA), y AR50 (25%FA). Sin embargo, más tarde se manifestó que poseía una resistencia a la compresión más alta que ambos promedios. En la gráfica los CAR mostraron un continuo crecimiento en el esfuerzo a compresión, mientras que la pendiente del CHSC, empezó a estabilizarse horizontalmente. Similar a otros estudios, la resistencia a compresión aumentó con el aumento del periodo de curado.

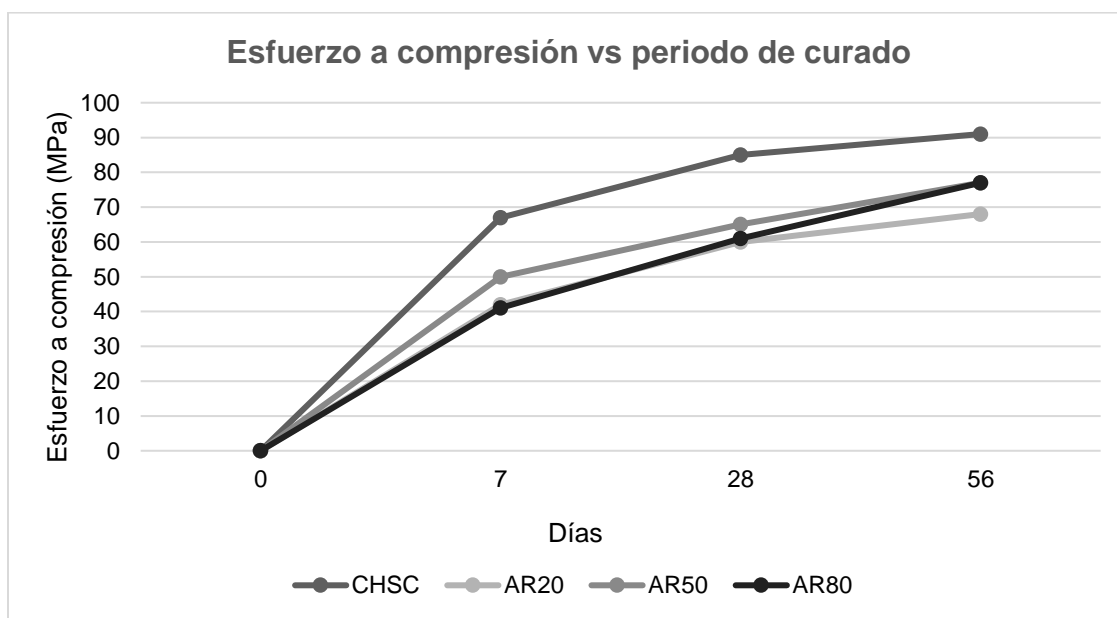


Figura 17 Esfuerzo a compresión (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).



Imagen 9 Forma de falla del concreto después de siete días para todos los especímenes (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).



Imagen 10 Forma de falla del concreto después de 56 días para todos los especímenes (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).

Resistencia a tensión

Los especímenes triturados se muestran en la Imagen 11 y los resultados de la resistencia a la tracción por división a los 28 días de los cilindros de 150 × 300 mm se muestran en la Figura 18. La resistencia a tracción por división de todos los CAR fue menor que la fuerza de tensión de los CHSC. El esfuerzo a tensión de AR20, AR50 y AR80, resultó ser 74, 90, y 73% de el de CHSC. Similar al esfuerzo a compresión, el uso de FA y MS no fue suficiente para compensar completamente los efectos adversos de usar AR en las propiedades mecánicas del concreto. El uso del 10% MS y 25% FA en AR50 mostró una reducción en el esfuerzo a tensión. Kou y Poon investigaron las propiedades de tensión usando AR y FA en diferentes relaciones, lo resultados obtenidos a los 28 días de curado sugirieron que independientemente de las sustituciones de AR y FA, la resistencia a tensión experimentaría una reducción en comparación al concreto de peso normal. Lee y Choi concluyeron que la resistencia a la tensión decrece conforme aumenta la cantidad de AR. La proporción de la resistencia a la tracción por división y la fuerza de compresión del concreto convencional (CC), AR20, AR50 y AR80 resultó ser 4.67%, 4.86%, 5.46%, y 4.70%, respectivamente, lo que implica que la relación entre ambos parámetros de AR y aditivos minerales para cada mezcla es más cercana a la del CC.



Imagen 11 Muestras trituradas con diferentes tipos de agregados (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).

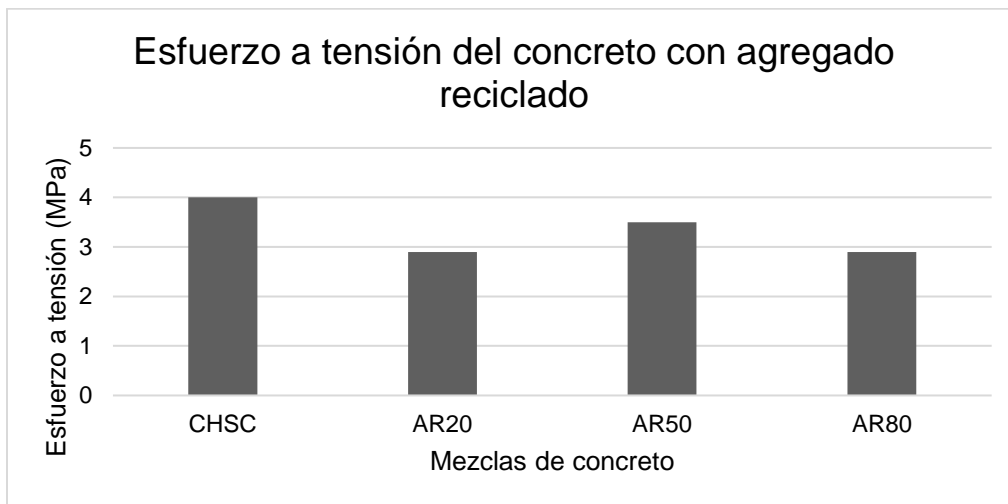


Figura 18 Esfuerzo a tensión del concreto (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).

Módulo de elasticidad

La prueba del módulo de elasticidad (E) mostró la relación tensión-deformación, así como la deformación lateral a longitudinal del concreto endurecido. La prueba fue conducida de acuerdo con el método ASTM C469 y los resultados a los 28 días se muestran con la figura 19. Fue muy evidente que el CHSC tuvo el más alto resultado, seguido de AR20 y AR80. Los módulos de E de RA20, RA50 y RA80 obtenidos fueron el 69, 50 y 56%, respectivamente, del módulo de E de CHSC. Rahal, en uno de sus estudios afirmó que el E de RAC era menor que el del concreto de peso normal para una resistencia objetivo similar, y que la tendencia de E para RAC no siguió ningún patrón constante independientemente de la fuerza objetivo.

Diversas investigaciones mencionan que la disminución del E se da con el aumento de AR, debido a sus propiedades débiles, tal como la alta porosidad del mortero antiguo adherido y a las grietas en éste. Limbachiya, en una investigación reportó que el E aumentó con el incremento de la resistencia media objetivo y se notaron incrementos adicionales en todos los esfuerzos al incorporar MS. Autores de la literatura declararon que el E dependía del volumen del agregado. Generalmente, E experimentó un gradual decremento con el incremento de AR, donde el valor más bajo del E se observó al 100% del reemplazo del AR para la más baja resistencia media objetivo con MS.

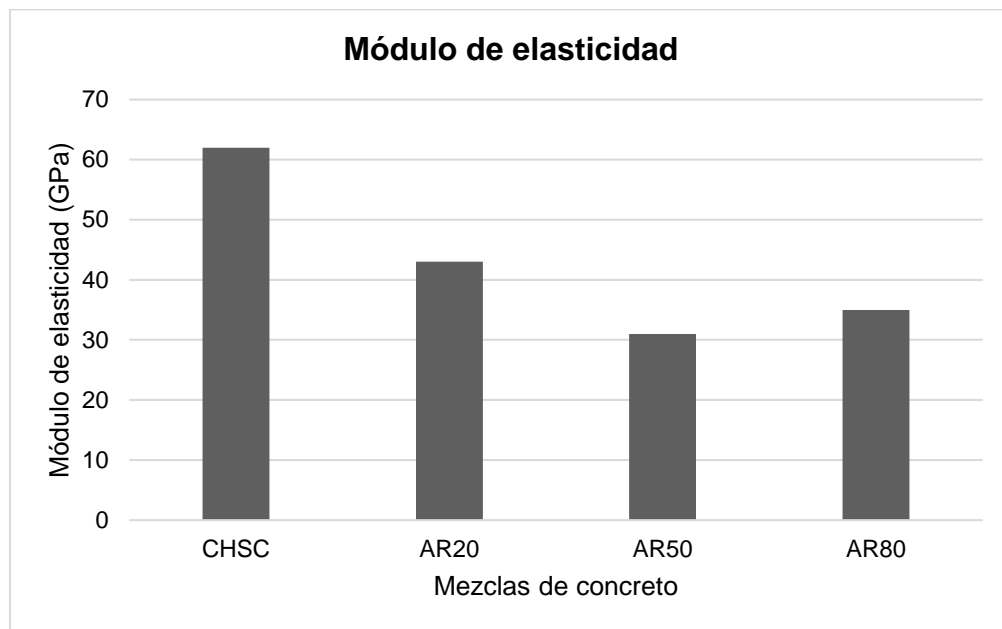


Figura 19 Módulo de elasticidad (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).

Prueba Rápida de Permeabilidad de Cloruros (RCPT)

La corriente eléctrica transitoria a través del espécimen estaría restringida en miliamperios por el dispositivo RCPT. El área bajo la curva de miliamperios contra el tiempo se usaría para desarrollar las cargas totales. Además, los valores alcanzados fueron comparados con la ASTM C1202. La resistencia a la penetración de cloruros fue medida en todas las mezclas después de 28 días de su creación. La figura ilustra la penetración de iones de cloruro en los especímenes a los 28 días. Es evidente que el total de cargas pasadas decrementaron significativamente en todas las mezclas que incluían AR, con respecto a la CHSC. La principal contribución no vino de los AR, sino del material cementante usado. La microestructura del cemento hidratado fue muy

influenciada por las reacciones puzolánicas que resultaron en la formación del gel CSH que fue causado por la reacción de hidróxido de calcio con los silicatos de las puzolanas.

El CSH gel y las partículas de tamaño pequeño de las puzolanas llenaron los poros capilares e impidieron el paso de los iones. Por lo tanto, las mezclas AR fueron más durables que las de CHSC. Diversos investigadores confirmaron los beneficios de los materiales puzolánicos para reducir la penetración de cloruros. Villagrán-Zaccardi mencionó que los valores contribuyentes son la relación A/C, el tipo y calidad de material cementante. Kou y Poon reportaron que la resistencia a la penetración de cloruros disminuía conforme aumentaba el reemplazo de AR, sin embargo, que el uso de FA mejoraba dicha resistencia. Así mismo, en otros estudios se llegó a la conclusión que la resistencia a la penetración de cloruros disminuye al incrementar el reemplazo de AR, sin embargo, el uso adecuado de FA mejoró su resistencia. El fino tamaño de partícula de los materiales cementosos también densificó la estructura porosa del concreto, mejorando características, como aumentar su compatibilidad y reducir su segregación. Leng describió cuatro razones sobre cómo el material cementoso podría mejorar la resistencia a la penetración de cloruros: porque mejoran la distribución del tamaño de los poros del concreto; la presencia de gel CSH absorbe los iones de cloruro y bloquea la vía de difusión; el número de iones totales, tales como Ca^{2+} y Si^{4+} que tienen baja capacidad de difusión están más presentes en puzolanas que OPC; y la presencia de aluminato tricálcico (C_3A) en las puzolanas, la cual puede absorber más iones de cloruro.

Los investigadores Sim y Park informaron que el concreto se vuelve más denso a medida que aumenta el período de curado; por lo tanto, su edad es un factor importante para determinar la resistencia a la penetración de cloruros, independientemente de la cantidad de material cementoso. Los comentarios finales de los autores afirman que el CAR puede lograr niveles adecuados en el rendimiento de la resistencia a la penetración de cloruros. El uso de material cementoso también puede ayudar a controlar la penetración de cloruro.

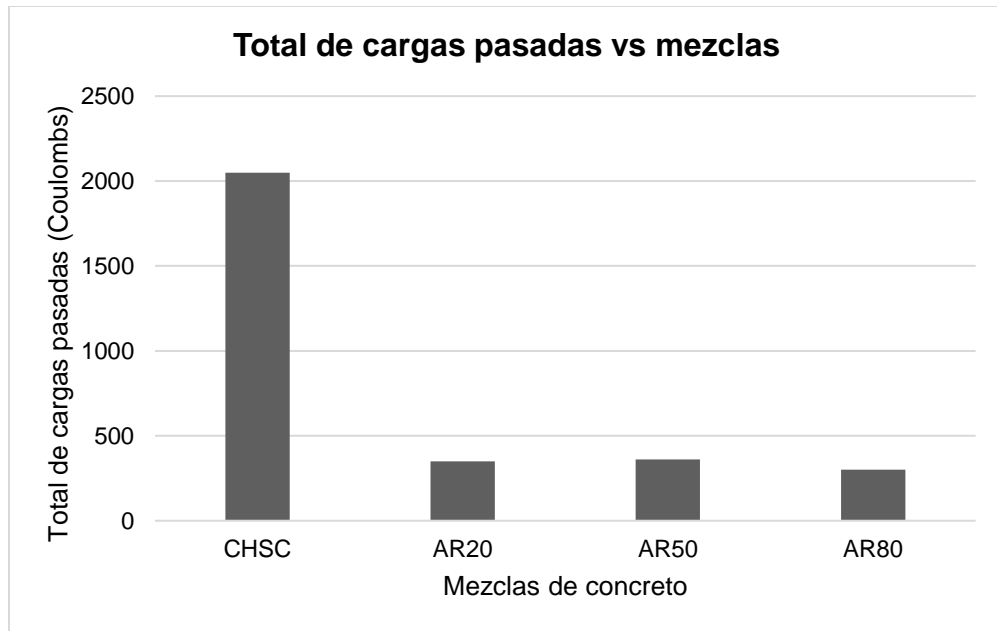


Figura 20 Resultados de Prueba Rápida de Permeabilidad de Cloruros (RCPT) (Al Ajmani, Suleiman, Abuzayed, & Tamimi, 2019).

Conclusiones

El objetivo de este experimento fue optimizar las propiedades de CAR utilizando materiales puzolánicos a diferentes niveles de reemplazo de AR. Por lo tanto, esta investigación ha concluido lo siguiente:

- CAR es una solución viable para reducir los materiales de desecho.
- El concreto elaborado con 80% AR mostró una alta resistencia a la compresión de 60 MPa a los 28 días y 77 MPa a los 56 días.
- La trabajabilidad del concreto hecho con AR puede ser similar a CHSC.
- Las puzolanas fueron altamente efectivas para resistir los iones de cloruro. Redujo la permeabilidad del concreto con AR.

3. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, es importante definir qué se entiende por investigación, según Sampieri, la investigación es un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno (Sampieri, 2010).

La metodología de la investigación resulta ser un campo amplio y complejo, por lo que tiende a ser multidisciplinaria y a diversificarse en distintos enfoques, de los cuáles son más conocidos el cuantitativo, cualitativo y mixto.

Los pasos metodológicos de este trabajo de investigación denominado **Concreto reciclado, su proceso de diseño e implementación en la construcción**, se ha desarrollado a través del enfoque cualitativo. *El Método cualitativo; es aquel método que utiliza la recolección de datos sin medición numérica, para descubrir o afinar preguntas de investigación en el proceso de interpretación* (Cabezas Mejía, Andrade Naranjo, & Torres Santamaría, 2018).

En este mismo orden de ideas, *la Investigación cualitativa, por su enfoque metodológico y su fundamentación epistemológica tiende a ser de orden descriptivo, orientado a estructuras teóricas [...]* (Tamayo, 2003), además, este enfoque desarrolla instrumentos de recolección de información y análisis de los datos.

A pesar de que el enfoque cualitativo tiende a ser relacionado íntimamente con investigaciones del área de las ciencias sociales y humanidades, este trabajo se ha encaminado a través de técnicas cualitativas, pues la parte medular de este documento consiste en la compilación de información disponible en torno a la temática abordada.

Es fundamental señalar que, para el desarrollo de esta investigación, fue necesario la aplicación de algunas técnicas que ayudaron a fortalecer el proceso, las cuales se definen a continuación.

Las técnicas de investigación, *son recursos teóricamente normados que sugieren los instrumentos y medios para la recolección de los datos. También, contribuyen en el manejo de la información que se recoge y para llevar un control de la misma* (Ontiveros, 2021).

La presente investigación aplicó las técnicas de investigación documental, las cuales consideran en su ejercicio el uso práctico y racional de los recursos bibliográficos disponibles de las diferentes fuentes de información, es decir, documentos bibliográficos

tanto físicos como digitales, libros, revistas y artículos científicos entre otros recursos documentales necesarios para establecer el marco teórico que sustenta esta investigación.

Así mismo, se hizo el empleo de la encuesta, la cual es definida como *la técnica de obtención de datos mediante la interrogación a sujetos que aportan información relativa al área de la realidad a estudiar* (Yuni & Urbano, 2014). Dicha encuesta fue realizada a través del uso las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), al Colegio de Ingenieros Civiles de Mazatlán A.C, con el propósito de obtener información que permitiera describir la situación local sobre el manejo de residuos de construcción y demolición (RCD).

La metodología se centró en 4 etapas que permitió realizar una búsqueda óptima de la información.

1.- Selección de documentos (revistas de difusión, artículos científicos, tesis, entre otros)

Se establecieron los parámetros que deben contener los recursos bibliográficos que garanticen la calidad de la información (año de divulgación, factor de impacto de revistas, origen de la tesis, grado de la tesis, origen de la normativa, etc). Se procuró obtener papers de revistas acordes al área de la ingeniería civil y la construcción, documentos oficiales como normas o informes, e ingresar a sitios web o editoriales académicos.

2.- Definición de las bases conceptuales

Se realizó una revisión de conceptos básicos que faciliten el correcto entendimiento del tema. En este caso fue necesario desarrollar nociones como, qué es el concreto, cuál es su proceso de producción, qué son los RCD, cuál es su impacto en el ambiente entre otros aspectos, para que así se lograra contextualizar la temática a desarrollar.

3.- Procesamiento y análisis de la información documental

Se implementaron técnicas de planificación, registro y ordenamiento de la información recabada para facilitar el análisis de los datos y la elaboración del trabajo de investigación. Así mismo, se agruparon, organizaron y contabilizaron las respuestas obtenidas en la encuesta aplicada.

4.- Redacción del documento de investigación.

Se realizó un compendio de información ordenada y estructurada, que facilite al lector el entendimiento de la información. Además, se les dio una interpretación descriptiva a los resultados arrojados en la encuesta.

4. Resultados, análisis e interpretación de la información

4.1. Encuesta aplicada al Colegio de Ingenieros Civiles de Mazatlán A.C. sobre los RCD.

Debido a la escasa información que se tiene en Mazatlán Sinaloa, respecto al reciclaje del concreto, se ha optado por desarrollar una encuesta a la comunidad del área de la Ingeniería Civil y la Construcción, con el fin de obtener un diagnóstico local sobre el manejo de residuos de construcción y demolición (RCD), particularmente de residuos de concreto, así como una evaluación del conocimiento que se tiene de los mismos.

Dicha encuesta fue aplicada al Colegio de Ingenieros Civiles de Mazatlán A.C., donde hubo 32 participantes, de cuyas réplicas se pueden extraer los siguientes resultados:

El 53% de los encuestados se desarrolla en el ámbito de la construcción, seguido por la supervisión de obra con el 25%, y estructuras con el 9.4% (ver anexos). Esto significa que gran parte del gremio está involucrado directamente en la construcción y obra, y que debe estar familiarizado con los RCD.

Se puede apreciar que 65.6% de los encuestados ha desempeñado su perfil por más de 10 años, y el 95% de los que tienen esa experiencia pertenecen al área de la construcción y supervisión de obra; esto se traduce a que gran porcentaje de los encuestados son personas con más de 10 años de experiencia en construcción y supervisión de obra.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el 78.1% de los encuestados ha recibido algunas veces (50%) o nunca (28.1%), información general sobre el manejo y tratamiento de los RCD, lo cual refleja la falta de enfoque hacia este tema, pues se considera que las empresas involucradas en el área de la construcción deben saber cómo gestionar los residuos de un sector donde se desempeñan cotidianamente, esto debe ser un requisito indispensable. Aunado a ello, el 87.5% considera sus conocimientos sobre el manejo de RCD, medios (53.1%) y bajos (34.3%).

Se encuentra al concreto simple o armado como el RCD visto con más frecuencia en la obra, seguido por pétreos y excavaciones; según los encuestados los residuos de metal

se detectan con menos frecuencia y enseguida la mampostería. Y la disposición final de estos es en sitio específico de almacenamiento (53.1%), vertederos (37.5%) y planta de almacenamiento y reciclaje (9.4%).

De los 32 encuestados, tan sólo 5 conocen algún reglamento o norma relacionado con la gestión de RCD, siendo la norma Nom-083-SEMARNAT-2003, y la certificación LEED, algunas de las respuestas obtenidas. La situación de Mazatlán en virtud al manejo de los RCD, es calificada desde el punto de vista del gremio, como mala (53.1%) y muy deficiente (34.4%), esto pone en evidencia la urgente necesidad de un plan de gestión de éstos.

El concreto fabricado con agregado grueso reciclado o comúnmente conocido como concreto reciclado, es poco conocido en la comunidad, puesto que sólo 1 encuestado considera sus conocimientos acerca de este tipo de concreto como “altos”, el 53.3% como “bajos”, y 40.6% “medios”. Estos datos cuantitativos reflejan objetivamente una escasez de información en este campo.

A pesar de los datos referidos anteriormente, es sorprendente que el 75% de los encuestados muestran gran apertura hacia el concreto reciclado en la construcción, significa que hay una predisposición a la adquisición de conocimiento de este concreto y del manejo eficiente de RCD, y muy probablemente al desarrollo de proyectos que involucren agregado grueso reciclado. Además, declararon las principales limitantes del uso de concreto reciclado son falta de infraestructura en Mazatlán (34.4%) y la poca demanda de este (31.3%).

De esta forma se concluye que las personas que desempeñan sus actividades en campo de la ingeniería civil y la construcción en Mazatlán Sinaloa, requieren informarse sobre el manejo y aprovechamiento eficiente de residuos de construcción y demolición, en especial de residuos de concreto al ser este el que más presencia tiene, destacando sus beneficios. Esto se puede lograr a partir de conferencias informativas en el Colegio de Ingenieros Civiles de Mazatlán A.C. por parte de especialistas en el área, así como el desarrollo de investigaciones tanto en el gremio como en universidades. Aunado a ello, las autoridades deben emitir reglamentos y normas que comprometan a empresas a fines al área, a la correcta gestión de RCD.

El impulso de dichas actividades podría ser la detonante para incitar a las empresas constructoras a desarrollar proyectos que apliquen concreto reciclado, eso generaría demanda en el mercado y así se promovería el desarrollo de infraestructura en la zona. Lo anterior podría resultar una tarea ardua e incluso sonar como una idea surrealista, pero los resultados de esta encuesta, revelan que existe una gran apertura al uso de concreto reciclado en Mazatlán, lo que se necesita es dar el siguiente paso que materialice dicha idea y así volverla una realidad.

4.2. Conclusiones

El reciclaje del concreto representa un estudio amplio y complejo que vale la pena explorar y profundizar, debido al panorama medioambiental en el que se encuentra el planeta actualmente; más aún en México, que la información referente al tema resulta un tanto limitada.

Internacionalmente el estudio del concreto reciclado ha sido promovido desde hace ya unas décadas atrás, lo cual ha desarrollado normativa que regula el empleo de este, tal es el caso de la ASTM y la AASHTO en Estados Unidos, o la Norma-EHE-08, en España. En el caso de México, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (versión 2017), en la sección 12 *Concretos Especiales*, se mencionan los requerimientos de los agregados reciclados para su empleo estructural, misma que comparte similitudes con la norma española mencionada.

Si bien es cierto que las propiedades físico-mecánicas de los concretos con agregado reciclado se ven afectadas de manera no tan favorables, los resultados experimentales de estudios por especialistas en el área, también demuestran que es posible controlar estas deficiencias, al variar el porcentaje y la calidad de agregado reciclado en la mezcla, la relación a/c, el reemplazo de cierta cantidad de cemento por ceniza volante, remover el mortero adherido en el agregado y su remojo previo en nano-sílice para llenar vacíos, entre otras técnicas.

El reciclaje del concreto en México no es una actividad que se realice de manera constante, y ello debido a diversos factores; culturalmente, no se tiene muy inculcada esta filosofía; existe cierto estigma hacia el concreto reciclado, haciendo que su demanda sea escasa; no hay normas que exijan estrictamente, o que obliguen el desarrollo de esta práctica; no se cuenta con la infraestructura adecuada en la mayor parte del país; además las investigaciones hacia esta temática para su implementación no son muy comunes.

Hablando localmente, de acuerdo a la encuesta aplicada al Colegio de Ingeniero Civiles de Mazatlán A.C, Mazatlán Sinaloa adolece de un plan de manejo de RCD y por ende de la implementación del reciclaje del concreto; por lo que, es necesario el desarrollo de estrategias que permitan la gestión óptima de estos, y de investigaciones en esta área, para así estudiar a detalle las propiedades físicas y mecánicas de este tipo de concreto y tener más certeza en el empleo del agregado reciclado para la creación de nuevos concretos y de esta forma lograr que su uso se esparza de manera homogénea en el país.

El desarrollo de la presente investigación permitió conocer datos que brindan un contraste muy claro entre la cultura del reciclaje nacional e internacional, pues, mientras en México no es muy explorado ni fomentado este ámbito, en otros países como Japón, se desarrollan estrategias para la optimización del proceso de reciclado del concreto, con el fin de obtener agregados más adecuados, para producir nuevas mezclas que le permitan tener un uso más variado y así garantizar su máximo aprovechamiento, aumentando el porcentaje de reciclaje de este compuesto y por ende, contribuyendo positivamente al medio ambiente.

4.3. Recomendaciones

De acuerdo al panorama actual en México y Sinaloa, se considera necesario tomar iniciativas que impulsen a la implementación del reciclaje del concreto, específicamente del uso de agregado grueso reciclado para la elaboración de nuevos concretos.

En primer lugar, resulta sustancial fomentar investigaciones teórico-experimentales en el área, para que de esta forma se conozcan más a fondo las propiedades físicas y mecánicas de concretos hechos con agregado grueso reciclado. Con el propósito de elaborar concretos óptimos y sustentables, que tengan una amplia gama de usos, y mostrar datos objetivos que puedan erradicar los estigmas hacia este tipo de concreto.

De igual forma, la implementación de normas y reglamentos con acuerdos que comprometan a las empresas involucradas en el área de la construcción al manejo correcto de los RCD, impactaría significativamente la cantidad de estos residuos en depósitos clandestinos o vertederos. Así como la activación de multas o sanciones a los organismos que no cumplan con dichas obligaciones. Por otro lado, el fomentar la obtención de certificaciones en materia de sustentabilidad, sería una motivación para las empresas a optar por reciclar concreto y a gestionar de manera adecuada las RCD.

En cuanto a los usos prácticos recomendados que se tienen para el agregado grueso reciclado en concreto de cemento Portland, bajo ciertas especificaciones, son:

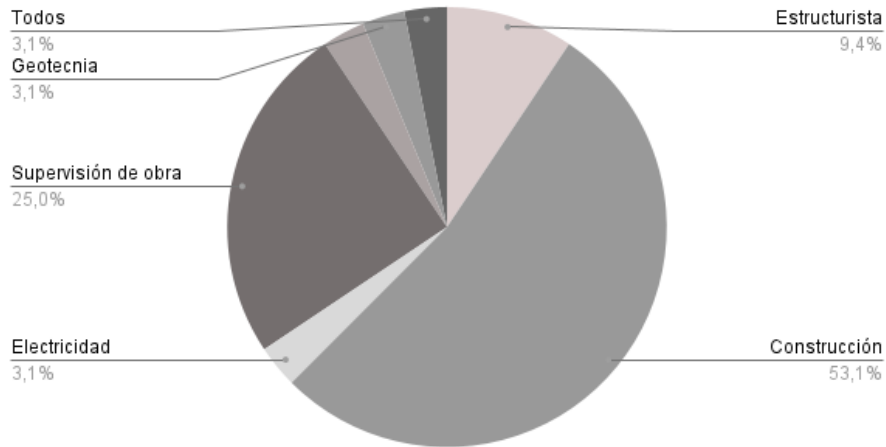
- Bases y sub-bases, hidráulicas en caminos y estacionamientos.
- Bordillos y cunetas en caminos.
- Aceras, rampas, calzadas.
- Mezcla asfáltica en caliente
- Reparación en baches, o irregularidades en carreteras
- Mobiliario urbano tales como bancas, mesas, jardineras o macetas, arriates, basureros, guarniciones.
- Bases para ciclovías/ trota-vías, y andadores.

El porcentaje de agregado reciclado (AR) que puede sustituir al agregado natural en el concreto puede variar, pues influyen factores como la calidad del AR, o el uso que se le tiene destinado al concreto, en la Tabla 5 se pueden apreciar los porcentajes propuestos por la norma NACDMX-007-RNAT-2019, cabe mencionar que sólo habla de usos no estructurales e incluye otros tipos de RCD a parte del AR. Se cree, que el incluir en Mazatlán, Sin., un proyecto con cierto porcentaje de AR, tal como un parque o cualquier centro de recreación, será un parteaguas para la implementación del concreto reciclado en la comunidad, además será un atractivo por el hecho de ser un proyecto sustentable.

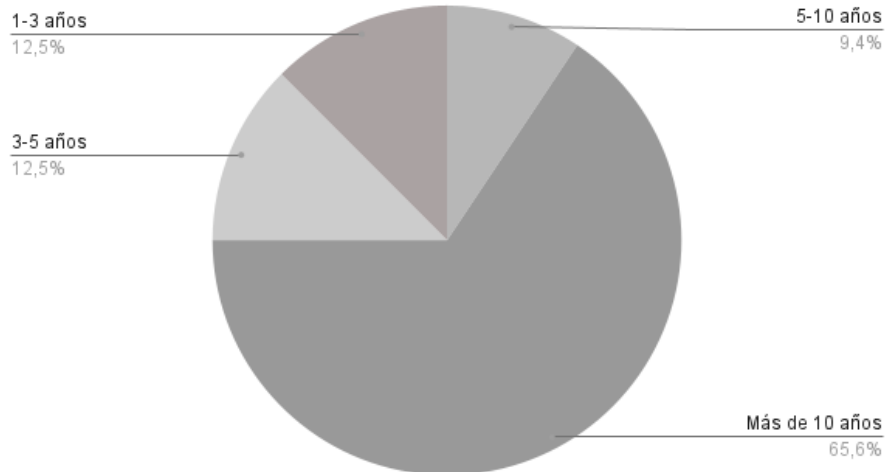
Anexos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la encuesta, *Manejo de residuos de construcción y demolición en Mazatlán Sinaloa*, aplicada al Colegio de Ingenieros Civiles de Mazatlán A.C.

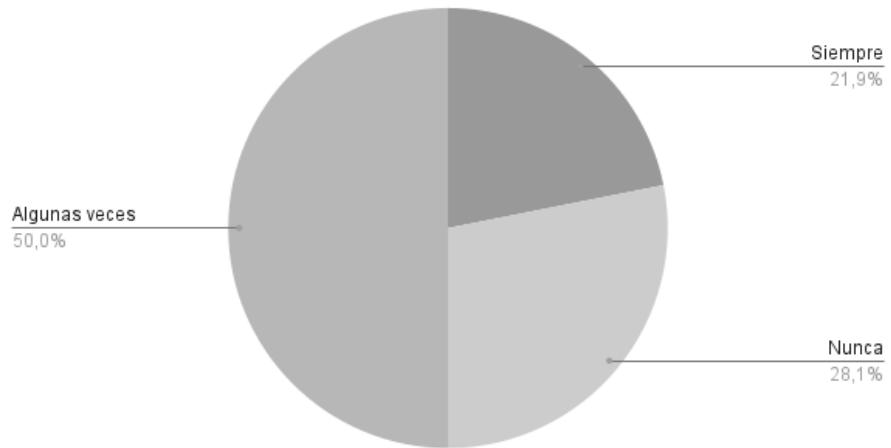
Recuento de 1. Seleccione el área dentro de la Ingeniería Civil en la que se desempeña



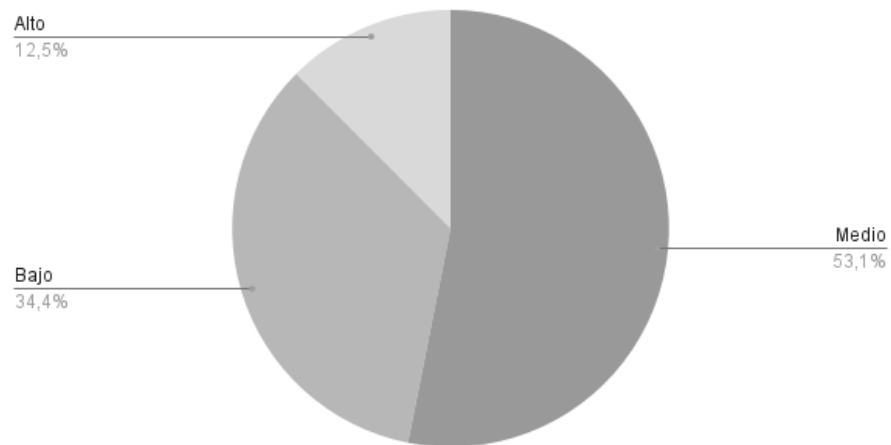
Recuento de 2. ¿Por cuantos años ha desempeñado dicho perfil?



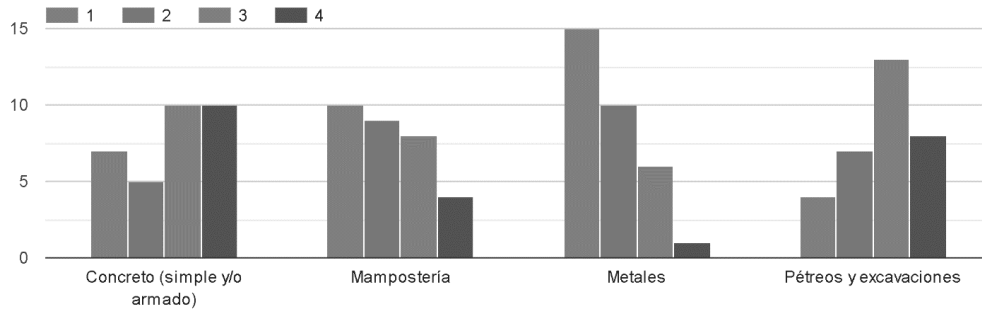
Recuento de 3. En su área laboral, ¿ha recibido información general sobre el manejo y tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición?



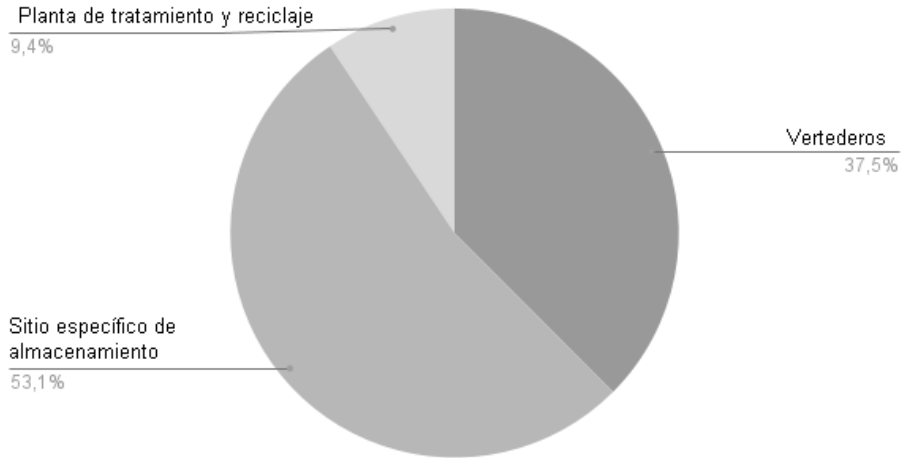
Recuento de 4. ¿Cómo considera su conocimiento sobre el manejo y tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)?



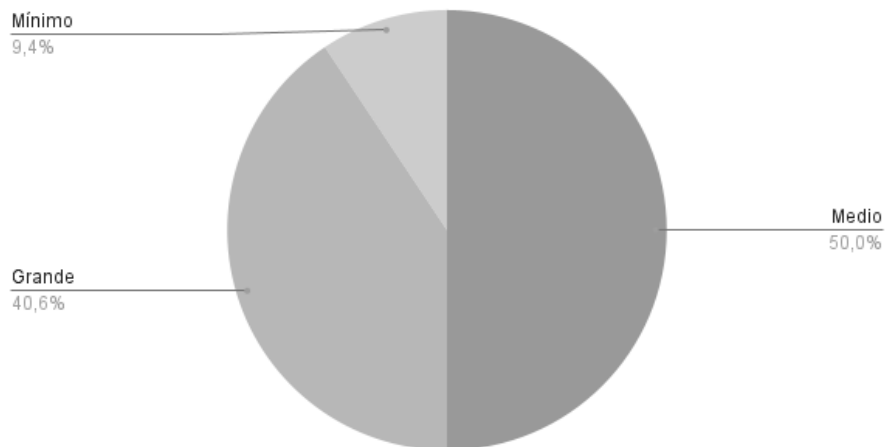
5. Califique del 1 al 4 (donde 1 es menor), los Residuos de Construcción y Demolición más frecuentes que detecta en la(s) obra(s) que ha desarrollado.



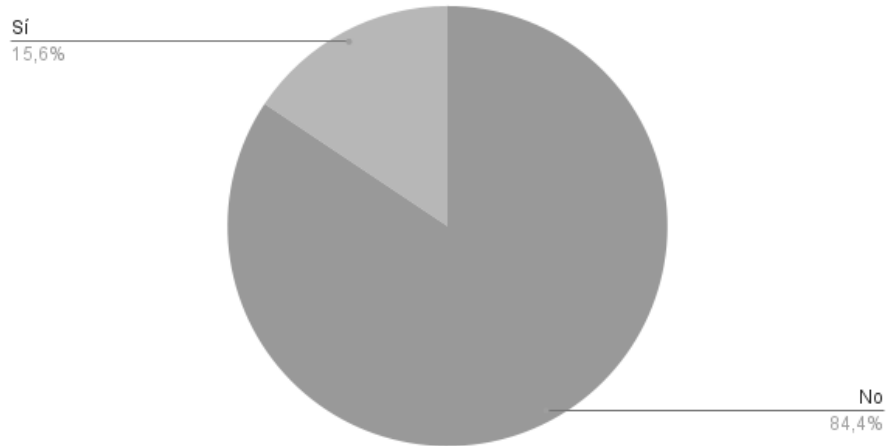
Recuento de 6. De acuerdo a su experiencia ¿Cuál es la disposición final que se le han dado a los Residuos de Construcción y Demolición ?



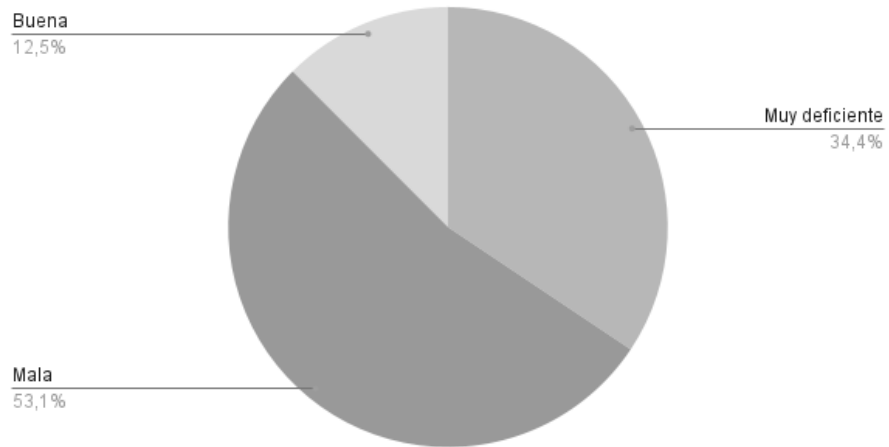
Recuento de 7. Según su criterio ¿Cuál es el grado de afectación medioambiental que tienen los Residuos de Construcción y Demolición?



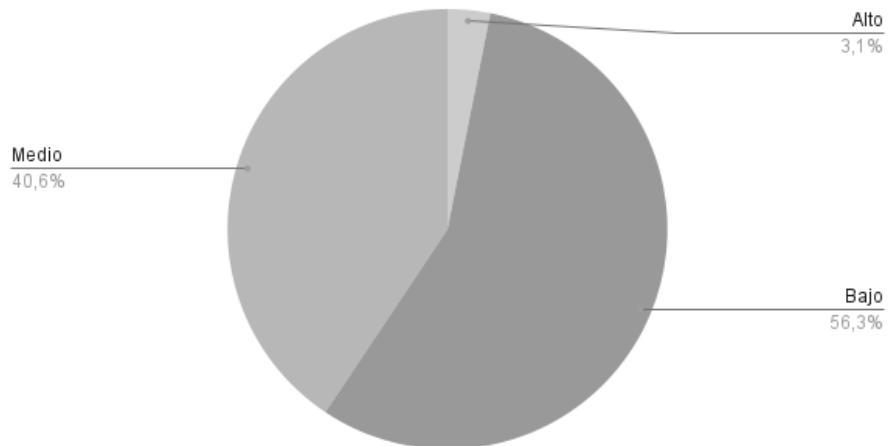
Recuento de 8. ¿Conoce algún Reglamento o Norma que se enfoque total o parcialmente en la gestión de RCD?



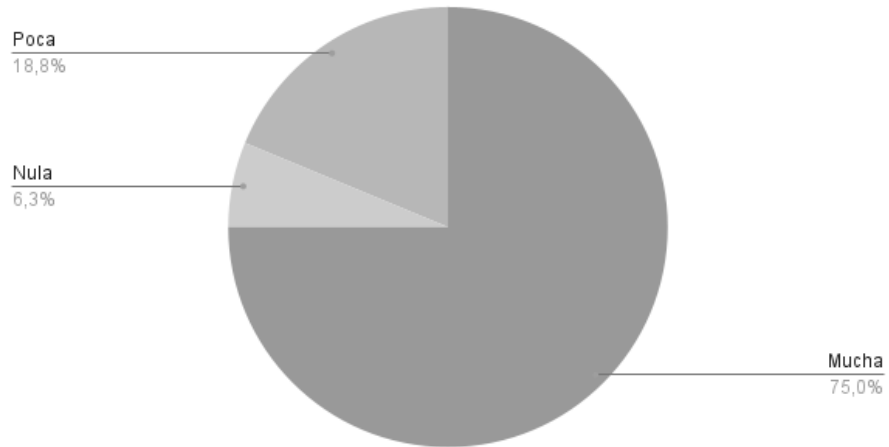
Recuento de 9. Basado en su trayectoria en el área de la ingeniería civil y la construcción ¿cómo evalúa la situación de Mazatlán respecto a la gestión de los



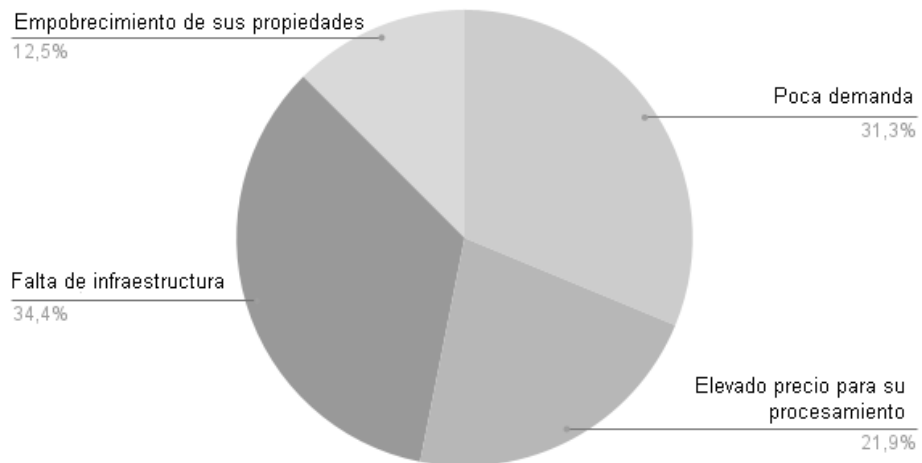
Recuento de 10. ¿Cómo considera su conocimiento sobre el concreto fabricado con concreto reciclado?



Recuento de 11. ¿Qué tanta apertura mostraría a la implementación de concreto reciclado en la construcción?



Recuento de 12. De acuerdo a sus conocimientos sobre el concreto reciclado en la construcción ¿Qué limitantes percibiría en el uso de este?



Referencias

(s.f.).

004. Calidad de Aditivos Químicos para Concreto Hidráulico. (2004). En *CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES* (pág. 7). México: N·CMT·2·02·004/04.
02. Estructuras. (2000). En *CTR. Construcción* (N·CTR·CAR·1·02·013/00 ed., Vol. CONCEPTOS DE OBRA , pág. 8). México. Obtenido de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CTR-CAR-1-02-013-00.pdf>
- Abreu, V., Evangelista, L., & Jorge, d. (2018). The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, 481-488. Recuperado el Junio de 2022
- Aceves-Gutierrez, H. †., Lopez-Chávez, O., Mercado-Ibarra, S. M., & Arevalo-Razo, J. L. (30 de Junio de 2020). Huella de carbono de una pavimentación con la metodología del ACV y SIMAPRO. *Revista de Energías Renovables*. Recuperado el 16 de Julio de 2022, de https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Energias_Renovables/vol4num12/Revista_de_Energ%C3%ADas_Renovables_V4_N12_2.pdf
- Adams, M., & Jayasuriya, A. (2019). *ACI CRC 18.517: Guideline Development for Use of Recycled Concrete Aggregates in New Concrete*. New Jersey Institute of Technology. New Jersey: ACI Foundation. Obtenido de https://www.acifoundation.org/Portals/12/Files/PDFs/ACI_CRC_18-517_Final_report.pdf
- Al Ajmani, H., Suleiman, F., Abuzayed, I., & Tamimi, A. (2019). Evaluation of Concrete Strength Made with Recycled Aggregate. *Buildings*, 1-14. Recuperado el 01 de Julio de 2022, de <https://com-mendeley-prod-publicsharing-pdfstore.s3.eu-west-1.amazonaws.com/0188-CC-BY-2/10.3390/buildings9030056.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEAMaCWV1LXdlc3QtMSJHMEUCIQc4HY1M0N45oe4Ncfo8JdAXHSBBJoaYI95c8lTRh5DEqAlgP9e3Kx5Xjed%2BqB3PYI4WuwbgEs>
- AMADOR GÓMEZ, A. J. (s.f.). Tipos de Cemento. *Tipos de Cemento*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2022, de http://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/6.tipos_de_cemento.pdf
- Ambiental, M. I. (2006-07). *RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN*. Obtenido de <http://www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos%20Construccion.pdf>
- ARCIRESA. (2012). *METACAOLÍN PESER*. Asturias, España: ARCIRESA Arcillas refractarias S.A.
- Bahraq, A., Jose, J., Shameem, M., & Maslehuddin, M. (2022). A review on treatment techniques to improve the durability of recycled aggregate concrete:

- Enhancement mechanisms, performance and cost analysis. *Journal of Building Engineering*, 2-9. Recuperado el Junio de 2022
- Begliardo, H., Sánchez, M., Panigatti, M., & Garrappa, S. (01 de Diciembre de 2013). Reutilización de yeso recuperado de construcciones: un estudio basado en requisitos de aptitud de normas argentinas y chilenas. Santiago, Santiago.
- Bermejo Presa, P. O. (2020). Ficha sector. Gestión de residuos en Reino Unido 2020. *ICEX España Exportación e Inversiones*, 1-10.
- bio, D. b. (2015). *Construction and Demolition Waste management in Germany*. Deloitte SA. Member of Deloitte Touche Tohmatsu Limited.
- Buck, A. D. (1976). *RECYCLED CONCRETE AS A SOURCE OF AGGREGATE*. u. s. Army Engineer Waterways Experiment Station Concrete Laboratory. Vicksburg, Miss.: u. s. Army Engineer Waterways Experiment Station Concrete Laboratory.
- Cabezas Mejía, E. D., Andrade Naranjo, D., & Torres Santamaría, D. (2018). *Introducción a la metodología de la Investigación Científica*. (D. A. Aguirre, Ed.) Sangolquí, Ecuador. Recuperado el 16 de Diciembre de 2022, de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15424/1/Introduccion%20a%20la%20Metodologia%20de%20la%20investigacion%20cientifica.pdf>
- CHRYSO Aditivos España*. (01 de 11 de 2020). Recuperado el 18 de 04 de 2022, de <https://www.chryso.es/news/770/cenizas+volantes+chryso+aditivos+para+hormigon>
- CMIC, & SEMARNAT. (2013). *PLAN DE MANEJO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA DEMOLICIÓN*. MÉXICO: Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.
- CMT. *CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES*. (s.f.). México. Recuperado el 13 de Noviembre de 2022, de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-001-02.pdf>
- Cruz García, J. A., & Velázquez Yáñez, R. (2004). *Concreto Reciclado*. México DF: Instituto Politécnico Nacional.
- Daniel, I. M. (Agosto de 2013). Residuos de Construcción y Demolición (RCD) Situación actual y correcta gestión para el proceso de reciclaje en la industria mexicana. México DF, México, México.
- de Santos Marián, D., Monercillo Delgado, B., & García Martínez, A. (2011). *Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición*. Madrid ESPAÑA: Tornapunta Ediciones, S.L.U.
- Diario Oficial de la Federación. (2004). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-SEMARNAT-2003*. Ciudad de México. Recuperado el 18 de noviembre de 2022, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004#gs_c.tab=0

- Enolife. (11 de Diciembre de 2020). Llegan al país las vasijas vinarias de cocchiopesto, material que los romanos usaban hace 2.000 años. *Llegan al país las vasijas vinarias de cocchiopesto, material que los romanos usaban hace 2.000 años*. Mendoza, Argentina. Recuperado el 18 de Noviembre de 2022, de <https://enolife.com.ar/es/llegan-al-pais-las-vasijas-vinarias-de-cocchiopesto-material-que-los-romanos-usaban-hace-2-000-anos/>
- Flores, A. C. (08 de Agosto de 2021). *La Jornada*. Obtenido de Es obligado el uso de concreto reciclado en nuevas banquetas: <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/08/08/capital/es-obligado-el-uso-de-concreto-reciclado-en-nuevas-banquetas/>
- Galindo, R. (s.f.). *Timetoast timelines*. Obtenido de Timetoast timelines: <https://www.timetoast.com/timelines/1710663>
- García Temoltzi, J. F. (2014). *GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN*. México: Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) y Fundación de la Industria de la Construcción (FIC).
- Gonzalez , G., & Moo-Young, H. (2004). (F. H. Administration, Ed.) Recuperado el 17 de Noviembre de 2022, de <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/applications.pdf>
- Guidance, S. (2013). Recycled Aggregates from Inert Waste. *Scottish Environment Protection Agency*, 1.
- GUTIÉRREZ, J. C. (2006). *EFECTOS DE LA ADICIÓN DE METACAOLÍN EN EL*. Medellín, Colombia.
- Hasan Almusawi, M., Bin Abd Karim, A., & Ethaib, S. (24 de Noviembre de 2022). Evaluation of Construction and Demolition Waste Management. *recycling*, 1.
- Hormigon, M. d. (2 de febrero de 2018). *Burbujas de aire en el interior del hormigon. (Aditivo incorporador de aire). Mejoran la trabajabilidad de la mezcla e indispensables en elementos que van a estar sometidos a ciclos de hielo - deshielo*. Obtenido de https://twitter.com/mundo_hormigon/status/963032042253553665?lang=ar-x-fm
- Hu, M., Di Maio , F., Lin, X., & van Roekel, E. (s.f.). *Fates of end-of-life concrete and their economic implications*. CML - Institute of Environmental Sciences, Faculty of civil engineering and geosciences Delft University of Technology, Faculty of construction management and real estate Chongqing University, Strukton Milieutechniek .
- Initiative, C. S. (2009). *Reciclando Concreto*. WBCSD CONSEJO MUNDIAL EMPRESARIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE. Obtenido de https://docs.wbcsd.org/2009/06/e-CSI_Recycling_Concrete_Spanish.pdf
- Jin, R., & Chen, Q. (2015). Investigation of Concrete Recycling in the U.S. Construction Industry. *Procedia Engineering*, 2-8.

- Khan, S. A. (2005). *Evaluation of Mechanical Properties of Recycled Aggregate*. Kalamazoo, Michigan: Western Michigan University.
- Kim, J. (2022). Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Construction and Building Materials*, 4-9. Recuperado el 13 de Junio de 2022
- LGEEPA. (1988). *LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Libro 03 Construcción e instalaciones. (2000). En *Normas de la construcción de la administración pública del Distrito Federal*. DF.
- Lizarazo, F. A. (2015). *VENTAJAS Y USOS DEL CONCRETO RECICLADO*. Bogotá: FACULTA DE INGENIERIA CIVIL, UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.
- M. f., & L. a. (s.f.). *METALES PARA LA CONSTRUCCIÓN, Esenciales y totalmente Reciclables*. Recuperado el Junio de 2022, de Metals for buildings: <http://www.metalsforbuildings.eu/assets/pdf/1cc1f3d9f3/MFB-leaflet-LR-ES.pdf>
- Mendoza, J. F., Adame, E., & Marcos, O. A. (08 de Junio de 2020). NOTAS núm. 184, MAYO-JUNIO 2020, artículo 1. Beneficios ambientales del reciclaje de pavimentos. México, México.
- Miranda, S. D. (2020). *DESARROLLO DE HORMIGONES RESISTENTES AL FUEGO CON ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE UNA PLANTA DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN*. Sevilla: Dpto. Ingeniería Química y Ambiental Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- Mora, D. F. (2016). *Proceso de Producción de Agregados Pétreos y su control de calidad*. Ciudad de México.
- Mors, R. (2018). *Perspectivas para promover la sustentabilidad*. México: Women 4 Climate Mexico City. Recuperado el 16 de Julio de 2022, de http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca_c/Proyecto_Rene_Mors.pdf
- Mostafa, A., & Farzad, H. (2022). Prediction of mechanical and durability characteristics of concrete including slag and recycled aggregate concrete with artificial neural networks (ANNs). *Construction and Building Materials*, 8. Recuperado el Junio de 2022
- N-CMT-2-02-001/02. (2002). 02. Materiales para Concreto Hidráulico . En *CMT. Características de los materiales* (págs. 2-5). México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT.
- Newsletter, I. a. (18 de Julio de 2019). Cocciopesto de Ragno reinterpreta la belleza de un material antiguo a través de la cerámica. *Fragmentos de viejas tejas y ladrillos hacen vibrar la superficie de la pasta cerámica*. Sassuolo, Módena, Italia. Recuperado el 18 de Noviembre de 2022, de <https://www.ragno.es/noticias/magazine/cocciopesto-revestimientos/>

- Nistal Cordero, Á., Retana Maqueda, M., & Ruiz Abrio, T. (2012). *El hormigón: historia, antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia*. Universidad Alfonso X El Sabio . Villanueva de la Cañada (Madrid): Revista Tecnológico@ y desarrollo. Recuperado el 06 de Julio de 2022
- NTC. (2021). Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto con comentarios. En NTC, & J. Esteva Medina, *Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto con comentarios* (págs. 201-202). Ciudad de México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Oficemen. (2017). *Oficemen*. Obtenido de Oficemen. Agrupación de fabricantes de cemento de España: <https://www.oficemen.com/el-cemento/proceso-de-fabricacion/>
- Ontiveros, L. B. (2021). *Fundamentos teóricos de la Investigación Social* (Primera ed.). (J. M. Álvarez, Ed.) Culiacán, Sinaloa: Dirección General de Escuelas Preparatorias, Circuito interior oriente s.n. Ciudad Universitaria. Recuperado el 16 de Diciembre de 2022
- Pacheco Bustos, C. A., Fuentes Pumarejo, L. G., Sánchez Cotte, É. H., & Rondón Quintana, H. A. (18 de Marzo de 2017). Residuos de construcción y Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión. Barranquilla: Ingeniería y desarrollo. Recuperado el Julio de 2022
- Pauw, A. (1960). *Static modulus of elasticity of concrete as affected by density*. University of Missouri Libraries. Recuperado el Junio de 2022
- Pérez García, N., Garnica Anguas, P., & Rivera, A. (2018). *Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de un agregado de concreto reciclado*. Pedro Escobedo, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Pietersen, H., & Fraay, A. (2015). *Performance Of Concrete With Recycled Aggregates*. Delft Technical University, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Materials Science Group, Delft, The Netherlands. INTRON BV, Houten, The Netherlands.
- Ramírez, M. (15 de Abril de 2020). *Transferencia Tec*. Obtenido de El sitio de divulgación científica del Tec de Monterrey: <https://transferencia.tec.mx/2020/04/15/investigadores-estudian-la-durabilidad-del-concreto-en-mexico/>
- Ramírez, M. (s.f.). *Investigadores estudian la durabilidad del concreto en México*.
- RCM, R. (22 de Noviembre de 2017). ¿Qué pasó con los residuos de los derrumbes del sismo? *City Manager*. Recuperado el Junio de 2022, de <https://revistacitymanager.com/actualidad/que-paso-con-los-residuos-de-los-derrumbes-del-sismo/>

- Rivera, E., Guerrero, R., Espinoza, P., Millon, G., & Áreas, E. (2020). Concretos reciclados, posibilidades de investigación desde el pregrado. *Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Arquitectura Arquitectura +*, 31-32.
- Robledo, C. E. (2020). Revisión documental sobre concretos reciclados y su resistencia a la compresión. *Revisión documental sobre concretos reciclados y su resistencia a la compresión*, 11-13. BOGOTÁ, D. C, BOGOTÁ, D. C, Colombia: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería, Bogotá DC.
- Rodríguez, A. (06 de Julio de 2022). *En Roma.com*. Obtenido de En Roma.com: <https://www.enroma.com/panteon-roma/>
- Rodríguez, J. P. (2016). *“Estudio preliminar para el uso de áridos reciclados en la normativa cubana.”*. La Habana, Cuba.
- Romea, C. (2014). El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario. *Omnia Publisher*, 1-17. Recuperado el 06 de Julio de 2022, de <https://www.omniascience.com/books/index.php/monographs/catalog/download/77/311/491-1?inline=1#:~:text=El%20alba%20C3%B1il%20ingl%C3%A9s%20Joseph%20Aspdi n,una%20cierta%20adici%C3%B3n%20de%20yeso.>
- Rueda, A. (01 de Noviembre de 2020). *País Circular*. Obtenido de La Ciudad de México, a la carga de una deuda pendiente: el reciclaje de los residuos de la construcción: <https://www.paiscircular.cl/ciudad/la-ciudad-de-mexico-a-la-carga-de-una-deuda-pendiente-el-reciclaje-de-los-residuos-de-la-construccion/>
- Sampieri, R. H. (2010). *Metodología de la Investigación*. México: McGraHill.
- SEMARNAT, S. d. (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos*. México.
- Solís, R., Moreno, E., & Arjona, E. (2012). Resistencia de concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c. *ALCONPAT*, 21 - 29.
- Tam, V. W. (2009). *Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries*. Sydney: Journal of Cleaner Production.
- Tamayo, M. T. (2003). *EL PROCESO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA incluye evaluación y administración de proyectos de investigación* (Cuarta ed.). México DF: EDITORIAL LIMUSA. S.A. DE C.v., GRUPO NORIEGA EDITORES. Recuperado el 16 de Diciembre de 2022, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/227860/El_proceso__de_la_investigaci_n_cient_fica_Mario_Tamayo.pdf
- Technology, N. C. (2018). *Recycled Concrete Aggregate Usage in the US*. Ames, Iowa: Iowa State University.
- Torres, A., & Urquiza, E. (2012). *Propiedades físicas de morteros fabricados con cinco diferentes marcas de cemento tipo cpc 30r*. Publicación bimestral de divulgación

- externa, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro. Recuperado el Noviembre de 2022, de <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=362&IdBoletin=134>
- Toxement, E. G. (2016). MICROSÍLICE. Bogotá, Bogotá, Colombia. Obtenido de https://www.toxement.com.co/media/3379/microsi-lice_p.pdf
- Vidaud Quintana, I., & Vidaud Quintana, I. (2015). Propiedades fisico-mecánicas de los concretos reciclados. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 22-27.
- Yang, I.-H., & Kim, K.-C. (2016). *Mechanical Properties and Predictions of Strength of Concrete Containing Recycled Coarse Aggregates*. Korea: Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. Recuperado el Junio de 2022
- Younis, A., El-Sherif, H., & Ebead, U. (2022). Shear strength of recycled-aggregate concrete beams with glass-FRP stirrups. *Composites Part C: Open Access*, 5-6. Recuperado el Junio de 2022
- Yuni, J., & Urbano, C. (2014). *Técnicas para investigar 2. Recursos metodológicos para la preparación de proyectos de investigación*. Córdoba, Argentina: Brujas.