



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta para el aprovechamiento del
material reciclado de los residuos de la
construcción, para la elaboración de
materiales de acabado mediante el uso de un
geopolímero, en la Ciudad de México**

TESINA

Que para obtener el grado de
Especialista en Ingeniería Sanitaria

P R E S E N T A

Karla Isabel García Rodríguez

DIRECTOR DE TESINA

Dr. Luis Antonio García Villanueva



Ciudad Universitaria, CD. MX., 2022

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Alberto e Isabel, no sólo por su apoyo y amor incondicional, sino por ser mi mayor inspiración y motivación para siempre superarme, gracias a ustedes he llegado tan lejos y este logro también es suyo.

A mi hermano, Beto, porque a su muy peculiar manera me hace sentir que siempre estaremos el uno para el otro, además crecer sin ti no hubiera sido ni la mitad de divertido de lo que ha sido.

A Alejandro, porque durante estos años que hemos compartido me ha brindado su amor y apoyo constante y porque a pesar de las circunstancias nunca has dejado de creer en mí, sigamos caminando juntos.

A mi familia, porque gracias a ustedes sé que el cariño se puede sentir aún estando a la distancia y que soy demasiado afortunada de tener tantas personas con quienes contar, los quiero a todos.

A mis aMigos, porque en las buenas y en las malas siempre me han extendido un abrazo, porque por más que pase el tiempo y la vida sé que seguirán siendo mi segunda familia, gracias.

A mi asesor, el Doctor Luis Antonio García Villanueva, por ser un excelente profesor y compartirme su tiempo y conocimientos para el desarrollo de este trabajo, además de motivarme con su pasión por esta noble especialidad.

Al CONACYT no solo por apoyarme de manera individual a lo largo de todo mi desempeño académico, sino por seguir promoviendo y ayudando a que cada vez más jóvenes se involucren en la ciencia y la tecnología.

Y finalmente a la UNAM, porque gracias a esta institución y a mis profesores he logrado alcanzar uno de mis más grandes objetivos, formarme no únicamente como ingeniera civil sino también alcanzar el grado de especialista, permitiéndome así contribuir a nuestra sociedad de manera más preparada, por esto y más gracias.

ÍNDICE

Capítulo 1	Introducción	1
1.1.	Planteamiento del problema	2
1.2.	Objetivo General.....	2
1.3.	Objetivos Particulares	2
1.4.	Alcance.....	3
Capítulo 2	Situación actual	4
2.1.	Residuos en la construcción	4
2.2.	Industria cementera.....	5
Capítulo 3	Reciclaje de Residuos de la Construcción y Demolición	9
3.1.	¿Qué es el reciclaje y cuál es su importancia?.....	9
3.2.	Reciclaje de residuos industriales	10
3.3.	Reciclaje de Residuos de la Construcción y Demolición.....	11
3.3.1.	Escenario en México.....	12
Capítulo 4	Geopolímeros en la construcción	19
4.1.	¿Qué son?	19
4.2.	Presencia en la construcción.....	20
4.3.	Casos de aplicación.....	21
4.3.1.	Metacaolín.....	21
4.3.2.	Ceniza volante y piedra pómez	22
4.3.1.	Escoria de alto horno y metacaolín.....	23
Capítulo 5	Normatividad para materiales reciclados en la construcción	24
5.1.	Marco internacional	24
5.2.	Situación en México	26
Capítulo 6	Propuesta del caso de estudio.....	29
6.1.	Producción de concreto y mortero	29
6.2.	Revisión bibliográfica	31
6.2.1.	Residuos de la Construcción y Demolición	31
6.2.2.	Geopolímeros	44

6.2.3.	Resumen.....	45
6.3.	Propuesta final	47
6.3.1.	Selección de materiales.....	47
6.3.2.	Metodología	48
Capítulo 7	Conclusiones y recomendaciones.....	50
Capítulo 8	Referencias consultadas	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estimación de la caracterización de los RCD.....	4
Figura 2.2 Fabricación de productos a base de cemento.....	6
Figura 2.3 Emisiones de GEI (Gg de CO ₂) del sector industrial en 2013.	7
Figura 2.4 Fabricación del cemento.....	8
Figura 3.1 Gestión integral de los residuos con un enfoque de economía circular.	9
Figura 3.2 Representación gráfica de los límites de reciclado.	10
Figura 3.3 Ciclo de vida de residuos de concreto.	13
Figura 3.4 Simbiosis Industria.....	17
Figura 4.1 Componentes básicos de un geopolímero.....	19
Figura 4.2 Diferencia en los procesos de producción.	21
Figura 4.3 RC a 28 días de muestras de geopolímero como una función de las relaciones molares SiO ₂ /Al ₂ O ₃ , Na ₂ O/Al ₂ O ₃ y la relación agua/sólidos.	22
Figura 4.4 Resistencia de los concretos CP, GC y GP.....	23
Figura 4.5 Resultados del ensayo de RC para cada corrida experimental.....	23
Figura 5.1 Interfaz del Catálogo de Residuos del Gobierno de España.	24
Figura 6.1 Proporcionamiento de mezcla de concreto.	30
Figura 6.2 Resistencia a la compresión para concretos de 150 kg/cm ² a 7, 14 y 28 días.	35
Figura 6.3 Resistencia a la compresión para concretos de 200 kg/cm ² a 7, 14 y 28 días.	35
Figura 6.4 Resistencia a la compresión para concretos de 250 kg/cm ² a 7, 14 y 28 días.	36
Figura 6.5 Distribución granulométrica de árido grueso recicla (CRA), árido grueso natural (CNA), arena natural y filler.	37
Figura 6.6 Resistencia a compresión.....	38
Figura 6.7 Distribución granulométrica del árido fino natural (FNA-CEN) y del árido fino de hormigón reciclado (FRCA).....	39
Figura 6.8 Resistencia a compresión a las edades de 7, 28 y 90 días.	40
Figura 6.9 Gráfica de la grava reciclada vs límites granulométricos para una grava TMA 1”.	41
Figura 6.10 Gráfica de la arena reciclada vs límites granulométricos.	42
Figura 6.11 Gráfica de resistencia a la compresión, Martínez García.	46
Figura 6.12 Gráfica de resistencia a la compresión, Domínguez Lepe.....	46

Figura 6.13 Gráfica de resistencia a la compresión, López Andraca.....	46
Figura 6.14 Diagrama de flujo para la elaboración de la mezcla de mortero.....	48
Figura 6.15 Diagrama de flujo para la determinación de la resistencia a la compresión del mortero.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Clasificación de los Residuos de la Construcción y Demolición	11
Tabla 3.2 . Identificación de usos propuestos de los RCD.....	14
Tabla 3.3 Clasificación de los residuos de la construcción y demolición y su posible reúso	15
Tabla 3.4 Acciones necesarias para incrementar el volumen de residuos reusados	17
Tabla 5.1 Obras públicas y privadas con incorporación de material reciclado.	27
Tabla 6.1 Tipos de mortero y resistencia de diseño.....	30
Tabla 6.2 Propuesta de proporcionamiento en volumen, recomendados para mortero dosificado en obra 31	
Tabla 6.3 Proporcionamientos para concretos con agregados reciclados y naturales.....	32
Tabla 6.4 Características físico-mecánicas del agregado grueso.....	33
Tabla 6.5 Características físicas del agregado fino.....	33
Tabla 6.6 Granulometría del agregado grueso.....	34
Tabla 6.7 . Granulometría del agregado fino.....	34
Tabla 6.8 Proporción de áridos naturales y reciclados en las mezclas.....	37
Tabla 6.9 Dosificaciones (kg/m^3)	38
Tabla 6.10 Dosificación (kg/m^3).....	40
Tabla 6.11 Proporcionamientos típicos de mezcla de concreto.....	43
Tabla 6.12 Promedios de resistencia a la compresión de los diferentes especímenes probados	44
Tabla 6.13 Resumen de resultados de resistencia a la compresión de pruebas de mezclas utilizando agregados reciclados	45
Tabla 6.14 Resumen de resultados de resistencia a la compresión de pruebas de mezclas utilizando geopolímeros	47

Capítulo 1 Introducción

El siguiente trabajo busca desarrollar una propuesta teórica que sea capaz de ofrecer una alternativa para ampliar el mercado de los materiales provenientes de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) dentro de la Ciudad de México. Hoy en día presentan problemas no sólo en términos de gestión (reciclaje y disposición), sino que la reincorporación de estos materiales al mercado se ve limitada, por lo que ofrecer un uso alternativo extra podría significar un mayor aprovechamiento de los materiales reciclados.

Para esto se llevó a cabo una búsqueda extensa de información, partiendo de la situación en la que se encuentran los RCD y llegando hasta los esfuerzos desarrollados mediante trabajos de investigación examinando posibles soluciones a esta problemática.

Con base en esto, el trabajo se divide en 5 capítulos principales, además de este primero que da pauta al planteamiento del problema y delimita los objetivos de esta tesina, así como el último capítulo que contiene las conclusiones alcanzadas al igual que recomendaciones pertinentes respecto al estudio.

En el Capítulo 2 Situación actual, se busca detallar el escenario en el que se encuentra hoy en día la generación y gestión de los RCD en México, específicamente en la Ciudad de México, al igual que la industria cementera en términos de producción y contaminación. Para conocer particularmente qué medidas se están tomando respecto al reciclaje de estos residuos, el Capítulo 3 Reciclaje de Residuos de la Construcción y Demolición hace mención del porqué la importancia del mismo, además de exponer las acciones y usos propuestos que se les dan actualmente a los materiales reciclados de esta industria.

Por otra parte, el Capítulo 4 Geopolímeros en la construcción es una breve introducción para entender a grandes rasgos qué son los geopolímeros y por qué se está empezando a hablar de ellos en la industria de la construcción, haciendo mención de estudios realizados con este enfoque. Avanzando en el trabajo, el Capítulo 5 Normatividad para materiales reciclados en la construcción, como su nombre lo dice, busca englobar la legislación existente referente al reúso de materiales reciclados tanto a nivel internacional como dentro de México.

Finalmente el Capítulo 6 Propuesta del caso de estudio, es donde toda la información previamente recopilada se entrelaza para dar pie a la propuesta formal de aprovechamiento de los RCD mediante la fabricación de una mezcla para mortero, especificando el proporcionamiento de materiales reciclados, la selección del geopolímero a utilizar, y la metodología para su desarrollo.

1.1.Planteamiento del problema

Los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) enfrentan un problema de disposición final, puesto que al ser categorizados como Residuos de Manejo Especial (RME) no se permite su transporte y disposición a través de los mismos medios que se utilizan para los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Como consecuencia, estos terminan siendo depositados en lugares no controlados trayendo consigo diversos problemas ambientales. Es por esto que hoy en día se buscan alternativas para el aprovechamiento de los RCD con la finalidad de reducir la cantidad que termina en sitios de disposición final. Sin embargo, a pesar de que los posibles usos del material reciclado son variados, hoy en día la única planta de reciclaje privada autorizada (Concretos Reciclados) en la Ciudad de México almacena poco más del 85% de material aprovechable (SEMARNAT, 2020).

Con base en estos datos es que se sugiere ampliar aún más el mercado de reciclados de RCD con la intención de disminuir el porcentaje almacenado. Para esto se propone la utilización de geopolímeros en conjunto con los agregados reciclados para la creación de materiales que puedan ser utilizados en diversos acabados arquitectónicos.

1.2.Objetivo General

Generar una propuesta de aprovechamiento del material reciclado de los residuos de la construcción para la elaboración de materiales de acabado, mediante el uso de un geopolímero, en la Ciudad de México.

1.3.Objetivos Particulares

- Investigar las ventajas y metodología de la sustitución del cemento Portland por geopolímeros para la elaboración de materiales de acabados.
- Identificar los diferentes tipos de geopolímeros y sus usos para la selección de aquel que cumpla con los requerimientos necesarios en la elaboración de los materiales de acabado.
- Obtener información sobre los procesos que se llevan a cabo para el reciclaje de los residuos de la construcción y demolición.
- Establecer las posibles características del material reciclado de acuerdo con la literatura existente, que permita la obtención de una calidad adecuada en los materiales de acabados.
- Proponer la metodología y características de los componentes para la elaboración de los materiales de acabado y sus posibles aplicaciones.

1.4. Alcance

El trabajo que se presenta es una propuesta teórica basada en la bibliografía existente que busca plantear una metodología para la elaboración de materiales de acabado, cuyo principal componente sea obtenido del reciclaje de los Residuos de la Construcción y Demolición. Debido a la disponibilidad de información y a que la problemática de almacenamiento de este producto es particular de la planta de Concretos Reciclados, el estudio se centrará en ofrecer una alternativa para su aprovechamiento dentro de la Ciudad de México.

Capítulo 2 Situación actual

2.1. Residuos en la construcción

De acuerdo al Plan de Acción de la Ciudad de México para una economía circular, se reconoce que la generación diaria de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) en esta entidad es de 14,000 toneladas diarias (SEMARNAT, 2020), las cuales se estima tengan una caracterización similar a la que se muestra en la Figura 2.1.

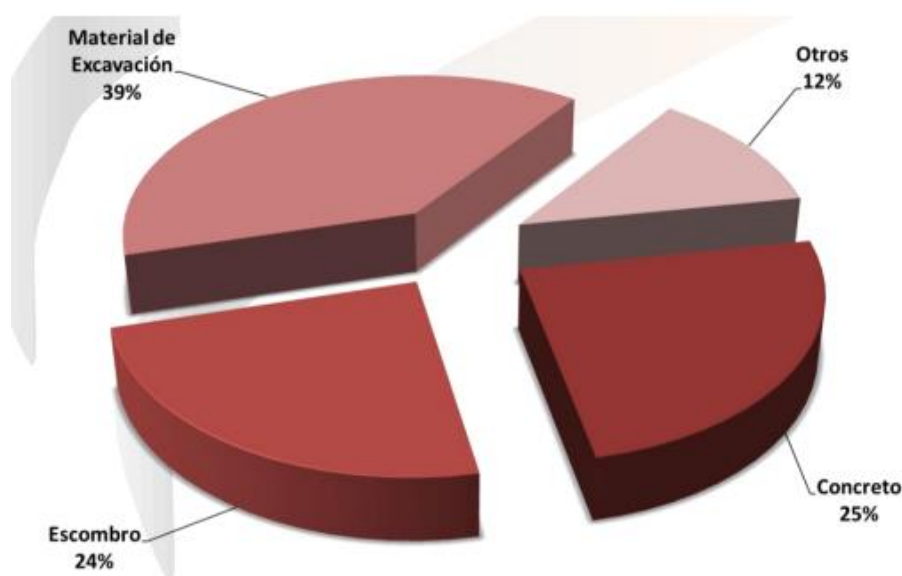


Figura 2.1 Estimación de la caracterización de los RCD. Fuente: (CMIC, 2013)

Como se puede observar en el gráfico, más del 85% de los materiales que componen a los RCD son elementos que provienen de un proceso productivo, lo cual aunado a la alta cifra de generación diaria, resultan en su categorización como Residuos de Manejo Especial (RME) de acuerdo a la definición establecida en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).

Es por esto que su gestión debe llevarse a cabo de manera independiente a la de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), lo cual no permite su transporte y disposición a través de los mismos medios utilizados para estos, ya que, como se indica en el Artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), el manejo de los RSU es responsabilidad de los gobiernos municipales, mientras que el de los RME recae en los propios generadores.

Como consecuencia de la poca regulación e interés que existe sobre su gestión, la disposición de estos residuos resulta en lugares no controlados tales como terrenos baldíos, barrancos, o donde

puedan servir para nivelar o ganar terreno en zonas irregulares; trayendo consigo diversos problemas ambientales como lo son la contaminación del suelo y subsuelo, obstrucción de arroyos, cañadas y barrancas, afectación al drenaje natural, al medio físico y medio biótico entre otros (CMIC, 2013).

Hoy en día se buscan alternativas para su aprovechamiento, puesto que sólo el 20% se dispone en sitios autorizados y apenas un 3% es reciclado (CMIC, 2013). Como parte de esta iniciativa, Concretos Reciclados fue fundada en 2004, convirtiéndose en la primer y única empresa privada autorizada en la Ciudad de México para el reciclado de los RCD. A pesar de su instalación y de la amplia variedad de usos del material reciclado, (estabilización de suelos, filtros o pedraplenes, conformación de terrenos, relleno en estacionamientos o jardines, construcción de terraplenes, acostillar tuberías, entre otros) actualmente esta planta de reciclaje reporta que el volumen de agregados reciclados que es reintegrado a la construcción de nuevas obras es inferior al 13% de los residuos recibidos, lo cual indica un alto almacenamiento de material aprovechable (SEMARNAT, 2020).

Con base en estos datos es que se sugiere ampliar aún más el mercado de reciclados de RCD con la intención de disminuir el porcentaje que es almacenado. Para esto se propone la utilización de geopolímeros en conjunto con los agregados reciclados para la creación de mortero que sea utilizados en diversos acabados arquitectónicos, esto debido a que los geopolímeros son considerados una nueva alternativa al uso del Cemento Portland gracias a su alta resistencia mecánica, durabilidad mejorada y baja emisión de CO₂ (Burciaga, Escalante, & Magallanes, 2015).

2.2. Industria cementera

Por otra parte es imposible hablar del sector de la construcción sin mencionar a la industria cementera. Hoy en día el concreto sigue siendo el material más utilizado para construir, por lo que el cemento se vuelve un componente imprescindible en esta industria; tan sólo en el primer semestre del 2019 se tenía una producción mensual promedio de 3.3 millones de toneladas de Cemento Portland en México (CANACEM, 2019), lo cual se ve reflejado en la composición de los RCD, ya que como se muestra en la Figura 2.1, en casi el 50% de estos residuos existe la presencia de cemento al ser el principal material que compone la mezcla de concreto y de mortero.

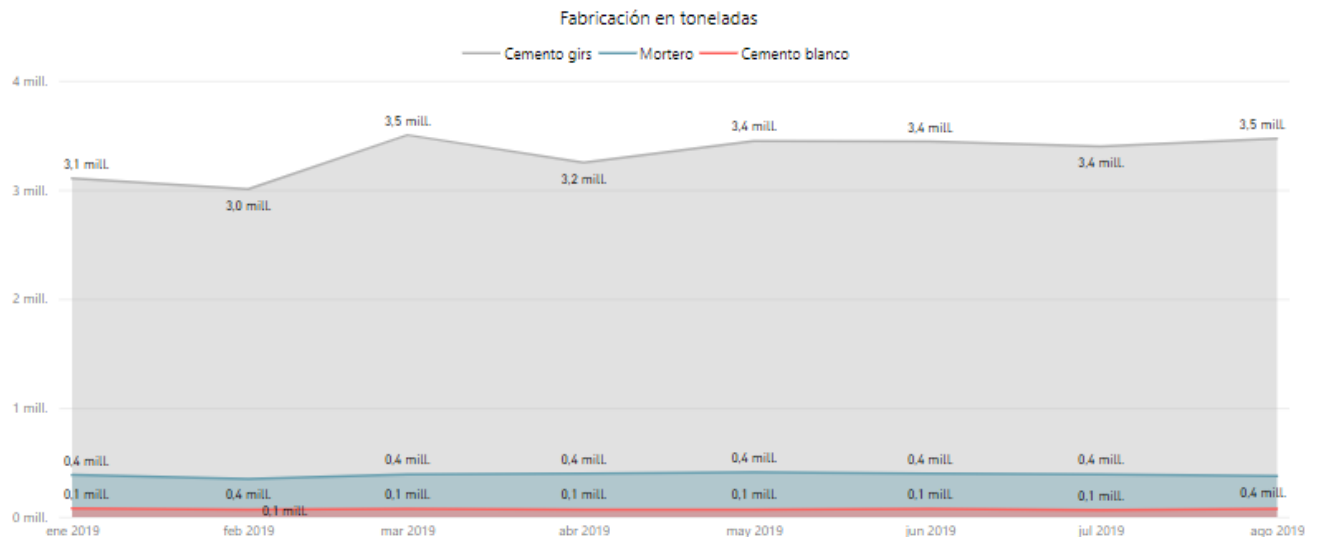


Figura 2.2 Fabricación de productos a base de cemento. Fuente: (CANACEM, 2019)

Si bien el concreto u hormigón ha permitido progresar a la humanidad no sólo con la construcción de viviendas más duraderas, sino también al lograr erigir obras civiles de gran importancia como presas, puentes, carreteras, plantas de tratamiento, edificaciones para servicios, entre muchas otras, su impacto ambiental no puede pasar desapercibido.

A nivel mundial la producción de cemento anual es de aproximadamente 4 mil millones de toneladas, lo que representa el 8% de las emisiones totales de CO₂ en la atmósfera (Lehne & Preston, 2018), por lo cual no es una sorpresa que tan sólo en México la industria cementera, siendo la principal emisora de Gases de Efecto Invernadero (GEI), emita anualmente 20,508.89 Gg de CO₂ tan solo por los métodos de fabricación (INECC & SEMARNAT, 2015), esto sin tomar en cuenta la emisión por uso de combustibles fósiles, tal como se muestra en la Figura 2.3.

Emisiones de GEI del sector industria (Gg de CO ₂ e)							
Total: 114,949.19							
Subsector	Total GEI	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFC	PFC	SF ₆
Consumo de combustibles							
Cemento	9,715.76	9,674.83	3.26	37.66			
Cal	931.35	928.58	0.78	1.99			
Siderúrgica	15,008.92	14,982.08	6.82	20.02			
Química	7,991.93	7,967.18	6.48	18.28			
Otras industrias	30,430.00	29,890.79	247.45	291.76			
Subtotal	64,077.96	63,443.46	264.80	369.71			
Procesos industriales							
Cemento	20,508.89	20,508.89					
Cal	3,281.93	3,281.93					
Siderúrgica	8,783.47	8,783.47					
Química	228.71	12.99	66.73	148.99			
Consumos de otros carbonatos	1,833.69	1,833.69					
Producción de halocarbonos	2,402.91				2,402.91		
Consumo de halocarbonos* y SF ₆	4,252.84				4,061.15**		191.69
Minería ***	9,578.77		9,578.77				
Subtotal	50,871.23	34,420.98	9,645.51	148.99	6,464.06		191.69
Total	114,949.19	97,864.44	9,910.30	518.70	6,464.06		191.69

Figura 2.3 Emisiones de GEI (Gg de CO₂) del sector industrial en 2013. Fuente: (INECC & SEMARNAT, 2015)

Como se mencionó, la principal fuente de emisiones por parte de la industria cementera es meramente durante el proceso de fabricación del cemento, pero existe una etapa que junto con la combustión térmica generan el 90% de las emisiones de este proceso (Rodgers, 2018). Esto es la producción del Clínker, el cual es el elemento clave del cemento. Este se forma cuando la caliza y la arcilla previamente pulverizadas y homogeneizadas se calcinan a una temperatura entre 1,350°C y 1,450°C en grandes hornos rotatorios. Estos hornos son cilindros de acero forrados internamente con ladrillo refractario, con un diámetro interno de 5m y una longitud de hasta 150m. Estos se encuentran ligeramente inclinados para que el material que se introduce por la parte superior, baje lentamente hacia la salida inferior; donde se localizan grandes quemadores que proyectan hacia el interior ACPM (Aceite Combustible Para Motores), fuel-oil, gas o carbón pulverizado, para alcanzar la temperatura deseada como se ilustra en la Figura 2.4 (Sánchez de Guzmán, 2001).

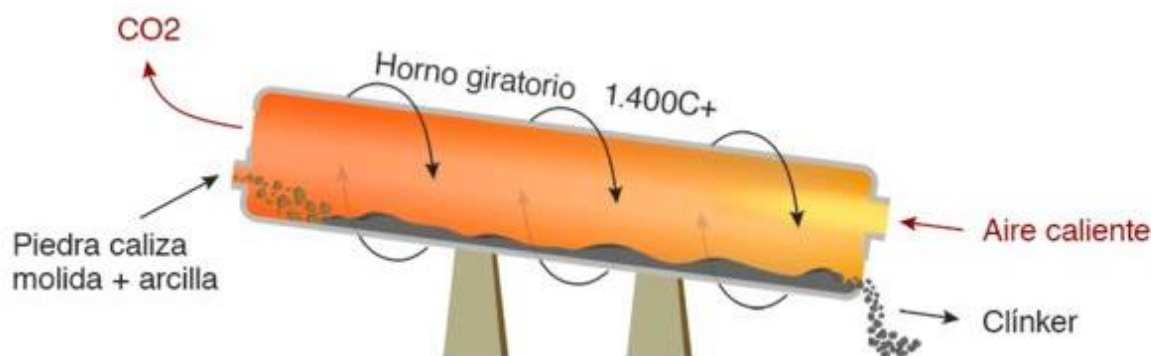


Figura 2.4 Fabricación del cemento. Fuente: (Rodgers, 2018)

Es en esta etapa donde los materiales se vuelven líquidos, reaccionan y forman compuestos químicos con propiedades cementantes, resultando así en la formación del Clínker, el cual aporta las propiedades de resistencia física, químicas y de coloración del cemento (CANACEM, 2021).

Con base en esto es que convenios internacionales como el Acuerdo de París, buscan limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C mediante la disminución de GEI's (Gases de Efecto Invernadero). Para alcanzar estos objetivos, empresas como CEMEX, una de las productoras de cemento más grandes de América, se comprometió a reducir sus emisiones de carbono en un 40% para antes de 2030; a pesar de ser una meta considerablemente ambiciosa siguen firmes en estas medidas (CEMEX, 2021). Sin embargo, se reconoce que para alcanzar estos objetivos las acciones por separado de innovación en tecnología de captura de carbono o en eficiencia energética, no son la solución ideal. Lo que se necesita es “afianzar los esfuerzos para producir nuevos tipos de cemento” (Rodgers, 2018). A pesar de que estos esfuerzos ya se están llevando a cabo, existen varias limitantes para popularizar su uso, yendo desde las regulaciones legislativas de cada país, hasta el aumento en el costo de producción de los mismos.

Es por esto que hoy más que nunca, es de vital importancia seguir fomentando y promoviendo los proyectos que busquen alternativas en los materiales utilizados para la producción de cemento si es que realmente se quiere lograr un cambio en los niveles de contaminación actuales y futuros.

Capítulo 3 Reciclaje de Residuos de la Construcción y Demolición

3.1. ¿Qué es el reciclaje y cuál es su importancia?

Hoy en día el ser humano se enfrenta a un nuevo reto ambiental, los residuos. Tan sólo en México la generación per cápita promedio de residuos en el país es de 0.944 kg/hab/día (SEMARNAT, 2020), lo cual se ve reflejado en la producción diaria de RSU de la Ciudad de México, siendo esta de 12,700 Tn (SEDEMA, 2019). Es por esto que se han buscado estrategias que permitan hacer frente ante esta situación, siendo la principal medida la reducción o prevención desde la fuente tal como se muestra en la Figura 3.1.

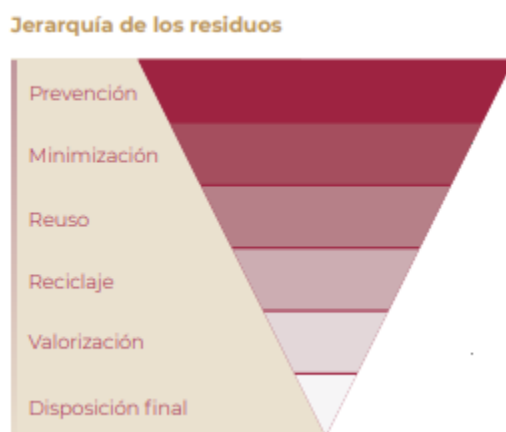


Figura 3.1 Gestión integral de los residuos con un enfoque de economía circular. Fuente: (SEMARNAT, 2019)

A pesar de que la reducción puede ser considerada la solución real al problema de generación de residuos, sigue siendo una alternativa sujeta a muchas variables, algunas de las más complejas, el comportamiento del mercado y sobre todo la cultura de consumo que se tiene hoy en día. Es debido a esto que no es posible esperar a que exista un cambio significativo de estas variables en un futuro cercano, por lo que se debe recurrir a las siguientes estrategias planteadas en la pirámide, el reuso y el reciclaje.

Aun cuando en la cotidianeidad se puede concebir al reuso y al reciclaje como acciones similares o iguales, es necesario conocer sus diferencias para comprender que son actividades completamente independientes. El reuso se entiende como volver a utilizar un producto para la misma función o propósito para el que fue creado, o de igual forma encontrar una alternativa sin necesidad de modificar sus propiedades físicas; por otro lado el reciclaje es el proceso en el que los materiales que componen al producto son recuperados mediante el procesamiento de los mismos para que de esta forma sean reingresados nuevamente al mercado, es importante mencionar que en el reciclaje existe una modificación en las propiedades ya sea físicas, químicas y/o biológicas del producto.

Con base en esto es que el reciclaje de los Residuos de la Construcción y Demolición se vuelve de suma importancia, puesto que al no poder reducir su generación y la complejidad que representaría el intento de reutilizar el cascajo sin ningún tipo de tratamiento dentro de las mismas obras, el reciclaje termina siendo la siguiente mejor estrategia para mejorar la gestión de estos residuos,

3.2. Reciclaje de residuos industriales

Los Residuos Industriales, como su nombre lo dice, son los generados en grandes cantidades dentro de procesos de producción o transformación en la industria, los cuales son considerados Residuos de Manejo Especial dentro de la LGPGIR puesto que son “Aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos” (Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, 2003).

Con base en el inciso anterior, se entiende que el reciclaje y la valorización para este tipo de residuos generalmente resultan ser la mejor estrategia de gestión para evitar que lleguen a los sitios de disposición final, siendo necesario tomar en cuenta los dos tipos de límites que existen para su correcta aplicación: el ecológico y el económico.

El límite ecológico es el más difícil de determinar puesto que depende de cada producto que se va a tratar. De manera sencilla este límite lo que intenta evaluar es si el proceso de reciclaje contamina más que la disposición final y/o la fabricación de un producto completamente nuevo. Mientras que, el límite económico es más sencillo de establecer, ya que busca conocer cuál es el precio del mercado y compararlo con los gastos de recogida; esta cifra tiende de manera asintótica a este costo como se muestra en la Figura 3.2 (Castells, y otros, 2012).

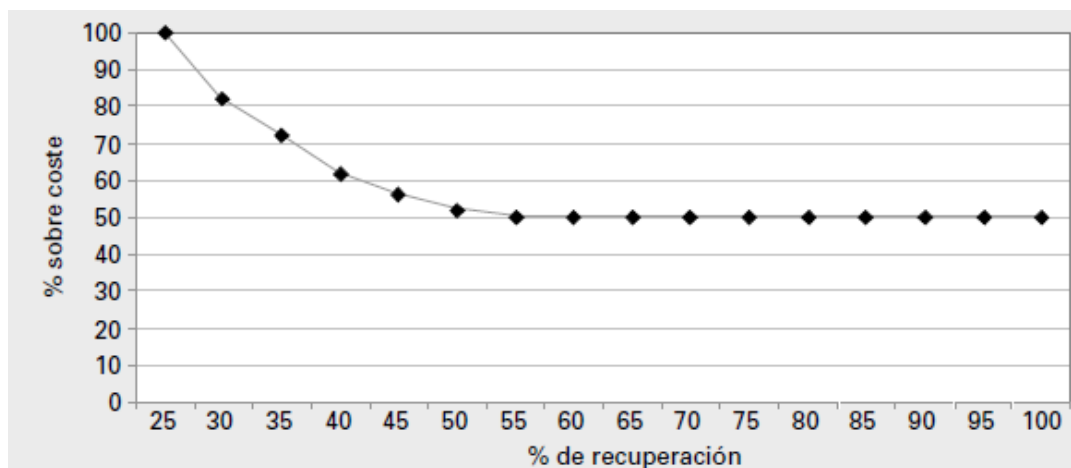


Figura 3.2 Representación gráfica de los límites de reciclado. Fuente: (Castells, y otros, 2012)

Sin embargo a pesar de que el aprovechamiento de estos residuos resulta tan importante, hoy en día siguen existiendo varios factores que dificultan llevarlo a cabo. Empezando porque buena parte de los productos que son consumidos no están diseñados para una fácil recuperación por lo que termina siendo imposible, con lo cual no solo genera residuos sino una continua sobreexplotación de los recursos. De igual manera aunque casi todos los residuos contienen algún componente valioso (por su naturaleza o por potencial energético), este puede encontrarse en concentraciones muy bajas dificultando que las tecnologías necesarias para su recuperación sean rentables, por lo que no es económicamente viable intentar aprovecharlo (Castells, y otros, 2012).

Es por esto que sigue siendo tan necesario la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan dar respuesta a estos factores, para que así, el reciclaje sea capaz de ser considerado como una estrategia de gran impacto en la mejora de la gestión de estos residuos.

3.3. Reciclaje de Residuos de la Construcción y Demolición

La clave del éxito para el aprovechamiento de los residuos es su correcta clasificación y separación; es por esto que es necesario identificar, aunque sea a grandes rasgos, las características de los residuos generados para así poder clasificarlos, una forma sencilla de hacerlo se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Clasificación de los Residuos de la Construcción y Demolición

RESIDUOS PELIGROSOS	RESIDUOS ASIMILABLES A URBANOS	RESIDUOS INERTES
Aceites Adhesivos Asbesto Barnices Cobre Diésel Gas Gasolina Lacas Petróleo Pinturas Plomo Resinas sintéticas Soldadura Envases de estos productos	Residuos similares a los domiciliarios (RSU) Papel Cartón Vidrio Plástico Residuos orgánicos (hojas, ramas, troncos y raíces – despalme) Restos de embalaje	Material para relleno Concreto Arena Mortero Asfalto Piedra – grava Tabiques / ladrillos Yeso Madera (cimbra) Cerámicas Escombros Albañales Metales Láminas Restos de mampostería

Fuente: Elaboración a partir de (CMIC, 2013)

A partir de esta tabla, se puede apreciar cuáles son los materiales dentro de los RCD que pueden ser recuperados, principalmente los contenidos en los Residuos Asimilables a Urbanos y los Residuos Inertes; de igual manera dentro de estos existe una posible subcategorización basada en su aprovechamiento, la cual se enlista a continuación:

- Materiales reutilizables: constituidos principalmente por piezas de acero estructural, elementos de madera de calidad, piezas de fábrica (mampostería), tejas y tierras de excavación.
- Materiales reciclables: compuestos por metales, plásticos y vidrio.
- Materiales destinados a la fabricación de productos secundarios: son fundamentalmente los materiales pétreos, cerámicos (ladrillos), concreto y pavimentos que pueden destinarse a la elaboración de productos secundarios (Aguilar, 1997).

Con respecto al último inciso, este proceso de reciclaje busca la obtención de nuevos áridos que puedan reintegrarse a la cadena productiva para la fabricación de concreto, rellenos, ladrillos, entre otros. Generalmente se necesita que estos residuos se encuentren libres de acero, madera, vidrio, cal, etc., lo cual nos remonta al inicio de este apartado donde se establece la importancia de la correcta separación de los mismos (Aguilar, 1997).

Hoy en día existen plantas de tratamiento y reciclaje de escombros, mejor conocidos como cascajo. La tecnología que se utiliza se compone de un tren de tratamiento donde la primera fase es de preclasificación de materiales, seguida de la trituración y finalmente otra clasificación de acuerdo a la granulometría del producto de salida. Con esto se busca obtener un producto similar a los agregados que utiliza la industria de la construcción, lo cual no solo representa una ventaja ambiental, sino también económica puesto que evita la sobreexplotación de las materias primas (Bravo, 2010).

3.3.1. Escenario en México

La Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) presentó una estimación de generación de RCD para el año 2018 a nivel nacional, siendo esta de 9.2 millones de Tn/año (CMIC, 2013) dando como resultado una generación diaria de aproximadamente 25,000 Tn/día. Por otra parte la Ciudad de México en 2019 reportó una generación diaria de Residuos de la Construcción de 14,000 Tn/día, de las cuales sólo se reciclan 206 Tn (SEDEMA, 2019).

En términos de normativa existen diversos instrumentos legales para la regulación de estos residuos. La principal es la ya antes mencionada LGPGIR, donde se establecen las bases para la gestión de los diferentes tipos de residuos, además de su clasificación y las atribuciones a cada una de las autoridades. Por otra parte la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 “establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están

sujetos a Plan de Manejo”; y finalmente como Norma Estatal existe la NADF-007-RNAT-2004, la cual es la Norma Ambiental para el Distrito Federal, hoy Ciudad de México, que “establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción y demolición”. Gracias a este marco normativo se puede observar que la legislación de los RCD va desde lo general hasta lo particular con el fin de llevar a cabo una correcta gestión de los mismos.

Con base en esto es que, de igual manera la CMIC, desarrolló un Plan de Manejo para los Residuos de la Construcción y Demolición con la intención de que este sirviera como base para todas las obras realizadas a nivel nacional; puesto que este plan busca promover una correcta gestión de los RCD se plantean diversas estrategias para lograr el aprovechamiento de los mismos.

Para poder plantear propuestas que busquen la valorización de estos residuos, es necesario conocer la situación en la que se encuentra el esquema de gestión de los mismos, o dicho de otra forma, su ciclo de vida. Con respecto a los residuos provenientes de elementos de concreto, se estima que sólo el 20% es enviado a algún centro de reciclaje pero sólo el 2% es utilizado en obras nuevas, mientras que el 80% restante de estos es enviado a sitios de disposición final (CMIC, 2013). Este ciclo se puede entender mejor a través de la Figura 3.3

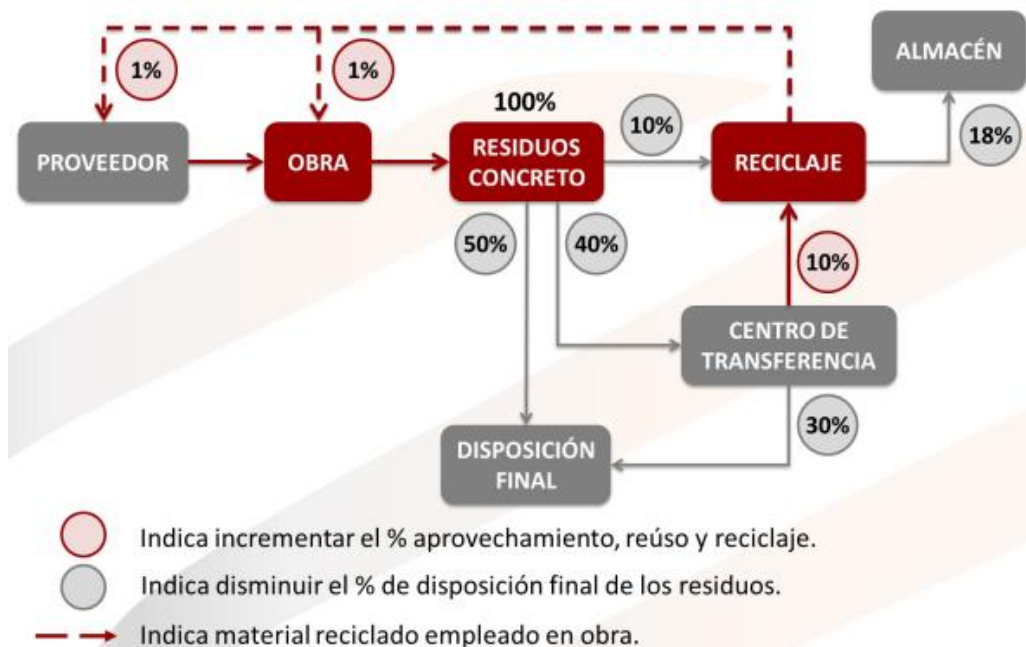


Figura 3.3 Ciclo de vida de residuos de concreto. Fuente: (CMIC, 2013)

Con la intención de mejorar estos números se han investigado posibles aplicaciones que se les pueda dar a los RCD de acuerdo a su clasificación, para esto, se presentan la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3 que de acuerdo a dos consideraciones diferentes de clasificación, exponen los usos que pueden tener.

Capítulo 3 Reciclaje de Residuos de la Construcción y Demolición

Tabla 3.2 . Identificación de usos propuestos de los RCD

RESIDUO	MATERIAL RECICLADO	APLICACIÓN
Escombros mezclados de concretos y morteros	Agregado reciclado	<ul style="list-style-type: none"> • Bases hidráulicas en caminos y estacionamientos • Concretos hidráulicos
Fresado de carpetas asfálticas	Mezclas material asfáltico	<ul style="list-style-type: none"> • Bases asfálticas o negras • Asfaltos calientes, templados y fríos • Carreteras
Escombros mezclados	Material firme	Terraplenes
	Arena reciclada	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura de rellenos, sustituto de tepetate • Fabricación de blocks, tabiques, adocretos, adopastos, losetas, postes, bordillos, guarniciones
	Agregados finos	Andadores y ciclo pistas
	Agregados reciclados	<ul style="list-style-type: none"> • Camas de tuberías, acostillamiento y relleno • Relleno de cimentaciones • Pedraplenes • Rellenos de azoteas y jardineras • Conformación de terrenos
Residuos de concreto	Grava y arena reciclada	<ul style="list-style-type: none"> • Guarniciones y banquetas • Firmes de concreto • Construcción de muros
Carpetas hidráulicas	Reciclado en frío	Base hidráulica y base negra

Fuente: (CMIC, 2013)

Tabla 3.3 Clasificación de los residuos de la construcción y demolición y su posible reúso

TIPO DE RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	POSIBLE REÚSO *
A. PROVENIENTES DE CONCRETOS HIDRÁULICOS Y MORTEROS	
<ul style="list-style-type: none"> • Elementos prefabricados • Elementos estructurales y no estructurales • Sobrantes de concreto en obra y premezclado 	<ul style="list-style-type: none"> • Bases Hidráulicas en caminos y estacionamientos. • Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones. • Elaboración de productos prefabricados (Blocks, tabiques, adocretos, adopastos, losetas, guarniciones, bordillos, postes de cemento-arena). • Bases para ciclopistas, firmes, guarniciones y banquetas. • Construcción de Andadores y trotapistas. • Sub-bases en caminos y estacionamientos. • Construcción de terraplenes. • Construcción de pedraplenes. • Material para relleno o para la elaboración de suelo – cemento. • Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno total de cepas. • Material para la conformación de terrenos. • Rellenos en cimentaciones. • Mobiliario urbano. • Construcción de muros divisorios.
B. MEZCLADOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Concretos hidráulicos • Morteros • Blocks • Tabicones • Adoquines • Tubos de albañal • Cerámicos • Mamposterías • Prefabricados de arcilla recocida (Tabiques, ladrillos, etc.) • Piedra braza • Agregados pétreos 	<ul style="list-style-type: none"> • Sub-bases en caminos y estacionamientos. • Construcción de terraplenes. • Cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios. • Construcción de andadores y trotapistas. • Bases para ciclopistas, firmes, guarniciones y banquetas. • Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas. • Construcción de pedraplenes. • Material para la conformación de terrenos** • Relleno en jardineras. • Rellenos en cimentaciones.

C. PROVENIENTES DE FRESADO DE CONCRETO ASFÁLTICO	
<ul style="list-style-type: none"> • Carpeta asfáltica • Bases negras 	<ul style="list-style-type: none"> • Bases asfálticas o negras. • Concretos asfálticos elaborados en caliente. • Concretos asfálticos templados o tibios. • Concretos asfálticos elaborados en frío,
D. RESIDUOS DE EXCAVACIÓN	
Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales contenidos en ellos.	Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje.
E. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Papel y Cartón • Madera • Metales • Plástico • Residuos de podas, tala y jardinería. • Vidrio • Papel y Cartón • Madera 	Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje.
F. OTROS	
Residuos de Impermeabilizantes, tablaroca, instalaciones eléctricas, asbesto, tubería, herrería, lodos bentoníticos	Deberá privilegiarse su reciclaje.
<p>* Para ser incluidos en el proyecto ejecutivo de la obra.</p> <p>** En ningún caso se utilizará en suelos de conservación, áreas naturales protegidas, áreas de valor ambiental, de y zonas de recarga de mantos acuíferos.</p>	

Fuente: (SEDEMA, 2015)

Además de los listados de posibles aplicaciones, también se generaron estrategias (Tabla 3.4) para los diferentes agentes que participan en la industria de la construcción con las cuales se pueda incrementar el volumen de residuos reusados ya sea dentro de la misma obra o fuera de ésta. Además, SEMARNAT impulsó la plataforma virtual llamada “Simbiosis Industrial”, la cual pretende generar nuevos mercados mediante el intercambio de residuos entre empresas e industrias como se muestra en la Figura 3.4 (CMIC, 2013).

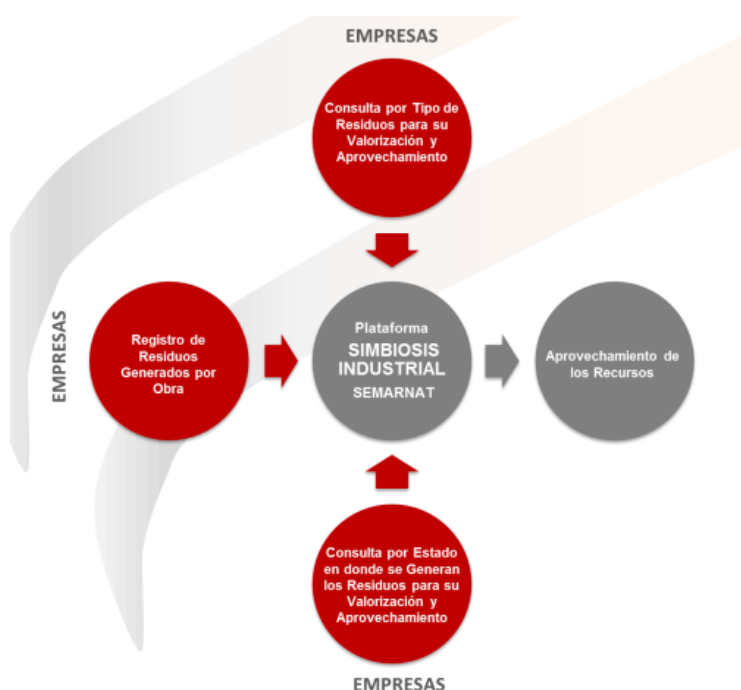


Figura 3.4 Simbiosis Industrial. Fuente: (CMIC, 2013)

Tabla 3.4 Acciones necesarias para incrementar el volumen de residuos reusados

ESTRATEGIAS	METAS	RESPONSABLES
Generar la demanda de materiales reciclados o de reúso tanto en las obras privadas como en las dependencias públicas ejecutoras de obra, además de incidir en la incorporación de este tema como un requisito desde el proyecto ejecutivo.	Procurar acuerdos con el propietario de la obra, que permitan aplicar prácticas de reutilización y reciclaje en el proceso de la misma, asegurando la calidad, la vida útil y la viabilidad económica de la misma.	Empresas Constructoras
	Reusar y reciclar los RCD en medida que el proyecto o la obra lo permita y con forme a la planeación de la misma, considerando las recomendaciones en la Tabla 3.2..	Empresas Constructoras
	Promover en el mayor número posible de licitaciones de obra pública a nivel federal y estatal, así como en reglamentos de construcción locales, que incorporen en sus requerimientos reutilización y reciclaje.	Secretarías de Medio Ambiente de los Estados / SEMARNAT / CMIC
	Empleo de la plataforma “Simbiosis Industrial” para el intercambio de residuos vía internet en la que participen generadores de residuos y empresas que puedan aprovecharlos convirtiéndolos en insumos.	Empresas Constructoras

Impulsar la oferta suficiente de plantas de reciclaje a nivel nacional.	Conformar un directorio de las plantas de reciclaje formales existentes a nivel nacional.	Secretarías de Medio Ambiente de los Estados
	Promover el mayor número de plantas de reciclaje que atiendan la demanda generada por la aplicación y supervisión del PM-RCD.	Secretarías de Medio Ambiente de los Estados / CMIC
	Elaborar un documento de acreditación con las especificaciones que se deban cumplir para operar como planta de reciclaje formalmente establecida. Así como un directorio de las plantas existentes a nivel nacional. Responsable: Secretarías de Medio Ambiente de los Estados	Secretarías de Medio Ambiente de los Estados
Establecer especificaciones técnicas mínimas de cumplimiento para el reúso de materiales y empleo de materiales reciclados.	Con el propósito de fomentar la reutilización y reciclaje de materiales, deben elaborarse especificaciones técnicas que garanticen la calidad, resistencia y viabilidad económica, en los procesos de construcción que por sus características lo permitan.	Cámaras, Asociaciones, Colegios, Academia / Entidad Normativa Correspondiente

Fuente: (CMIC, 2013)

Por otra parte, en temas de infraestructura de reciclaje en la Ciudad de México, la planta de Concretos Reciclados se verá complementada con 6 nuevas Plantas de Tratamiento y Aprovechamiento de Residuos de la Construcción con apoyo del gobierno capitalino, con las cuales se busca contribuir al alcance de los objetivos del programa “Basura Cero” de la Ciudad. La primera de estas fue implantada en la alcaldía Miguel Hidalgo a través de la Convocatoria CPTAR’s 2019 lanzada por la SEDEMA, dando como resultado el Centro Integral de Reciclaje (CIREC-MH), el cual tiene una capacidad para procesar al día 1,200 toneladas de residuos mezclados de la construcción y 2,200 toneladas de residuos limpios, con lo que se tiene el potencial de producir 640 m³ de concreto hidráulico (Gobierno de la Ciudad de México, 2021).

Con base en esto es que se puede afirmar que la Ciudad de México es una de las entidades federativas con mayor interés en mejorar la gestión de los RCD, con un enfoque hacia el aprovechamiento y la valorización de los mismos.

Capítulo 4 Geopolímeros en la construcción

A medida que la población siga aumentando, la demanda de vivienda se comportará de la misma manera. Como se mencionó anteriormente, hoy en día el material de construcción más utilizado a nivel mundial es el concreto, por lo que la fabricación de cemento sigue siendo indispensable para dar abasto a esta demanda, para lo cual no sólo se requiere de grandes cantidades de recursos materiales y energéticos, sino que continúa contribuyendo a una constante y exorbitante emisión de Gases de Efecto Invernadero. Es por esto que es necesario empezar a tomar acción en este campo si es que se quiere lograr un cambio verdadero, por una parte el reciclaje de los RCD reduce la extracción de recursos naturales y la producción de nuevos materiales, pero como aún no es una práctica común se tienen que buscar otras alternativas. Una de estas es la investigación y desarrollo de nuevos materiales que puedan ser utilizados para la fabricación de concreto pero que representen un menor impacto ambiental, esto sin reducir sus propiedades físicas y mecánicas, por lo que el estudio de la utilización de geopolímeros como agentes cementantes ha tomado relevancia en los últimos años.

4.1. ¿Qué son?

En la década de los 70's el científico Joseph Davidovits presentó por primera vez el término de geopolímero con el cual buscaba nombrar a los polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos provenientes de la geopolimerización; esta expresión hace referencia a “la reacción química que se produce al mezclar aluminosilicatos con activadores alcalinos concentrados (comúnmente hidróxidos y/o silicatos alcalinos) con lo cual se obtiene una nueva red molecular polimérica formando estos nuevos materiales denominados geopolímeros” (Davidovits, 2020). Por otro lado también se definen como “polímeros inorgánicos formados por unidades tetraédricas de aluminio y silicio condensadas a temperatura ambiente, que resultan de la disolución de materias primas selectas en presencia de soluciones con pH elevado” (Burciaga, Escalante, & Magallanes, 2015). A partir de los materiales utilizados para su fabricación, los tipos de geopolímeros más estudiados son a base de cenizas volantes, escorias de alto horno, metacaolín y otras materias primas ricas en aluminosilicatos, es decir materiales ricos en alúmina (Al_2O_3 , óxido de aluminio) y sílice (SiO_2 , óxido de silicio) (Calderón Peñafiel, 2018).



Figura 4.1
Componentes
básicos de un
geopolímero.
Fuente: (Arias &
Gómez, 2021)

Con base en el párrafo anterior, podemos notar que los materiales para producir geopolímeros pueden ser desechos industriales y/o arcillas naturales, lo cual genera una alternativa para el aprovechamiento de este tipo de residuos, dando como resultado un nuevo material que al incrementar los iones alcalinos en su mezcla, balancea las cargas eléctricas de la estructura adquiriendo propiedades cementantes que fraguan y endurecen en condiciones normales de temperatura ambiente (Burciaga, Escalante, & Magallanes, 2015), además de presentar características sobresalientes en cuanto a su resistencia mecánica, resistencia al fuego y resistencia a agentes corrosivos (Calderón Peñafiel, 2018).

4.2.Presencia en la construcción

A partir de los diversos estudios y experimentos que prueban que los geopolímeros son un material con propiedades cementantes y de resistencia mecánica, se ha buscado ponerlos a prueba en la industria de la construcción, como una alternativa capaz de sustituir al comúnmente utilizado Cemento Portland (CP), ya que de cumplir con las expectativas esperadas, este podría representar una solución al problema de emisiones de las cementeras puesto que es un material mucho más amigable con el medio ambiente.

La principal ventaja que presentan los geopolímeros frente al Cemento Portland es que a diferencia de este último, no se emplea carbonato de calcio, por lo que el proceso de descarbonatación de la caliza desaparece, además estos se procesan a 750°C en comparación con los 1450°C necesarios para producir el cemento; esto se refleja en una disminución de aproximadamente 80% de emisiones ambientales (Muñiz, Gasca, Manzano, & Rubio, 2011). Además de esto, el hecho de que se pueda incorporar a su fabricación desechos industriales como cenizas de plantas termoeléctricas y escorias metalúrgicas que no requieren procesamiento térmico, resulta en un ahorro de energía de hasta un 50%, ayudando a preservar los recursos naturales y disminuir la cantidad de desechos dispuestos en rellenos sanitarios (Muñiz, Gasca, Manzano, & Rubio, 2011).

En la Figura 4.2 se puede observar de manera sencilla y esquematizada la diferencia entre los procesos de producción del concreto a base de cemento y el concreto geopolimérico. Inicialmente para la fabricación del concreto “común” es necesario utilizar agua, cemento, que involucra extracción de materia prima y contaminación en su proceso de producción, y los áridos, que de igual forma representan extracción de materia prima; por otra parte el concreto polimérico a pesar de necesitar agua de igual forma, el agregado cementante es obtenido de residuos industriales, disminuyendo así las emisiones por producción y evitando la extracción de nueva materia prima, al igual que con los áridos, que buscan ser obtenidos a partir del reciclaje de los RCDs. Estas consideraciones dan como resultado no solo el producto final terminado, concreto, pero de acuerdo a cada una de ellas, las emisiones de CO₂ son considerablemente distintas en proporciones, tal como se ilustra en la Figura 4.2.

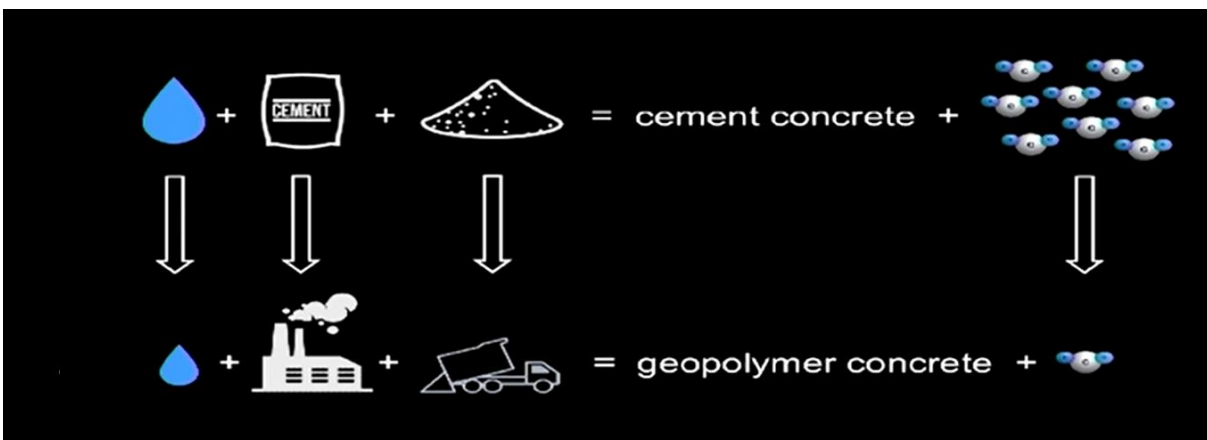


Figura 4.2 Diferencia en los procesos de producción. Fuente: (Hyde, 2018)

A pesar de que este nuevo concreto tiene el potencial para remplazar al concreto de CP, aún es necesario consolidar una cadena de suministro eficiente de las materias primas al igual que una red de distribución competitiva para los productos (Martínez, 2022).

Finalmente es importante mencionar que los geopolímeros no solamente pueden figurar dentro de la producción de cemento, sino que debido a su baja conductividad térmica pueden utilizarse como materiales aislantes en construcciones y recubrimientos térmicos, además de participar en la elaboración de cerámicos, e incluso pueden ser mezclados con fibras o aerogeles para ser más ligeros y utilizarse en recubrimientos que requieran menos peso (Martínez, 2022).

4.3.Casos de aplicación

Puesto que el uso de geopolímeros dentro de la construcción sigue siendo un tema relativamente nuevo, aún se continúa estudiando su comportamiento, propiedades físicas y la metodología necesaria para incorporarlo a la producción de concreto, además de experimentar con los diferentes tipos de materiales base para estos. Con base en esto se han encontrado algunos casos de aplicación que permitan ejemplificar mejor esta investigación, pero sobre todo que ayuden a presentar el panorama actual respecto a la presencia de geopolímeros en la industria de la construcción.

4.3.1. Metacaolín

Esta investigación busca evaluar la estabilidad estructural de pastas geopoliméricas a base de metacaolín que han sido expuestas a altas temperaturas. Debido a que en la innovación de materiales para uso en la construcción es indispensable garantizar la seguridad humana en caso de incendio, el estudio presenta los resultados obtenidos de resistencia a la compresión y evolución microestructural de este geopolímero en condiciones similares. Para esto se elaboraron pastas

utilizando un mineral de caolín de alta pureza con tamaño promedio de partícula (d_{50}) de $7.64 \mu\text{m}$, este polvo se mezcló con soluciones alcalinas de silicato de sodio e hidróxido de sodio durante 3 min y se vaciaron en probetas para después ser curadas por 28 días (Burciaga, Escalante, & Magallanes, 2015).

Para realizar los ensayos, se expusieron las probetas a temperaturas de 200, 500 y 800°C , en un horno durante 15 min, para después enfriarse otros 15 min, esto se consideró como un ciclo completo y se completaron 3 ciclos para cada formulación sometida a cada temperatura. Posteriormente, la estabilidad térmica de las formulaciones se determinó caracterizando las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión (RC), esto con el objetivo de analizar el potencial de uso de las pastas como material refractario. Los resultados muestran que independientemente de la composición química y contenido de agua, los geopolímeros evaluados presentan valores de $\text{RC} > 40 \text{ MPa}$ (Burciaga, Escalante, & Magallanes, 2015).

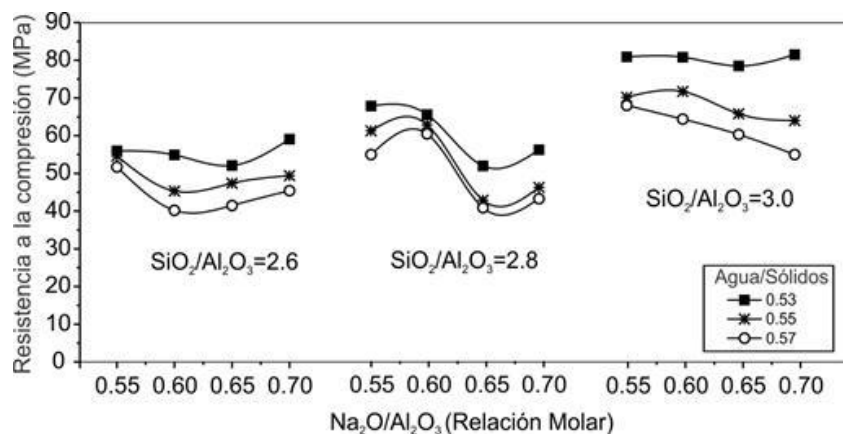


Figura 4.3 RC a 28 días de muestras de geopolímero como una función de las relaciones molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ y la relación agua/sólidos. Fuente: (Burciaga, Escalante, & Magallanes, 2015)

4.3.2. Ceniza volante y piedra pómez

Este trabajo señala la problemática ambiental que hoy en día representa la industria cementera debido a la gran emisión de gases de efecto invernadero que se generan en su producción. Con base en esto, la búsqueda de agentes cementantes alternativos, llevó a analizar su comportamiento y resistencia, obteniendo así los resultados que se muestran en la Figura 4.4 al adicionar un geopolímero derivado de una fase mineral (ceniza volante y piedra pómez) en la mezcla de concreto. La geopolimerización se realizó a partir de la activación alcalina de los aluminosilicatos, siendo estos agentes alcalinos, hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3). Los geopolímeros obtenidos fueron caracterizados por espectroscopia de infrarrojo (IR) y difracción de rayos X (DRX). Posteriormente se adicionó al concreto el geopolímero sustituyendo al agregado fino y las probetas obtenidas se analizaron mecánicamente, determinando su resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días. Los resultados del geopolímero a base de piedra pómez (GP) y el geopolímero a base de ceniza volante (GC), se compararon con la mezcla de Cemento Portland,

observando así las características cementantes de los geopolímeros (González, Montaña, & Castro, 2012).

Días Concreto	7	14	28
CP	196,9	221,8	319,15
GC	6	31,65	48,7
GP	11,85	22,6	34,4

Figura 4.4 Resistencia de los concretos CP, GC y GP. Fuente: (González, Montaña, & Castro, 2012)

4.3.3. Escoria de alto horno y metacaolín

A través del método de Taguchi esta tesis buscó diseñar experimentos para optimizar la resistencia la compresión de un cemento geopolimérico (CGP), con base escoria de alto horno (EAH) y metacaolín (MK), activado con hidróxido de sodio, sin silicato alcalino. Para esto se evaluaron nueve fórmulas, variando diferentes factores como tamaño de partícula tiempo de reacción por molienda, temperatura y humedad de curado y para medir la RC se llevaron a cabo ensayos de compresión bajo la norma ASTM C-39 (Vázquez Soto, 2019).

El análisis estadístico (método de Taguchi), mostró que los factores que mayor influyen sobre la resistencia a la compresión son el porcentaje másico de EAH y la temperatura y humedad de curado. De igual forma, se determinó que el cemento geopolimérico con la resistencia a la compresión máxima (óptima) será el que tenga la combinación de factores siguiente: 50 % m/m de EAH, 45 μ m de tamaño de partícula, tiempo de reacción por molienda de 7 min y una temperatura de 70 °C con 95 % HR en el curado; con estas condiciones se calculó una RC estimada de 31.24 MPa (Vázquez Soto, 2019).

				Factores (variables)					Respuesta	
No. de corrida	Relación Si:Al	Relación L/S	Tiempo de precurado (días)	EAH (% m/m)	Tamaño de partícula de EAH (μ m)	Tiempo de reacción (min)	Temperatura de curado (°C)	Humedad relativa de curado (%)	Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
CGP 1	2	0.42	3	25	45	5	50	85	7	3.32
CGP 2	2	0.35	3	50	75	10	50	85	7	12.10
CGP 3	2	0.25	3	75	150	7	50	85	7	4.95
CGP 4	2	0.42	3	25	75	7	60	90	7	3.23
CGP 5	2	0.35	3	50	150	5	60	90	7	9.69
CGP 6	2	0.25	3	75	45	10	60	90	7	8.31
CGP 7	2	0.42	3	25	150	10	70	95	7	9.23
CGP 8	2	0.35	3	50	45	7	70	95	7	31.24
CGP 9	2	0.25	3	75	75	5	70	95	7	10.49

Figura 4.5 Resultados del ensayo de RC para cada corrida experimental. Fuente: (Vázquez Soto, 2019)

Capítulo 5 Normatividad para materiales reciclados en la construcción

Como en cualquier industria, en la construcción también es necesario mantener en continua actualización la normativa que la rige de acuerdo a los cambios de circunstancias en la región de aplicación, así como tratar de estar al día con los avances tecnológicos que se vayan teniendo en ese campo. Un ejemplo de esto es la imposición de reducción de emisiones de CO₂ a las cementeras, lo cual de manera directa, propicia una búsqueda de alternativas para poder cumplir con estas obligaciones. Como se ha visto a lo largo de este trabajo, una de las principales soluciones para alcanzar este objetivo es el reciclaje de los Residuos de la Construcción y la Demolición, para lo cual es de esperarse que se vayan creando legislaciones que regulen y estandaricen su uso, con la finalidad de mantener la seguridad y calidad de la infraestructura generada.

Debido a que aún sigue siendo un tema relativamente nuevo, no todas las ciudades y/o países cuentan con leyes o normas que mencionen los requerimientos específicos no sólo para el reciclaje mismo de los residuos, sino para su inclusión dentro de las nuevas obras. Es por esto que muchas veces se tiene que tomar como referencia la normatividad del marco internacional, puesto que aún existen muchas interrogantes que de alguna u otra forma deben de ser solventadas.

5.1. Marco internacional

Uno de los países que además de contar con una amplia variedad de normas en materia de reciclaje de residuos, también es uno de los que más facilita el acceso a esta información es España. El país europeo cuenta con un “Catálogo de Residuos Utilizables en la Construcción” creado en 2002 y que se ha mantenido en constante actualización. En este catálogo podemos seleccionar el tipo de residuo de nuestro interés y nos desplegará las opciones para conocerlo más a fondo, desde los diferentes orígenes que este puede tener y las cantidades de generación específicas, hasta métodos de valorización y aspectos económicos; además existe un apartado donde se puede consultar toda la normativa aplicable a este residuo (CEDEX, s.f.).



Figura 5.1 Interfaz del Catálogo de Residuos del Gobierno de España. Fuente: (CEDEX, s.f.)

Tan sólo dentro de la normatividad aplicable a los RCDs en términos de capas de firmes de carreteras, podemos encontrar las siguientes normas:

- UNE-EN 12620:2003+A1:2009 “Áridos para hormigón”
- UNE-EN 13043:2003/AC:2004 “Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas”
- UNE-EN 13242:2003+A1:2008 “Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes”

En estas normas se definen como áridos reciclados a “aquellos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción”.

De igual forma, el gobierno español se ha apoyado de diversas fuentes internacionales para complementar la reglamentación actual del hormigón estructural, siendo algunas de estas las siguientes:

- JAPÓN:
 - "Standard for Usage of Concrete with Recycled Aggregate." Ministerio de la Construcción, 2005.
- ALEMANIA:
 - DIN 4226-100 (2002) “Aggregates for mortar and concrete - Part 100: Recycled aggregates”
 - DIN 1045 – Concrete. German code for the design of concrete structures.
- REINO UNIDO:
 - BS 8500-2:2006: “Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2: Specification for Constituent Materials and Concrete”.
- HOLANDA:
 - NEN 5905:1997 “Aggregates for concrete. Materials with a density of at least 2000 kg/m”

Finalmente, también existe normativa española de cumplimiento obligado relativa a los áridos para morteros, siendo las siguientes algunas de estas:

- UNE-EN 13139:2003+AC:2004, “Áridos para morteros”
- UNE-EN 998-1:2010, “Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido”
- UNE-EN 998-2:2012, “Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería”
- UNE-EN 13055-1:2003+AC:2004, “Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado”

5.2. Situación en México

A pesar de que México cuenta con normatividad y documentación referente al manejo de los residuos y a su clasificación, donde podemos encontrar los requerimientos de gestión para los RCD (LGEEPA, LGPGIR,DBGIR), no existe un instrumento legal a nivel nacional que aborde el tema de reciclaje de los mismos. La única entidad que cuenta con legislación específica para los Residuos de la Construcción y Demolición es la Ciudad México, la cual tiene en vigor la norma ambiental NADF-007-RNAT-2013, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción y demolición, en el entonces Distrito Federal. El objetivo de esta norma es “establecer la clasificación y especificaciones de manejo de los residuos de la construcción y demolición para optimizar y fomentar su aprovechamiento y minimizar su disposición final inadecuada” (SEDEMA, 2015).

En esta norma podemos encontrar la clasificación de los generadores de residuos y sus respectivos requerimientos ambientales, de igual forma la Tabla 3.3 muestra su clasificación y posible reúso, así como las especificaciones técnicas para el manejo de los RCD, siendo este último apartado el relevante para esta sección del trabajo.

En la versión inicial de esta norma (2004), el inciso 7.5 abordaba el tema de aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición y establecía los siguientes requerimientos:

- 7.5.1 Para el aprovechamiento de los residuos de la construcción clasificados en la sección A de la Tabla 3.3, los generadores de residuos de la construcción que requieren presentar evaluación de impacto ambiental, aviso de demolición o informe preventivo, deben enviar a reciclaje por lo menos un 30% de estos residuos de la construcción durante el primer año de aplicación de la norma ambiental, incrementándose dicho porcentaje en un 15 % anual hasta llegar al 100 % como óptimo (SEDEMA, 2006).
- 7.5.2 Para el aprovechamiento de los residuos de la construcción clasificados en la sección B de la Tabla 3.3, los generadores de residuos de la construcción que requieren presentar

evaluación de impacto ambiental, aviso de demolición o informe preventivo deben reusar directamente en el sitio de generación al menos el 10% de los residuos generados, salvo que el interesado demuestre mediante estudios y pruebas en laboratorios acreditados un porcentaje diferente que garantice las especificaciones técnicas del proyecto, así como del correspondiente estudio costo-beneficio; debiendo indicar en el plan de manejo de residuos el reúso que se les dará a dichos residuos (SEDEMA, 2006).

Sin embargo la versión aprobada más actual (existe un proyecto de renovación de esta norma PROY-NADF-007-RNAT-2019) modifica este inciso, estableciendo nuevos requisitos donde ya no se hace mención de cantidades específicas para su reúso y reciclaje.

8.5.1. Los generadores de residuos de la construcción y demolición deberán reciclar o reusar in situ sus residuos o enviarlos a un centro autorizado, de acuerdo a lo señalado en la Tabla 3.3, con excepción de los incisos E y F. Lo anterior, siempre que no estén contaminados (SEDEMA, 2015).

8.5.2. Para el aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición de la Tabla 3.3, los generadores de residuos, deberán presentar el cálculo de los indicadores de manejo que son los siguientes: residuos reciclados en obra (RCo), residuos que se reciclará fuera de obra (RCa), material reusable (RU), residuos para disposición final (D) (SEDEMA, 2015).

8.5.3. Es obligatoria la incorporación en el proyecto ejecutivo de la obra de material reciclado y/o reusable para las obras públicas y privadas indicadas en la Tabla 5.1, siempre que exista en un radio de 20 km la disponibilidad del recurso.

Tabla 5.1 Obras públicas y privadas con incorporación de material reciclado.

AGREGADOS PÉTREOS CON CEMENTANTE	AGREGADOS PÉTREOS SIN CEMENTANTE
<ol style="list-style-type: none"> 1. Construcción de banquetas, guarniciones y bordillos. 2. Plantillas y firmes de concreto. 3. Elaboración de suelo cemento en rellenos especiales. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sub-rasantes, sub-bases y bases hidráulicas en estacionamientos y en la red secundaria de vialidades. 2. Construcción de ciclovías, ciclopistas, andadores y trotapistas. 3. Construcción de terraplenes y pedraplenes. 4. Restauración de espacios degradados. 5. Bases para banquetas. 6. Lechos, acostillamientos y relleno de tuberías Rellenos. 7. Conformación de parques, jardines y parterres. 8. Zanjias drenantes. 9. Traslados de obras diversas.

Fuente: (SEDEMA, 2015)

Como se puede observar, la normatividad a nivel nacional referente a este tema es deficiente, siendo la Ciudad de México la única entidad que cuenta con una norma específica para los RCD. Sin embargo, parece necesario complementar con medidas más específicas respecto a los porcentajes de reciclaje dentro de las obras, al igual que implementar sanciones o incentivos para que el reciclaje de los mismos se vuelva una realidad normada.

Capítulo 6 Propuesta del caso de estudio

6.1. Producción de concreto y mortero

Como se ha comentado a lo largo de este trabajo, el cemento es uno de los principales materiales dentro de la industria de la construcción puesto que es la base para la elaboración del concreto, elemento con el cual se fabrica generalmente la estructura de la edificación; de igual forma el cemento es empleado para la fabricación de mortero, el cual tiene presencia en los trabajos de mampostería y albañilería.

El concreto se puede definir como “un material inerte artificial, resultante de la combinación adecuada de cemento, agregados pétreos y agua” (Programa de Ingeniería Civil FES Acatlán, 2018). En términos de composición el cemento representa entre un 10% y 15% de la mezcla, siendo este el material de mayor costo e importancia puesto que al combinarse con el agua genera la pasta cementante capaz de aglutinar a los agregados pétreos en una mezcla homogénea. Por su parte los agregados pétreos (arena y grava) ocupan entre el 66% y 75% del volumen del concreto, los cuales deben cumplir con ciertas características para lograr un correcto proporcionamiento y por ende una mayor resistencia (Programa de Ingeniería Civil FES Acatlán, 2018).

Por otro lado el mortero se entiende como un material formado por la mezcla de cemento, arena y agua que adquiere una gran plasticidad, adherencia, trabajabilidad y resistencia a la compresión; es por esto que es utilizado para unir elementos de construcción (ladrillos, bloques de concreto, etc.) y también para recubrimientos exteriores o interiores de muros y trabajos de mampostería (CEMEX, 2015).

Con base en esto se puede observar que la principal diferencia entre ambos materiales es el uso o ausencia del agregado grueso (grava) el cual se caracteriza por aportar una gran parte de resistencia a la mezcla, siendo esta la razón de que el mortero no es utilizado para la elaboración de elementos estructurales.

Para la fabricación de ambos existen diferentes formas de proporcionamiento de acuerdo al propósito específico que tengan cada uno. Por ejemplo en la Figura 6.1 se definen las cantidades necesarias de cada elemento para fabricar concreto de acuerdo a su resistencia y aplicación.

CEMENTO (SACO)	AGUAS (BOTES)	ARENA (BOTES)	GRAVA (BOTES)	APLICACIÓN
1+ □	1 □	2 1/3 □□□	4 3/4 □□□□□	Grava 1-1/2" Alta resistencia f'c= 300 kg/cm² Grava 3/4"
1+ □	1 □	2 1/3 □□□	3 1/2 □□□□	
1+ □	1 1/3 □□	3 1/2 □□□□	5 1/2 □□□□□□	Grava 1-1/2" Columnas y techos f'c= 250 kg/cm² Grava 3/4"
1+ □	1 1/3 □□	3 □□□	4 □□□□	
1+ □	1 1/2 □□	4 □□□□	6 1/2 □□□□□□□	Grava 1-1/2" Losas y zapatas f'c= 200 kg/cm² Grava 3/4"
1+ □	1 1/2 □□	4 □□□□	5 □□□□□	
1+ □	1 3/4 □□	5 □□□□□	7 3/4 □□□□□□□□	Grava 1-1/2" Trabes y dalas f'c= 150 kg/cm² Grava 3/4"
1+ □	2 □	5 □□□□□	5 3/4 □□□□□□	
1+ □	2 1/4 □□□	6 1/3 □□□□□□□	9 □□□□□□□□□	Grava 1-1/2" Muros y pisos f'c= 100 kg/cm² Grava 3/4"
1+ □	2 1/4 □□□	6 1/2 □□□□□□□	7 □□□□□□□	

Figura 6.1 Proporcionamiento de mezcla de concreto. Fuente: (CEMEX, 2015)

Mientras que los morteros pueden clasificarse de acuerdo a su resistencia a la compresión como se muestra en la Tabla 6.1 y con base en esto definir su proporcionamiento, tal como se propone en la Tabla 6.2.

Tabla 6.1 Tipos de mortero y resistencia de diseño

TIPO DE MORTERO	RESISTENCIA PROMEDIO (*) A LA COMPRESIÓN f'_{cj} , MPA (KG/CM²)	RESISTENCIA MÍNIMA INDIVIDUAL A LA COMPRESIÓN f'_{cj} MIN, MPA (KG/CM²)
I	18 (180)	12.5 (125)
II	11 (110)	7.5 (75)
III	6 (60)	4 (40)

Fuente: (SMIE, 2014)

Tabla 6.2 Propuesta de proporcionamiento en volumen, recomendados para mortero dosificado en obra

TIPO DE MORTERO	CEMENTO HIDRÁULICO	CEMENTO DE ALBAÑILERÍA	CAL - HIDRATADA	ARENA
I	1	----	$\frac{1}{4}$	3 $\frac{1}{2}$
	1	$\frac{1}{2}$	----	4 $\frac{1}{2}$
II	1	----	$\frac{1}{2}$	4 $\frac{1}{2}$
	1	1	----	6

Fuente: (SMIE, 2014)

Es de acuerdo a este tipo de criterios que se diseñan diferentes mezclas tanto de concretos como de morteros con el uso de materiales reciclados que buscan sustituir en alguna proporción a los materiales vírgenes sin perder de vista la dosificación adecuada.

6.2.Revisión bibliográfica

En términos de estudios relacionados a la implementación de RCD reciclados y geopolímeros en la construcción, se puede encontrar que el campo más desarrollado es el de la producción de concreto a base de estos materiales, mientras que el uso de estos en productos como morteros o elementos de acabado no lo es tanto. Para tener un base sólida que ayude a desarrollar una propuesta alternativa para el uso de los mismos es necesario conocer qué materiales y métodos son los más recomendados y cómo se comportan en ciertas condiciones.

6.2.1. Residuos de la Construcción y Demolición

A continuación se presentan los materiales, metodología y resultados obtenidos por diferentes autores en sus trabajos.

Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas - Domínguez Lepe

Este estudio tiene por objetivo demostrar que los RCD son capaces de reincorporarse al ciclo de construcción, además de contribuir al conocimientos de estos en nuestro país y fomentar su uso; se expone la fabricación y caracterización de agregados, elementos constructivos y concretos simples reciclados.

Materiales

Los RCD utilizados en este trabajo se recolectaron en Chetumal, Quintana Roo, México, obteniendo 42 m³ de residuos de siete lugares distintos, con los cuales se produjeron 15 m³ de agregado fino, 5 m³ de gravilla y 12m³ de agregado grueso. A los agregados se les aplicaron las pruebas de laboratorio necesarias para determinar sus características físico-mecánicas, de igual forma se tomaron muestras de material natural, para realizarles los mismos estudios como punto de comparación y referencia (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007).

Metodología

La mezcla de concreto se diseñó para obtener resistencias a la compresión de 150, 200 y 250kg/cm², como concretos sin aire incluido, con un revenimiento de 8 a 10 cm y tamaño máximo de agregado de ¾” para los reciclados y 1” para los naturales. En la Tabla 6.3 se muestra el proporcionamiento para estas condiciones.

Tabla 6.3 Proporcionamiento para concretos con agregados reciclados y naturales.

MATERIAL (PARA 1m3)	RECICLADO - RESISTENCIAS DE DISEÑO kg/cm ²						NATURAL - RESISTENCIAS DE DISEÑO kg/cm ²					
	150		200		250		150		200		250	
Unidades	kg	l	kg	l	kg	l	kg	l	kg	l	kg	l
Cemento	250	227	286	260	323	294	244	222	279	254	315	286
Agregado fino	639	489	617	472	595	456	685	550	662	532	638	512
Agregado grueso	729	646	729	646	729	646	785	740	785	740	785	740
Agua	200	200	200	200	200	200	150	150	150	150	150	150

Fuente: (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007)

Con base en esto se elaboraron 6 especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, para cada resistencia y por cada tipo de material, probándolos a los 7, 14 y 28 días. Se utilizó cemento Pórtland tipo CPC-30R, que es el cemento que comúnmente se utiliza en la zona.

De igual manera se realizaron las pruebas de granulometría correspondientes al igual que la determinación de las características físico-mecánicas de los agregados.

Tabla 6.4 Características físico-mecánicas del agregado grueso

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA	UNIDAD	MATERIAL NATURAL	MATERIAL RECICLADO
Peso volumétrico seco y suelto	kg/m ³	1,061	1,129
Peso volumétrico seco y compacto	kg/m ³	1,138	1,176
Densidad	kg/l	2.03	1.99
Absorción	%	13.64	11.82
Abrasión	%	35.70	43.40

Fuente: (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007)

Tabla 6.5 Características físicas del agregado fino

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA	UNIDAD	MATERIAL NATURAL	MATERIAL RECICLADO
Peso volumétrico promedio seco y suelto	kg/m ³	1,245	1,306
Densidad	kg/l	2.10	1.91
Absorción	%	7.99	14.03
Módulo de finura	---	2.53	2.82

Fuente: (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007)

Tabla 6.6 Granulometría del agregado grueso

MALLA #	MATERIAL NATURAL QUE PASA %	MATERIAL RECICLADO QUE PASA %	ESPECIFICACIÓN ASTM C- 136 ¾" A #4
2"	100	100	0
1 ½"	100	100	0
1"	100	100	100
¾"	93	97	90-100
½"	35	54	0
⅜"	12	30	20-55
No. 4	10	21	0-15
No. 8	0	0	0-5

Fuente: (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007)

Tabla 6.7. Granulometría del agregado fino

MALLA #	MATERIAL NATURAL QUE PASA %	MATERIAL RECICLADO QUE PASA %	ESPECIFICACIÓN ASTM C- 136 ¾" A #4
¾"	100	100	100
No. 4	100	99	95-100
No. 8	86	77	80-100
No. 16	63	55	50-85
No. 30	44	38	25-60
No. 50	30	29	10-30
No. 100	24	20	2-10

Fuente: (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007)

Para la prueba de resistencia a la compresión se utilizó la norma ASTM-C39M-01 y para la preparación y cabeceo de los cilindros se utilizó la norma ASTM-C617-98.

Resultados

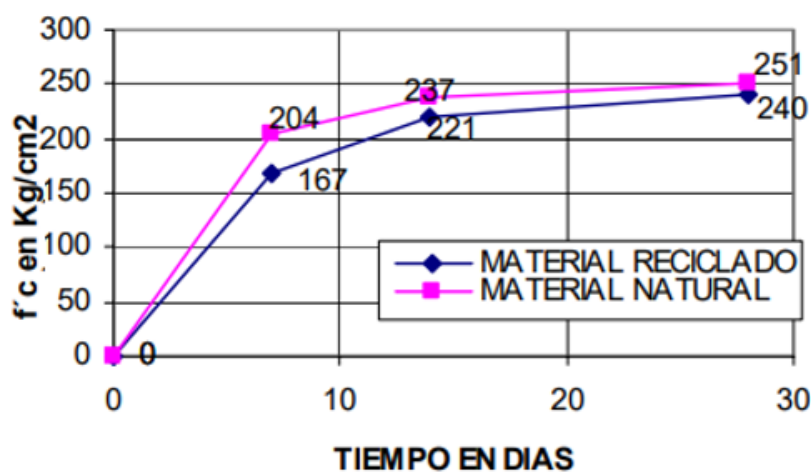


Figura 6.2 Resistencia a la compresión para concretos de 150 kg/cm² a 7, 14 y 28 días. Fuente: (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007)

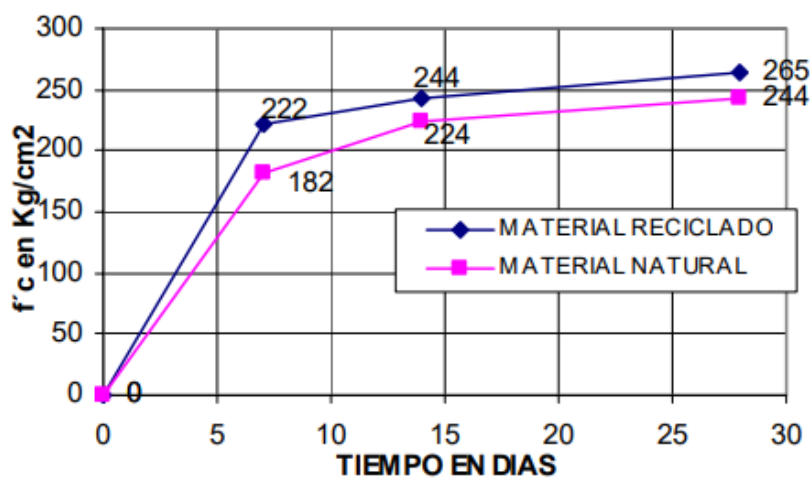


Figura 6.3 Resistencia a la compresión para concretos de 200 kg/cm² a 7, 14 y 28 días. Fuente: (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007)

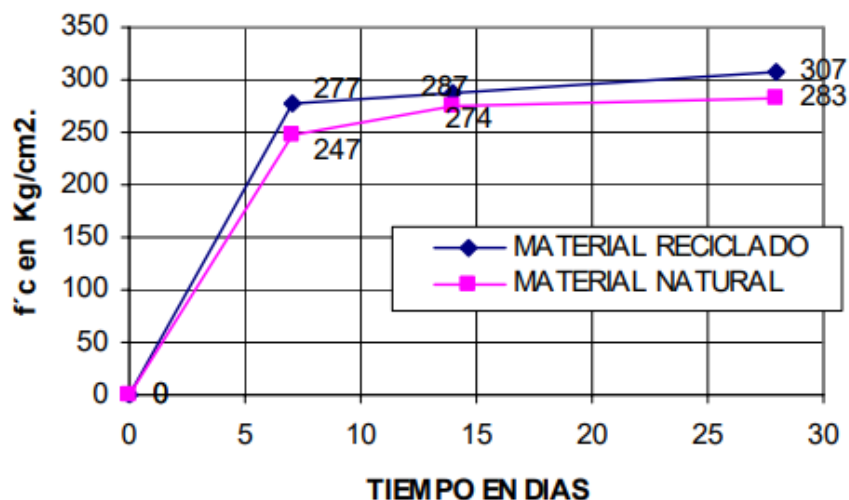


Figura 6.4 Resistencia a la compresión para concretos de 250 kg/cm² a 7, 14 y 28 días. Fuente: (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007)

Evaluación del uso de áridos reciclados de hormigón en la fabricación de hormigones autocompactantes y morteros de cemento – Martínez García

El objetivo de esta tesis es implementar áridos reciclados que provienen de RCD en la fabricación de concretos y morteros, buscando minimizar el impacto ambiental producido por estos residuos y contribuir a reducir la extracción de materia prima, sentando así un precedente para la economía circular en esta industria.

Concreto

Materiales

El cemento utilizado en la elaboración del concreto es de tipo CEM Tipo III/A. Para esta mezcla se hará uso de áridos gruesos reciclados de 4-12.5 mm procedentes de RCD de viejas estructuras de concreto suministrado por una empresa en la provincia de León, España, un árido fino 0-4 mm de naturaleza silícea y una grava natural de 4-12.5 mm de río y naturaleza silícea.

Metodología

Para los áridos se realizan las pruebas granulométricas necesarias obteniendo los siguientes resultados.

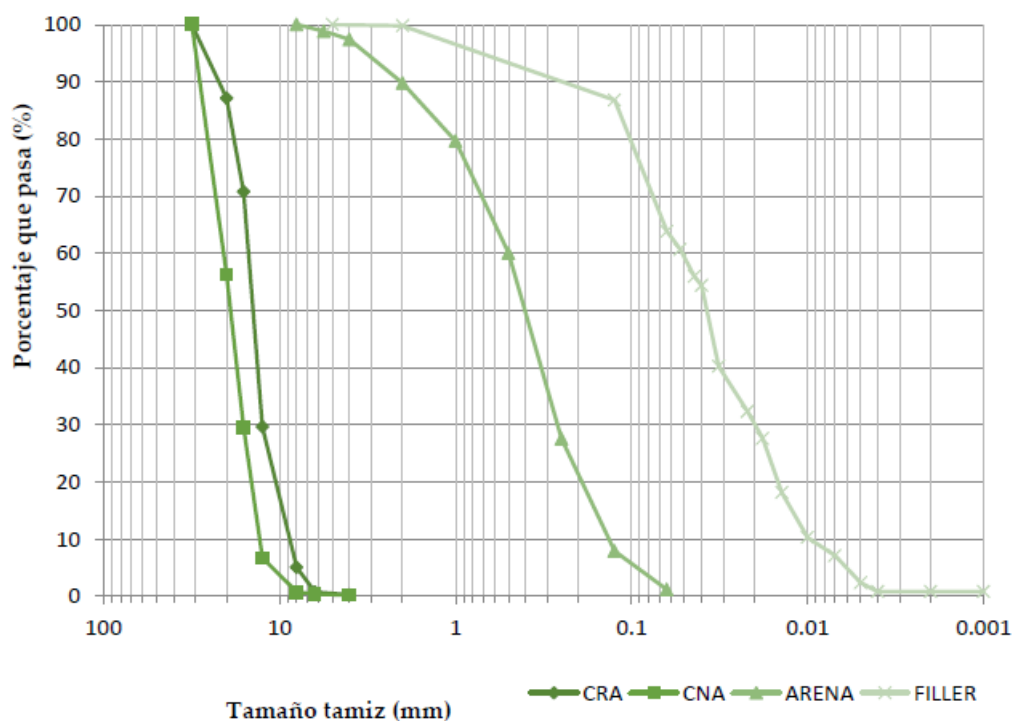


Figura 6.5 Distribución granulométrica de árido grueso reciclado (CRA), árido grueso natural (CNA), arena natural y filler. Fuente: (Martínez García, 2021)

Se elaboraron 4 mezclas con diferentes % de áridos reciclados tal como se muestra en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8 Proporción de áridos naturales y reciclados en las mezclas

Mezcla	Árido natural	Árido reciclado
CC	100%	0%
Mix 20	80%	20%
Mix 50	50%	50%
Mix 100	0%	100%

Fuente: (Martínez García, 2021)

Para las cuales se hizo un diseño de mezcla específico, dando como resultado los siguientes proporcionamientos.

Tabla 6.9 Dosificaciones (kg/m³)

MATERIAL	OPC ¹	CM 25 ²	CM 50 ³	CM 100 ⁴
Cemento (kg)	400	400	400	400
Filler (kg)	58	58	58	58
Agua (kg)	190	190	190	190
Arena (kg)	904	904	904	904
Grava natural (kg)	700	560	350	0
Grava reciclado (kg)	0	140	350	700
Superplastificante (kg)	0.8	1	1.2	1.35
Relación (A/C)	0.47	0.47	0.47	0.47

¹OPC= mortero de control; ²CM 25= mortero con 25% de árido fino reciclado; ³CM 50= mortero con 50% de árido fino reciclado; ⁴CM 100= mortero con 100% de árido reciclado

Fuente: (Martínez García, 2021)

Para fabricar la mezcla se hizo uso de una amasadora mecánica con la cual se produjeron muestras cilíndricas de 300x150 mm. Con estos especímenes se llevó a cabo la prueba de resistencia a la compresión según la norma española EN 12390-3: 2009 a los 7, 14 y 28 días de curado.

Resultados

La resistencia a la compresión del Mix 20 y Mix 50 es mayor que la de CC (muestra de control). Para el Mix 20 la resistencia es de 55.58 MPa, que es un 20% mayor que el CC (46.36 MPa), mientras que el valor promedio para el Mix 50 es un 18% más alto que para CC y para Mix 100 es un 5% menor que CC. Esta no conformidad puede deberse al hecho de que los áridos reciclados en la composición, contienen un alto contenido de hormigón que puede influir positivamente en el comportamiento mecánico (Martínez García, 2021).

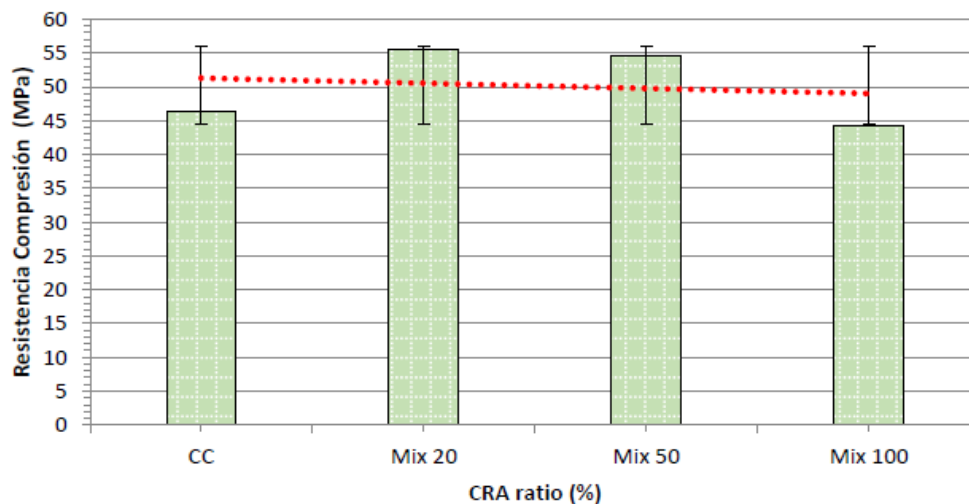


Figura 6.6 Resistencia a compresión. Fuente: (Martínez García, 2021)

Mortero

Materiales

Para el mortero de referencia se utilizó arena con un tamaño de partícula de 0.075 a 2 mm., mientras que el árido fino reciclado tiene un tamaño de partícula que varía de 0.08 a 2 mm sin preacondicionamiento. El cemento utilizado en esta investigación es CEM Tipo III

Metodología

De igual forma se llevaron a cabo las pruebas granulométricas necesarias para los áridos obteniendo los siguientes resultados.

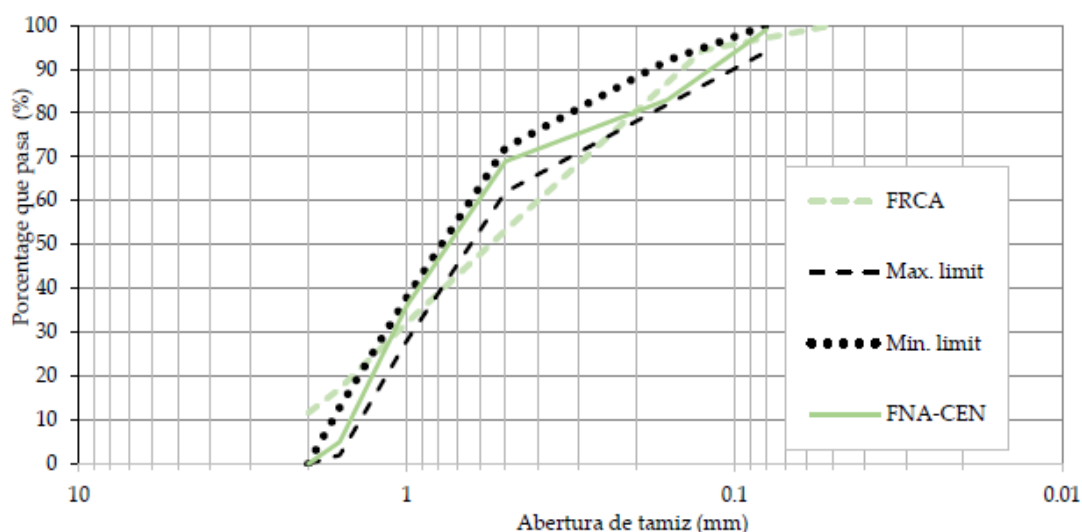


Figura 6.7 Distribución granulométrica del árido fino natural (FNA-CEN) y del árido fino de hormigón reciclado (FRCA).
Fuente: (Martínez García, 2021)

Posteriormente el árido reciclado se lavó con la finalidad de eliminar impurezas adheridas mejorando así su calidad.

De igual forma se elaboraron 4 mezclas con porcentajes de áridos reciclados diferentes (0%, 25%, 50% y 100%), pero la proporción volumétrica de cemento:arena se mantuvo constante, 1:3. La relación de agua para todas las mezclas se fue ajustando experimentalmente hasta garantizar una trabajabilidad adecuada y una consistencia fija de 134 ± 4 mm. Así la relación agua/cemento se fijó en: OPC= 0.42, CM 25%= 0.5, CM 50%= 0.54 y CM 100%= 0.62. Es así que se obtiene la Tabla 6.10 donde se establece el proporcionamiento adecuado.

Tabla 6.10 Dosificación (kg/m³).

COMPONENTE	OPC ¹	CM 25 ²	CM 50 ³	CM 100 ⁴
Cemento (kg)	450	450	450	450
Agua (kg)	189	225	243	279
Arena natural (kg)	1,350	1,012.5	675	0
Árido fino reciclado (kg)	0	337.5	675	1,350
Relación (A/C)	0.42	0.5	0.54	0.62
Consistencia	134	134	129.5	134.5
Densidad teórica (kg/m ³)	1,989	2,024.5	2,043	2,213.5

¹OPC= mortero de control; ²CM 25= mortero con 25% de árido fino reciclado; ³CM 50= mortero con 50% de árido fino reciclado; ⁴CM 100= mortero con 100% de árido reciclado

Fuente: (Martínez García, 2021)

La mezcla se llevó a cabo de manera mecánica y con esta se elaboraron probetas prismáticas de 40x40x160 mm, las cuales fueron desmoldadas tras 24 horas y colocadas en cámara de agua hasta las fechas de las pruebas, 7, 28 y 90 días.

Resultados

La resistencia a la compresión decrece a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo. Esto se puede atribuir al contenido de impurezas de los FRCA y a que poseen una mayor porosidad por lo tanto una menor resistencia a compresión. A medida que aumenta el porcentaje de sustitución de arena reciclada aumenta la demanda de agua principalmente producido por los residuos de cemento hidratado de la fracción fina. En consecuencia, con el aumento de sustitución de áridos reciclados la resistencia a compresión y flexión se ven perjudicadas (Martínez García, 2021).

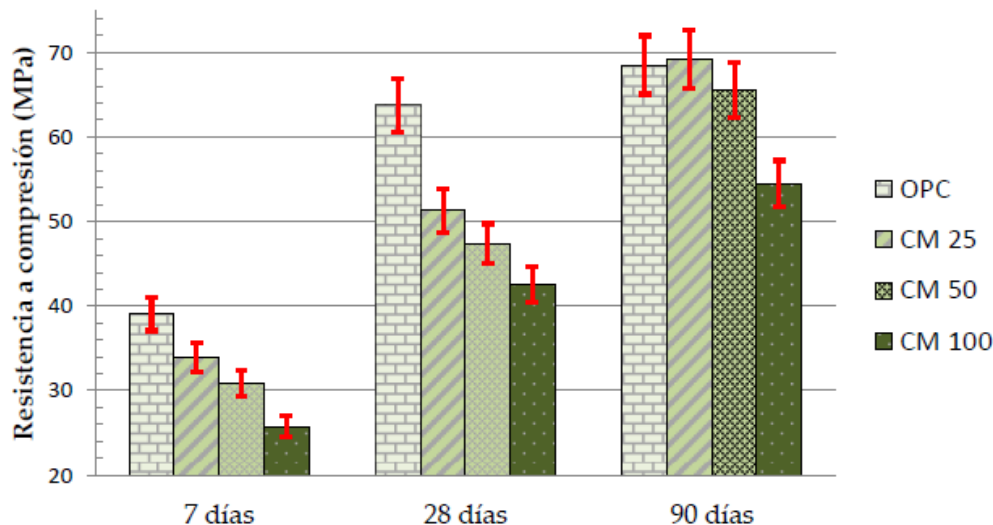


Figura 6.8
Resistencia a compresión a las edades de 7, 28 y 90 días. Fuente: (Martínez García, 2021)

Pruebas de resistencia y permeabilidad de residuos de la construcción y demolición para su utilización en la construcción de obras complementarias, operación y clausura de rellenos sanitarios en la zona metropolitana del Valle de México – López Andraca

Este trabajo busca determinar la factibilidad del reúso de los RCD en obras complementarias, operación y clausura de rellenos sanitarios en la Zona Metropolitana del Valle de México, mediante pruebas de laboratorio, como lo es la resistencia a la compresión de mezclas de concreto elaboradas con agregados vírgenes y reciclados (López Andraca, 2015).

Materiales

La empresa Concretos Reciclados proporcionó 1m³ de arena reciclada con un tamaño máximo nominal de 4.75 mm (no.4) y 1 m³ de grava reciclada tamaño máximo nominal de 19.05mm (3/4"). Por otra parte la arena y grava vírgenes fueron adquiridas en una casa de materiales convencional.

Metodología

Se realizó el análisis granulométrico para los agregados reciclados obteniendo las siguientes gráficas.

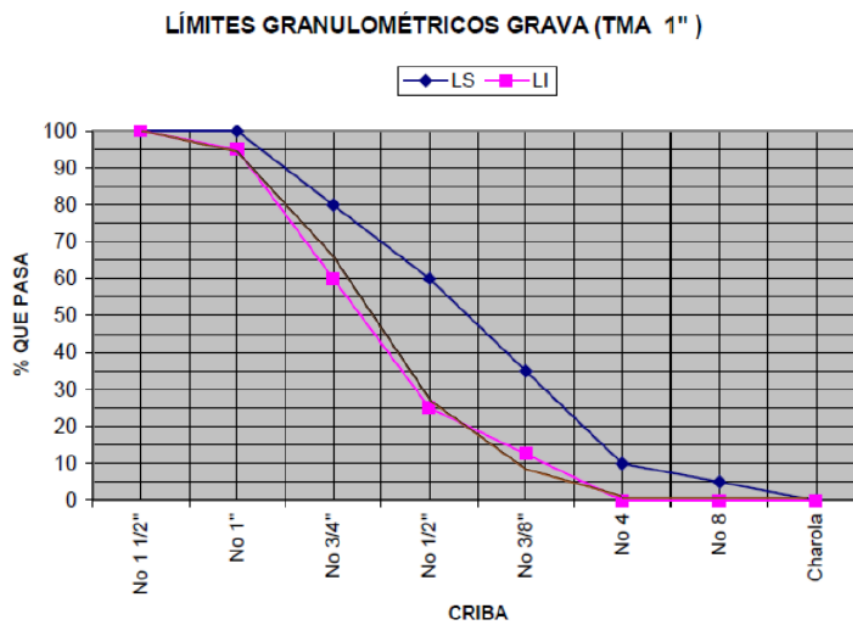


Figura 6.9 Gráfica de la grava reciclada vs límites granulométricos para una grava TMA 1". Fuente: (López Andraca, 2015)

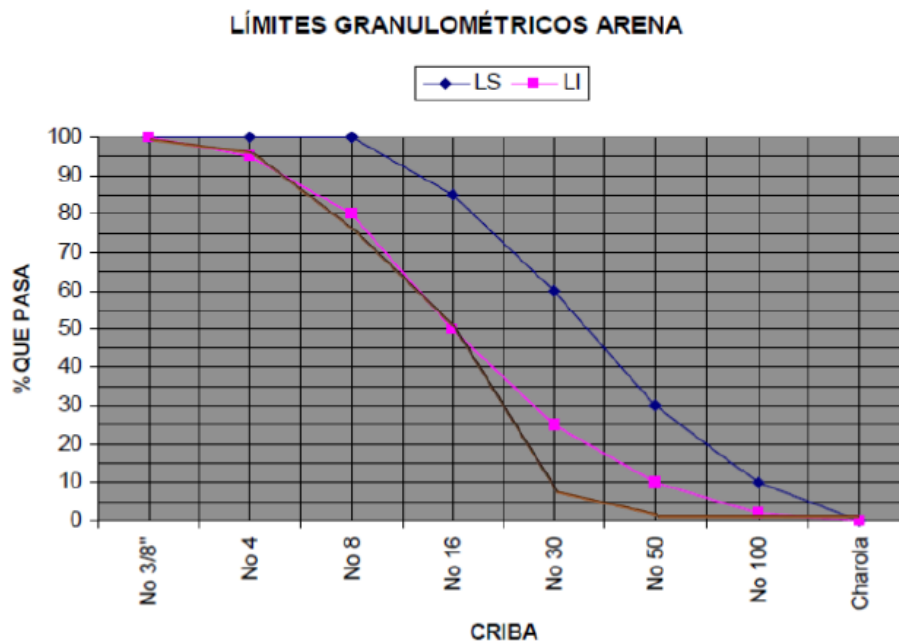


Figura 6.10 Gráfica de la arena reciclada vs límites granulométricos. Fuente: (López Andraca, 2015)

De acuerdo con las gráficas anteriores es posible determinar que la graduación de la grava es aceptable puesto que se encuentra dentro de los límites granulométricos, mientras que la arena reciclada no cumple con los límites establecidos.

Para este estudio se definieron 8 mezclas diferentes con la finalidad de conocer cuál es el porcentaje óptimo de materiales reciclados a utilizar.

- 100% agregados vírgenes
- 15% agregados reciclados y 85% agregados vírgenes
- 30% agregados reciclados y 70% agregados vírgenes
- 45% agregados reciclados y 55% agregados vírgenes
- 60% agregados reciclados y 40% agregados vírgenes
- 75% agregados reciclados y 25% agregados vírgenes
- 90% agregados reciclados y 10% agregados vírgenes
- 100% agregados reciclados

Con base en el Manual del Constructor de CEMEX (Tabla 6.11), se hizo un proporcionamiento teórico para alcanzar una resistencia mínima de 100 kg/cm².

Tabla 6.11 Proporcionamientos típicos de mezcla de concreto

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ($f'_c = \text{kg/cm}^2$)	100	150	200	250	300
Cemento (kg)	265	310	350	390	450
Grava (kg)	1000	1000	1000	1000	1000
Arena No. 4 (kg)	900	860	825	790	740
Agua (l)	205	205	205	205	205

Fuente: Elaboración a partir de (CEMEX, 2015)

De acuerdo a este proporcionamiento y al volumen requerido para la elaboración de 3 cilindros (150x300 mm) para cada mezcla, se obtuvo la siguiente dosificación:

- Cemento (kg): 4.636
- Grava (kg): 17.495
- Arena (kg): 15.745
- Agua (l): 3.586

Estos datos son específicos para la mezcla con 100% materiales vírgenes, por lo que se deberá calcular el % de material reciclado a utilizar en cada escenario.

La elaboración de las diferentes mezclas fue a través de medios manuales, obteniendo probetas cilíndricas de 150x300 mm, las cuales fueron descimbradas 24 hrs después de su vaciado y curadas durante 28 días en un cuarto húmedo.

La prueba de resistencia a la compresión simple se llevó a cabo de un marco de carga axial y se utilizaron almohadillas de neopreno para cabecar los cilindros, no sin antes determinar sus dimensiones y masa.

Resultados

Tabla 6.12 Promedios de resistencia a la compresión de los diferentes especímenes probados

% DE MATERIAL RECILADO	PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN f_c (kg/cm²)
0	278.07
100	109.45
15	245.80
30	223.97
45	203.65
60	163.28
75	124.15
90	90.41

Fuente: Elaboración a partir de (López Andraca, 2015)

6.2.2. Geopolímeros

En la sección 4.3 Casos de aplicación, se encuentran tanto los resultados como materiales y metodología utilizados en los diferentes estudios que buscan sustituir a los materiales cementantes por geopolímeros de acuerdo a su naturaleza.

6.2.3. Resumen

A continuación se presentan la Tabla 6.13 y la Tabla 6.14 donde se sintetizan los resultados obtenidos en términos de resistencia a la compresión de acuerdo a los materiales utilizados.

Tabla 6.13 Resumen de resultados de resistencia a la compresión de pruebas de mezclas utilizando agregados reciclados

AUTOR	PRUEBA	% MATERIAL RECICLADO	PROCEDENCIA	TIEMPO DE CURADO	RESISTENCIA (kg/cm ²)
Martínez García	Probetas de concreto	20	RCD viejas estructuras de concreto	28 días	555.8
		50			547.00
		100			440.42
		CC - 0			463.6
	Prismas de mortero	25			518.4
		50			480
		100			428.8
		CC - 0			640
Domínguez Lepe	Probetas de concreto	0	RCD obras cercanas	28 días	251
		100			240
		0			244
		100			265
		0			283
		100			307
López Andraca	Probetas de concreto	0	Concretos Reciclados	28 días	278.1
		100			109.45
		15			248.8
		30			223.9
		45			203.6
		60			163.3
		75			124.1
		90			90.4

Fuente: Elaboración a partir de los estudios descritos en el inciso 6.2.1 Residuos de la Construcción y Demolición

Para una mejor apreciación se ilustran de manera gráfica los resultados obtenidos por cada autor en la Figura 6.11, Figura 6.12y Figura 6.13.



Figura 6.11 Gráfica de resistencia a la compresión, Martínez García. Fuente: Elaboración a partir de (Martínez García, 2021)

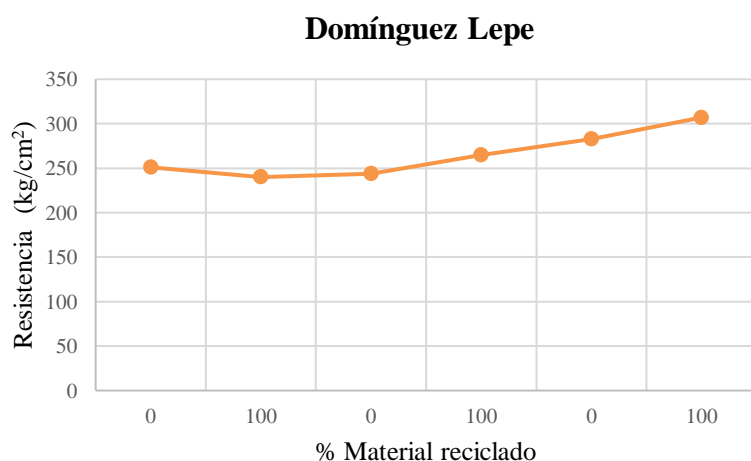


Figura 6.12 Gráfica de resistencia a la compresión, Domínguez Lepe. Fuente: Elaboración a partir de (Domínguez Lepe & Martínez L., 2007)

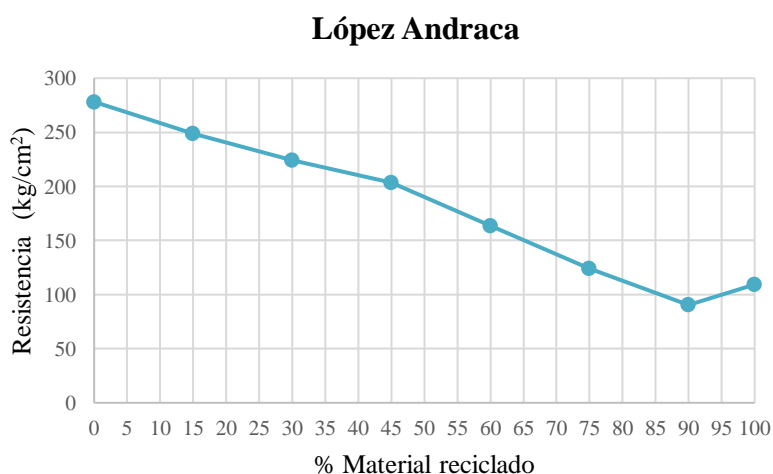


Figura 6.13 Gráfica de resistencia a la compresión, López Andraca. Fuente: Elaboración a partir de (López Andraca, 2015)

Tabla 6.14 Resumen de resultados de resistencia a la compresión de pruebas de mezclas utilizando geopolímeros

APLICACIÓN	TIPO DE GEOPOLIMERO	PROCEDENCIA	TIEMPO DE CURADO	RESISTENCIA (kg/cm²)
Probetas de concreto	CP	Residuos termoeléctrica	28 días	319.15
	Piedra pómez			48.70
	Ceniza volante			34.4
Probetas de concreto	Caolín		28 días	
	Sílice/Alúmina (2.6) – Caolín			620
	Sílice/Alúmina (2.8)			650
	Sílice/Alúmina (3.0)			810
Probetas de concreto	% escoria de alto horno	Reducción de mineral de hierro	7 días	
	25			33.2
	50			121
	75			49.5
	25			22.3
	50			96.9
	75			83.1
	25			82.3
	50			312.4
	75			104.9

Fuente: Elaboración a partir de los estudios descritos en el inciso 6.2.2 Geopolímeros

6.3.Propuesta final

Con base en el inciso 6.1 Producción de concreto y mortero, se seleccionó desarrollar la propuesta para un mortero Tipo II puesto que su resistencia mínima a la compresión es de 75 kg/cm², lo cual se considera apropiado puesto que el principal uso que se le propone dar a esta mezcla es el de recubrimiento de muros, siendo esto un material de acabado, por lo que no será sometido a cargas directas que requieran un mayor nivel de resistencia; de igual forma al ser un mortero cemento:arena, la relación de dosificación entre estos será de 1:6.

6.3.1. Selección de materiales

Para la definición de proporcionamiento del agregado fino, se compararon los resultados expuestos en la Tabla 6.13, con la cual se determinó que el **porcentaje adecuado de agregado reciclado dentro de la mezcla del mortero propuesto será de 30%**, ya que alcanza valores de resistencia

mayores al establecido previamente (25%-50%, f'_c promedio= 498 kg/cm² (Martínez García, 2021) / 30% f'_c promedio= 223.9 kg/cm² (López Andraca, 2015)) y representa una porción importante de los materiales utilizados en la mezcla.

Por otro lado, en la Tabla 6.14 se compararon geopolímeros a base de diferentes materiales y su resistencia a la compresión, **siendo el geopolímero de piedra pómez el seleccionado para este trabajo** puesto que proviene de residuos de plantas termoeléctricas, lo cual representa una alternativa para la gestión de estos, además de tener una resistencia no tan alejada del objetivo planteado (f'_c = 48.70 kg/cm²).

Con la combinación de estos materiales, se busca que su comportamiento conjunto alcance el valor mínimo de f'_c = 75 kg/cm² y que sea capaz de ser una mezcla trabajable.

6.3.2. Metodología

En la Figura 6.14 se ilustra el diagrama de flujo a seguir para la elaboración del mortero, esto a partir del proceso de fabricación tradicional manual del concreto, además de puntualizar las pruebas de laboratorio necesarias para determinar la calidad del agregado.

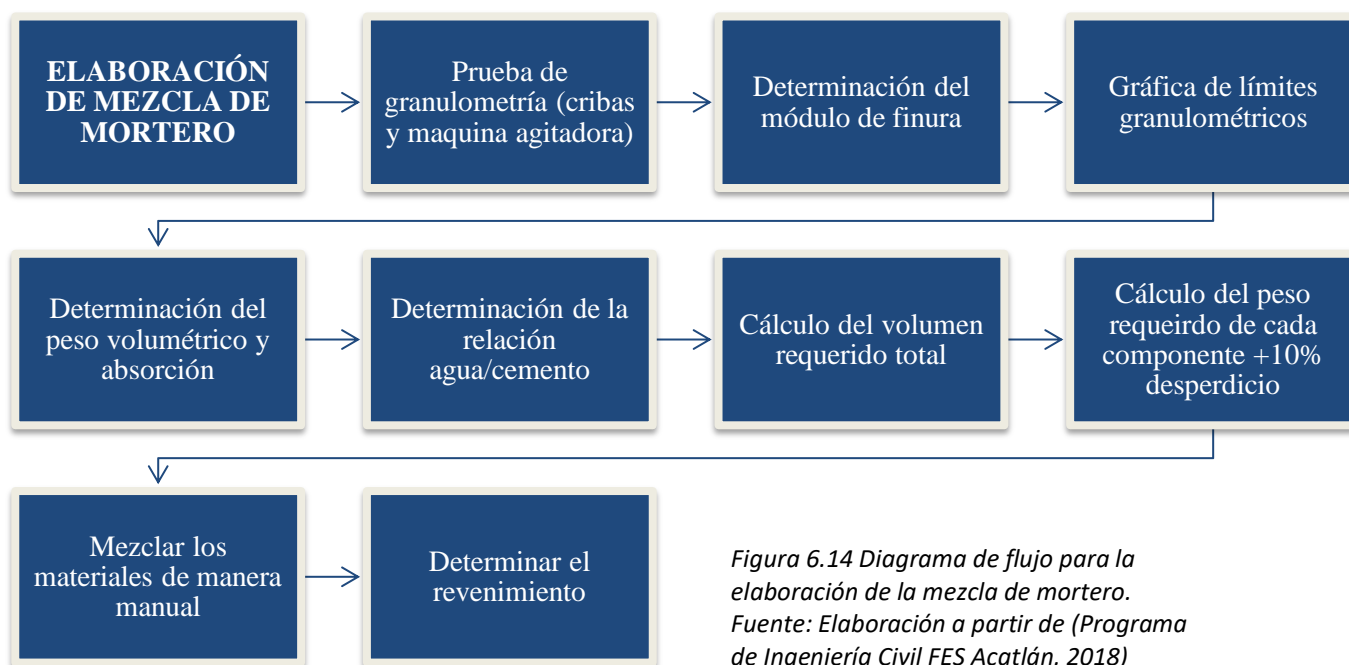


Figura 6.14 Diagrama de flujo para la elaboración de la mezcla de mortero.
Fuente: Elaboración a partir de (Programa de Ingeniería Civil FES Acatlán, 2018)

Por otra parte, para conocer la resistencia a la compresión de esta mezcla, se puede utilizar la Figura 6.15 como base para este proceso.

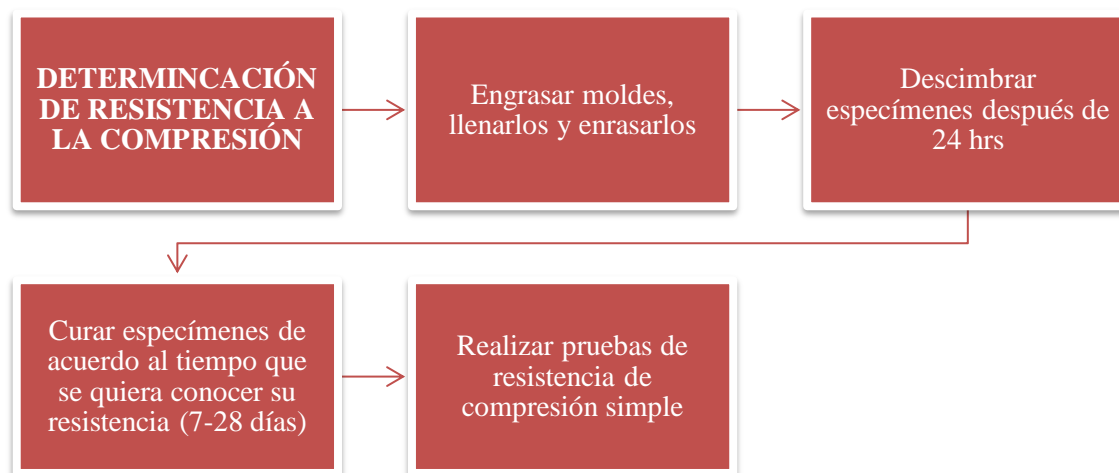


Figura 6.15 Diagrama de flujo para la determinación de la resistencia a la compresión del mortero. Fuente: Elaboración a partir de (Programa de Ingeniería Civil FES Acatlán, 2018)

Finalmente a pesar de que los trabajos revisados se enfocan principalmente en la elaboración de mezclas de concreto y de mortero, estos elementos (geopolímeros y agregados reciclados) podrían ser utilizados incluso para el desarrollo de bloques o elementos decorativos que no se encuentren sometidos a cargas importantes.

Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones

Se logró elaborar una propuesta teórica con base en la bibliografía existente como alternativa para el aprovechamiento del material reciclado proveniente de los RCD, a través del uso de geopolímeros para producir materiales de acabado.

A pesar de que este trabajo se desarrolló de manera meramente teórica y empírica, es posible exponer a través de los datos recopilados cómo la sustitución del Cemento Portland por geopolímeros podría traer consigo grandes beneficios medioambientales debido a la reducción de emisiones de GEI's en su producción. De igual forma se demuestra que la reinserción de los Residuos de la Construcción y Demolición es una realidad, y que si se sigue desarrollando este campo de trabajo podría alcanzarse un modelo de economía circular dentro de la industria de la construcción.

De igual forma es importante recalcar que la normatividad existente, de manera específica dentro de la Ciudad de México, sólo busca impulsar la incorporación de materiales reciclados en nuevas obras y seguir propiciando un correcto manejo de estos residuos. Es por esto que una gran área de oportunidad sería establecer las características y calidad de estos materiales (estandarización) para que puedan ser considerados formalmente dentro de la industria de la construcción, además de generar medidas más rigurosas o de mayor incentivo para que su incorporación sea una realidad total. Aunado a esto, es de vital importancia que este tipo de legislación no sólo exista en una de las 32 entidades del país, por lo que ya sea que se desarrolle una norma aplicable a nivel nacional, o que se presione a los demás estados a crear su propia normatividad, se necesitan tomar acciones para que se lleve a cabo un cambio verdadero en la gestión de los RCD.

Por otra parte, la relevancia de esta propuesta recae en el poco o nulo estudio y desarrollo del trabajo conjunto entre estos componentes, puesto que los trabajos realizados los emplean de manera independiente, lo cual no nos asegura que una mezcla entre ambos sea exitosa, pero de ser así se podrían obtener materiales con un impacto ambiental mucho menor al de los sistemas de producción actuales.

Para finalizar, debido a la naturaleza de este trabajo, es importante resaltar la importancia de llevar a cabo la experimentación de dicha propuesta dentro de un ambiente y propiedades controladas, para de esta manera comprobar de manera técnica la factibilidad de esta propuesta.

Capítulo 8 Referencias consultadas

- Aguilar, A. (30 de Septiembre de 1997). *Biblioteca CF+S*. Obtenido de <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n2/aconst1.html>
- Arias, S., & Gómez, M. (2021). *FABRICACIÓN DE GEOPOLÍMEROS A PARTIR DE RELAVES MINEROS: UNA SOLUCIÓN SOCIO AMBIENTAL*. Obtenido de Anova. Revista de investigación Centro de Gestión Industrial: <https://revistaanova.wixsite.com/anova/copia-de-sistema-de-aprovechamiento>
- Bravo, N. (Noviembre de 2010). *IDEASS*. Obtenido de <http://www.ideassonline.org/public/pdf/RCDDocumentEsp.pdf>
- Burciaga, O., Escalante, J., & Magallanes, R. (2015). *Resistencia a la compresión y evolución microestructural de geopolímeros basemetacaolín expuestos a alta temperatura*. Obtenido de SciELO: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000100006
- Calderón Peñafiel, J. (2018). *Materiales de arcilla geo-polimerizada: Tecnologías para la arquitectura del futuro*. Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/127719/Calderon_arcilla_geo-polimerizada.pdf?sequence=1#:~:text=%E2%80%9CGeopolimerizaci%C3%B3n%E2%80%9D%20es%20el%20t%C3%A9rmino%20utilizado,nueva%20red%20molecular%20polim%C3%A9rica%20formando
- CANACEM. (2019). *Cámara Nacional del Cemento*. Obtenido de <https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion/>
- CANACEM. (2021). *Cámara Nacional del Cemento*. Obtenido de <https://canacem.org.mx/proceso-de-produccion/>
- Castells, X., Fullana, P., García, J., Martín, M., Rigola, M., Roca, M., & Salas, J. (2012). *RECICLAJE DE RESIDUOS INDUSTRIALES*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- CEDEX. (s.f.). *Catálogo de Residuos Utilizables en la Construcción*. Obtenido de CEDEX: <http://www.cedexmateriales.es/2/catalogo-de-residuos/>
- CEMEX. (2015). *Manual del constructor*. Obtenido de <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicaciones-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4>
- CEMEX. (5 de Octubre de 2021). *CEMEX*. Obtenido de Ambiciosos objetivos climáticos 2030 de CEMEX validados por estar alineados a la ciencia más actual: https://www.cemex.com/es/full-story/-/asset_publisher/FRPW43WCYckA/content/cemex-ambitious-2030-climate-targets-validated-to-be-in-line-with-the-latest-science

- CMIC. (2013). *Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición*.
- Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. En C. G. Mexicanos.
- Davidovits, J. (2020). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Domínguez Lepe, J., & Martínez L., E. (2007). Reinserción de los residuos de construcción y demolición dal ciclo de vida de la construcción en viviendas. *Ingeniería*.
- Gobierno de la Ciudad de México. (07 de Agosto de 2021). *Jefatura de Gobierno*. Obtenido de <https://www.jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/anuncia-jefa-de-gobierno-seis-plantas-de-tratamiento-y-aprovechamiento-de-residuos-de-la-construccion-en-la-ciudad-de-mexico>
- González, C., Montaña, Á., & Castro, D. (2012). *Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto*. Obtenido de El hombre y la máquina: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47823946007>
- Hyde, R. (27 de Noviembre de 2018). *TEDx Talks*. Obtenido de YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=oq_he4a51cY
- INECC & SEMARNAT. (2015). *Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Ciudad de México.
- Lehne, J., & Preston, F. (13 de Junio de 2018). *CHATHAM HOUSE*. Obtenido de <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>
- López Andraca, H. G. (2015). *Pruebas de resistencia y permeabilidad de residuos de la construcción y demolición para su utilización en la construcción de obras complementarias, operación y clausura de rellenos sanitarios en la zona metropolitana del Valle de México*. Ciudad de México.
- Martínez García, R. (2021). *Evaluación del uso de áridos reciclados de hormigón en la fabricación de hormigones autocompactantes y morteros de cemento*. León, España.
- Martínez, G. M. (06 de Abril de 2022). *Geopolímeros y sus aplicaciones*. Obtenido de Tecnológico Nacional de México en Celaya: <https://celaya.tecnm.mx/geopolimeros-y-sus-aplicaciones/>
- Muñiz, M. d., Gasca, J. R., Manzano, A., & Rubio, J. C. (2011). Geopolímeros para un desarrollo sustentable. *Ciencia y desarrollo*, 64-69.
- Programa de Ingeniería Civil FES Acatlán. (06 de Febrero de 2018). *Manual de práctica Laboratorio de Mecánica de Materiales*. Obtenido de Ingeniería Acatlán: <https://ingenieria.acatlan.unam.mx/media/vinculos/2022/05/FESA%20PIC%20I09%20LAB%20MECANICA%20DE%20MATERIALES.pdf>

- Rodgers, L. (Diciembre de 17 de 2018). *BBC NEWS*. Obtenido de La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Bogotá: BHANDAR EDITORIALES LTDA.
- SEDEMA. (2006). *NADF-007-RNAT-2004*. Distrito Federal.
- SEDEMA. (2015). *NADF-007-RNAT-2013*. Ciudad de México.
- SEDEMA. (2019). *Basura Cero*. Obtenido de https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/BASURA%20CERO_Final%2026Mayo19.pdf
- SEMARNAT. (Enero de 2019). *VISIÓN NACIONAL HACIA UNA GESTIÓN SUSTENTABLE: Cero residuos*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/435917/Vision_Nacional_Cero_Residuos_6_FEB_2019.pdf
- SEMARNAT. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- SMIE. (2014 de Noviembre de 2014). *NMX-C-486-ONNCCE-2014 MORTERO PARA USO ESTRUCTURAL*. Obtenido de <https://www.smie.org.mx/archivos/eventos/2015/agosto/ponencia-mexico-cambio-para-siempre-desde-1985-norma-mexicana-nmx-c-486-onncce-2014-mortero-uso-estructural-alvaro-perez.pdf>
- Vázquez Soto, Y. A. (2019). *Síntesis de geopolímeros de impacto ambiental bajo, con base en escoria de alto horno y metacaolín, por activación con NaOH, como sustituto del cemento Portland. Análisis por el método Taguchi*. Ciudad de México.