



Universidad Nacional Autónoma de México

Programa de maestría y doctorado en Arquitectura
Campo de conocimiento: Tecnologías

Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición: Influencia de los agregados reciclados en la elaboración de adoquines para su uso en pavimentos

Tesis

Que para optar por el grado de: Maestra en Arquitectura

Presenta:

Arq. Rosario Mabel Bucio Toledo

Tutora principal:

Dra. Dolores Ana Flores Sandoval

Facultad de Arquitectura, UNAM

Miembros del Comité tutor:

Dra. Maribel Jaimes Torres

Facultad de Arquitectura, UNAM

Dr. Daniel Aldama Avalos

FES Aragón, UNAM

Ciudad Universitaria, CDMX, agosto 2023



INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES
HISTÓRICAS





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: TECNOLOGÍAS

**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN:
INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS RECICLADOS EN LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES PARA SU USO EN PAVIMENTOS**

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:
ARQ. ROSARIO MABEL BUCIO TOLEDO

TUTORA PRINCIPAL:
DRA. DOLORES ANA FLORES SANDOVAL
FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM

SINODALES:
DRA. MARIBEL JAIMES TORRES
FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM
DR. DANIEL ALDAMA AVALOS
FES ARAGÓN, UNAM
DRA. ILSE GARCÍA VILLALOBOS
FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM
MTRO. SERGIO ALFONSO MARTÍNEZ GONZÁLEZ
FES ARAGÓN, UNAM

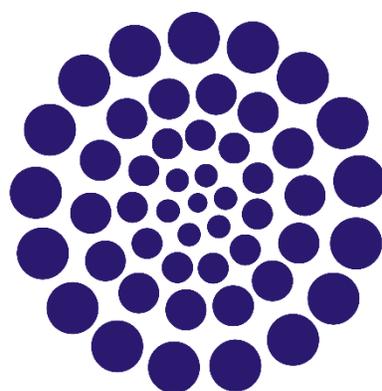
CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, JULIO 2023



INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES
HISTÓRICAS



Agradecimientos



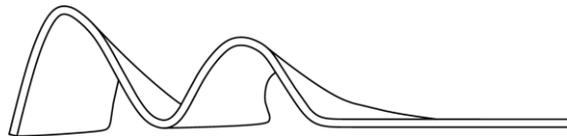
CONACYT

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología
por el apoyo económico otorgado para la realización de esta investigación.

Agradecimientos



Al Laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. por el apoyo brindado.



FACULTAD DE ARQUITECTURA POSGRADO UNAM
LABORATORIO DE CONSERVACIÓN DEL
PATRIMONIO NATURAL Y CULTURAL

Gracias al Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Posgrado UNAM



Al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el apoyo brindado al facilitar sus instalaciones e infraestructura durante el desarrollo de la investigación.



**LABORATORIO NACIONAL DE VIVIENDA
Y COMUNIDADES SUSTENTABLES**

Gracias al Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (LNVCS), por el apoyo brindado a través del LMSE como sede centro UNAM.

Agradecimientos

A mis padres y hermanos

“En primer lugar les agradezco a mi familia, que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos profesionales y académicos. Me han guiado y animado a tomar decisiones difíciles en el camino, gracias por su amor y soporte”.

A mis tutores y profesores

“Le agradezco muy profundamente a la Dra. Ana Flores por su dedicación y paciencia. Gracias por su guía al comité tutor y por todo el conocimiento de los profesores que me brindaron seguridad y respaldo”.

A mis compañeros

“Agradecerles a mis compañeros, ya que a pesar de las circunstancias he obtenido grandes amigos. Gracias por las horas virtuales compartidas.

Gracias a la máxima casa de estudios

“Por último agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la cual me llena de orgullo pertenecer, es muy grato obtener el grado en el Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura. Agradezco a cada directivo por su trabajo y por su gestión”.

Índice

Introducción	9
CAPÍTULO 1	13
1. Ciclo de vida de los materiales de construcción	
1.1. Sustentabilidad en la industria de la construcción	14
1.2. Agenda 2030: Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).....	25
1.3. Experiencia internacional y buenas prácticas.....	27
1.4. Reflexión capitular	35
CAPÍTULO 2	36
2. Residuos de construcción y demolición (RCD)	
2.1. Principales materiales que componen los residuos de construcción y demolición	37
2.2. Efectos sobre el medio ambiente por la mala disposición de los RCD	42
2.3. Normatividad y planes para el manejo de los RCD en México	46
2.4. RCD sus aplicaciones y limitaciones en la construcción.....	49
2.5. Reflexión capitular	51
CAPÍTULO 3	53
3. Agregados de concreto reciclado	
3.1. Origen y producción de agregados reciclados.....	54
3.2. Clasificación de los agregados reciclados.....	59
3.3. Principales propiedades de los agregados de concreto reciclado	61
3.4. Normas para el control de calidad con aplicabilidad a agregados reciclados.....	65
3.5. Reflexión capitular	67
CAPÍTULO 4	69

4. Método experimental del proyecto

4.1. Diseño del método experimental	70
4.2. Normatividad y métodos de ensayo	76
4.3. Diseño de la mezcla inicial	85
4.4. Determinación granulométrica de las arenas	87
4.5. Propiedades obtenidas en diferentes porcentajes de sustitución de arena	91
4.6. Análisis de los resultados	97

CAPÍTULO 5..... 98

5. Prototipo de pavimento reciclado

5.1. Optimización del diseño de mezcla para uso en pavimentos.....	100
5.2. Descripción del producto de aportación	105
5.3. Sistema de la aportación del producto y sus componentes	121
5.4. Descripción valores del producto de investigación.....	123
5.5. Valores sostenibles del producto.....	125
5.6. Hoja de producto.....	128

Conclusiones y recomendaciones..... 129

Propuesta escenarios futuros y líneas de investigación..... 131

Referencias..... 133

Glosario..... 139

Anexos 141

Introducción

La influencia de los agregados reciclados obtenidos de los **Residuos de la Construcción y Demolición** (RCD) tiene un interés creciente en México debido a los altos volúmenes que se producen diariamente. Además, las actualizaciones en la normatividad sobre el manejo integral de los residuos incentivan al desarrollo de nuevos productos para la construcción que cumplan con las especificaciones técnicas para su aplicación.

En esta investigación se lleva a cabo un análisis cuantitativo del efecto de los agregados finos reciclados en las propiedades mecánicas de mezclas de concreto no estructural, argumentando las características físicas en diferentes diseños de mezcla con una variación de material reciclado del 50% al 100%. Con el fin de generar alternativas para el aprovechamiento de los RCD se ha diseñado un prototipo de adoquín para su disposición en pavimentos Tipo A, comprobando su factibilidad por medio de la caracterización de sus propiedades mecánicas (Bucio-Toledo y Flores-Sandoval, 2022, p. 1).

Problemática

El mundo cada vez está más urbanizado, desde 2007, más de la mitad de la población mundial ha estado viviendo en ciudades, y se espera que dicha cantidad aumente hasta el 60% para 2030. Las ciudades y las áreas metropolitanas son centros de crecimiento económico, ya que contribuyen al 60% aproximadamente del PIB mundial, sin embargo, también representan alrededor del 70% de las emisiones de carbono mundiales y más del 60% del uso de recursos (ONU, 2022). Debido a la creciente necesidad de urbanización, se espera que el uso de concreto se duplique para 2050 y dado que los agregados comprenden alrededor del 70% del volumen del concreto, se esperan tasas alarmantes de agotamiento de los recursos naturales no renovables (Hafez et al., 2020, pp. 1-2).

En años recientes el crecimiento poblacional, el desarrollo y los hábitos de consumo de la Ciudad de México, han originado un aumento considerable en la generación de los residuos. Asimismo, la inadecuada gestión de los residuos trae consigo problemas ambientales, sociales, políticos, financieros y de salud, por lo que brindar un buen manejo con la participación de los diferentes sectores de la población, la incorporación de nuevas tecnologías y la aplicación de la legislación en el tema podrían detonar en beneficios claves en materia de generación y separación de residuos sólidos desde la fuente (Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México, 2019, p. 7). En la Ciudad de México el problema de residuos de construcción y demolición es incalculable, se estima un aumento de más de 300% en la última década, según datos de la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA), para el 2019 se tenía un promedio diario de producción de RCD alrededor de las 14 mil toneladas y para el año en 2021 un aproximado de más de 16 mil toneladas.

El uso de los agregados de concreto reciclado a nivel internacional es un área con bastantes avances tecnológicos y normativos, llegando hasta en un 90% de aprovechamiento y reintegración de los materiales en algunos países europeos (CMIC, 2014a); en contraste, en México existe un rezago en el tema de economía circular (EC). Actualmente se cuentan con 2 plantas privadas procesadoras de residuos trabajando en la CDMX y un promedio de menos del 3% de aprovechamiento de productos reciclados, el análisis de esta información podría contribuir a la erradicación de los tiraderos clandestinos y a la disminución de la disposición inadecuada de los residuos. La Secretaría de Obras y Servicios han llegado a contabilizar hasta 984 tiraderos clandestinos, acarreado con esto graves problemas medio ambientales, de imagen urbana y de salud pública (Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México, 2019, p. 204).

Los controles para el manejo del RCD se han visto deficientes, por ello, la actualización en los instrumentos regulatorios (Streaming IINGEN, 2021) cuyo fin es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos, que permitan a los establecimientos y grandes generadores de residuos, incorporar acciones que disminuyan los impactos negativos (NACDMX-007-RNAT-2019, 2021).

Con la gestión y procesamiento adecuados, los materiales recuperados y reciclados pueden reemplazar a los que se extraerían de los bancos de materiales pétreos, convirtiéndose en materia prima secundaria para la producción de nuevos elementos constructivos e incentivar la economía circular con la finalidad de mantener su valor a lo largo de su ciclo de vida, minimizar la generación de residuos y reducir los impactos provocados por su inadecuada disposición y extracción de materias primas. Independientemente de los numerosos estudios encontrados, ninguno indico un consenso sobre la proporción de reemplazo de agregados finos naturales por agregados finos reciclados de RCD que lograría el potencial de sostenibilidad óptimo de la mezcla de concreto resultante (Kisku et al., 2017, pp. 16-17).

En esta investigación se presentan los resultados obtenidos al relacionar el porcentaje de sustitución de agregados finos naturales por reciclados en la elaboración de concreto no estructural para su aprovechamiento en pavimentos Tipo A (NMX-C-314-ONNCCE-2014). Así promover la reintegración de los materiales procesados a los ciclos de producción, teniendo como premisa el preservar y prolongar el valor de los materiales no renovables.

Justificación

Uno de los principales desafíos a escala mundial es conseguir un desarrollo sostenible, en 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobó la **Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible**, una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendan un nuevo camino, con el cual mejorar la vida de todos (ONU, 2015). La misión es promover el desarrollo sostenible a nivel mundial lo que significa la responsabilidad de asegurar que las necesidades de las sociedades actuales en materia del consumo de recursos naturales, pero también en materia de la vida social y económica, no comprometan la satisfacción de las necesidades de las futuras generaciones.

La agenda cuenta con 17 objetivos, que incluye apartados que dan respaldo a esta investigación, incentivando la investigación, el desarrollo de tecnologías con plena consideración de la normatividad vigente, reducción del impacto ambiental y el uso eficiente de los recursos extendiendo su vida útil. En específico los siguientes (ODS, 2015):

- **ODS 9.- Industria, innovación e infraestructuras:** Objetivo que indica como una de las metas el aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas, fomentando la innovación, así como apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacional, garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos (ODS 9, 2015). Apartado directamente relacionado de fondo con el desarrollo de la investigación.
- **ODS 11.- Ciudades y comunidades sostenibles:** Una de las metas de aquí a 2030, es reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo. Aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adopten e implementen políticas y planes integrados para promover la inclusión y el uso eficiente de los recursos (ODS 11, 2015). De aquí la importancia de abordar la gestión de los residuos desde la normatividad y planes nacionales actuales.
- **ODS 12.- Producción y consumo responsables:** Una de las metas de aquí a 2030, es lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Así como, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización (ODS 12, 2015). Por lo que es primordial generar alternativas para extender la vida útil de los materiales.

El constante e inevitable crecimiento y desarrollo de las zonas urbanas, genera que la industria de la construcción sea sin lugar a duda parte fundamental del desarrollo de la infraestructura del país, sin embargo, las actividades mismas de la construcción, remodelación o demolición de obras en general generan la necesidad de tratar los desechos de manera adecuada (Urrutia Segura y Ávalos Rendón, 2019, p. 16). Ante esta problemática, se propone la aplicación de nuevas y mejores alternativas para disminuir y eliminar en lo posible la producción de los grandes volúmenes de desperdicios que actualmente se continúan generando.

La industria de la construcción puede desempeñar un papel importante en los procesos sostenibles, los instrumentos regulatorios han marcado pautas, pero es una labor que se debe abordar de manera conjunta entre población, industria, investigadores y gobierno:

- La **Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal** clasifica a los residuos de la construcción y demolición como un residuo de manejo especial, tanto por la cantidad de material involucrado, como por el impacto en el ambiente que pudiera generar una disposición inadecuada, así como por su potencial de reúso y reciclaje, para utilizarse como agregados reciclados. (Ley de Residuos Sólidos del DF, 2019)
- En la actualización de la **Norma Ambiental NACDMX-007-RNAT-2019** se establece la clasificación y especificaciones para el manejo adecuado de los RCD en la Ciudad de México para garantizar su reciclaje, reúso y su correcta disposición final. (Secretaría del Medio Ambiente, 2021)

Existe un nicho de oportunidad en los materiales reciclados, adaptables a la calidad demandada por la industria de la construcción. Acarreando con esto grandes e importantes ventajas como:

- **Reducir el impacto ambiental:** Dentro del ciclo de vida de los materiales de construcción existen diferentes fases, desde la extracción de los materiales hasta el manejo de los residuos, integrando en cada uno de ellas diferentes niveles de contaminación ambiental. Por ello el uso de materiales pétreos no vírgenes es importante, en la búsqueda de alternativas que contrarresten dichos efectos.
- **Reducción en gastos y ahorro de energías:** Al alargar el ciclo de vida de un producto se reducen los costos de inversión. La reducción en el uso de materiales vírgenes beneficia al medio ambiente, además conlleva un ahorro importante en los gastos de consumo energético.
- **Evitar almacenamiento de material contaminante:** Reciclar un producto evita que estos se almacenen en grandes vertederos, algunos de ellos fuera de control. Reciclando se consigue que no se creen nuevos vertederos logrando una gestión controlada de los existentes.
- **Potenciadores de nuevos productos:** Otra ventaja del reciclaje, es la creación de nuevos productos con especificaciones técnicas que satisfagan a la industria. Existe una amplia gama de materiales tradicionales, pero pocas son las opciones comerciales de materiales reciclados, por lo que es una oportunidad para ampliar la cartera con nuevos productos, con nuevas cualidades y de menor impacto.

Hipótesis

Al incorporar agregados finos reciclados de concreto (obtenidos a partir de RCD) como materia prima en un diseño de mezcla para la elaboración de adoquines, es posible alcanzar una resistencia a la compresión adecuada según la norma (NMX-C-314-ONNCCE-2014) generando una alternativa para la gestión de los residuos.

Objetivos

Objetivo general: Generar un diseño de mezcla con agregados finos reciclados de concreto para la elaboración de un prototipo de adoquín para su uso en pavimentos, con resistencia mecánica a la compresión adecuada, según la norma (NMX-C-314-ONNCCE-2014) de uso peatonal.

Objetivos particulares:

- Caracterización granulométrica de los agregados finos de concreto reciclado.
- Determinar si en una mezcla los agregados finos reciclados de concreto incrementan o perjudican la resistencia a compresión.
- Establecer una comparativa entre los agregados finos reciclados y las arenas naturales en la fabricación de adoquines y determinar su influencia dentro de la mezcla variando los porcentajes de sustitución.
- Obtener las propiedades mecánicas del prototipo de pavimento (adoquín) y verificar si este cumple con las propiedades mínimas requeridas por norma.

Palabras clave: agregados, concreto, diseño de mezcla, economía circular, impacto ambiental, pavimento, propiedades mecánicas, RCD, reciclaje.



CAPÍTULO 1

1. Ciclo de vida de los materiales de construcción

Dentro de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) es prioridad mejorar la calidad de vida de la población, por lo tanto los desafíos son que las personas vivan en un entorno saludable, que mejoren sus condiciones sociales, económicas y ambientales para las generaciones presentes y futuras (ONU, 2015). Desde la creación de la *Comisión Mundial Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*, y de la elaboración del informe *Nuestro futuro en común* (1987), el desarrollo sostenible ha ganado mucha atención en todas las naciones declarando que “el desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Organización de las Naciones Unidas, 1987). Así el gran reto es lograr un equilibrio entre las tecnologías disponibles, las estrategias de innovación y las políticas gubernamentales.

Los modelos de producción y consumo globales se han basado en el uso intenso de los recursos finitos, el proceso ha sido sencillo: extracción de materiales, transformación venta, uso y desecho. A pesar de las contribuciones del modelo económico lineal (EL) en el crecimiento de la economía mundial, es evidente que sus externalidades negativas no podrán soportar los retos que enfrentamos de cara al futuro como el cambio climático, el deterioro de los ecosistemas y la escasez de recursos. Por esta razón, el modelo de economía circular (EC) propone un método de producción y consumo diferente, basado en la restauración y regeneración de los recursos, preservando el valor de los materiales al máximo en todo momento. De esta manera, se entiende como un ciclo que optimiza el uso de recursos y su rendimiento, y previene los riesgos de externalidades y desabastecimiento de recursos escasos (Herramientas de la Economía Circular, 2022). Para superar la creciente preocupación por el agotamiento actual de los recursos y abordar las consideraciones ambientales tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo, el análisis del ciclo de vida (ACV) de los materiales, se ve como una alternativa de que se puede aplicar para la toma de decisiones y mejorar la sostenibilidad en la industria de la construcción (Ortiz et al., 2009, p.2)

Esta revisión reúne antecedentes, datos específicos y conceptos que tienen como objetivo el aprovechamiento de los recursos naturales, el análisis del ciclo de vida (ACV) de los materiales de construcción y de los esfuerzos para lograr una economía circular (EC). Ante las problemáticas de actualidad la industria de la construcción se preocupa por mejorar sus indicadores de sostenibilidad, aplicando herramientas que en lo posible optimicen estos aspectos, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los materiales evitando en lo posible los desechos y alargando su vida útil.

1.1. Sustentabilidad en la industria de la construcción

Antecedentes sobre el reciclaje y aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición

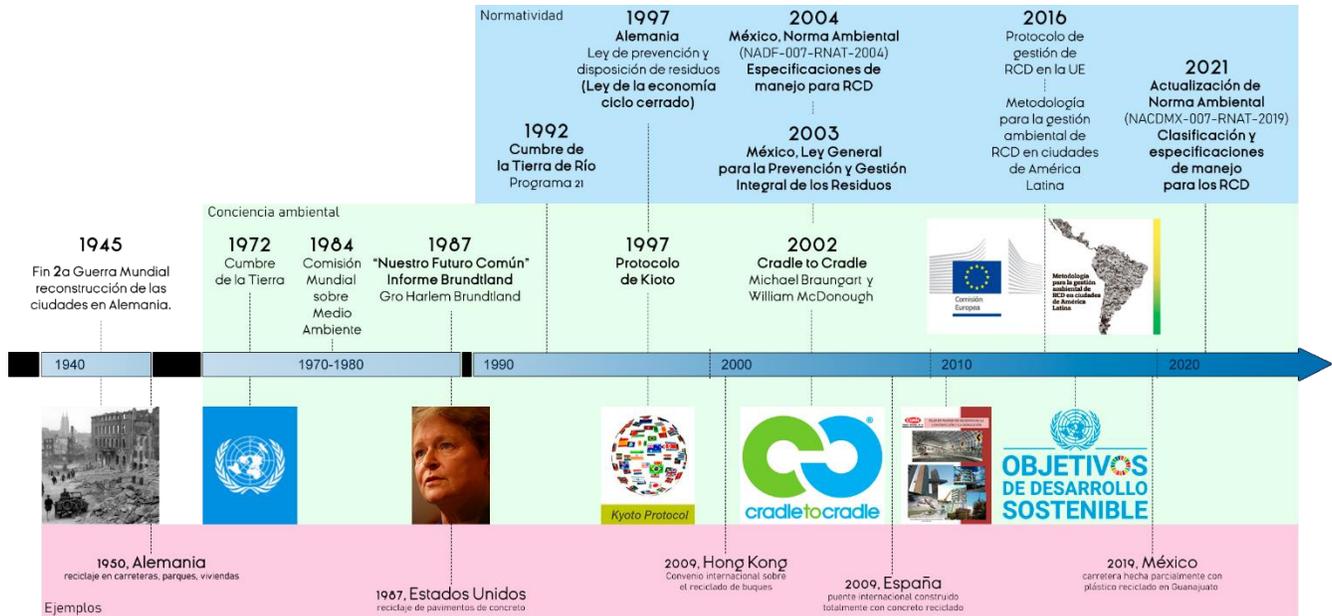
El uso de los residuos de construcción y demolición no es reciente, en la época del Imperio Romano se utilizaban escombros cerámicos y escorias procedentes de fundición en la elaboración de edificios y carreteras. La recuperación de la piedra que conformaba el adoquinado de los antiguos caminos que se encontraban en mal estado para ejecutar otros nuevos, también fue una práctica habitual. Aunque el uso de escombros triturados (agregados) para mezclas con cemento en la elaboración de concreto data de 1945 en Alemania (Martín-Morales, 2013, p.63), tras la Segunda Guerra Mundial, los europeos enfrentaban la gran acumulación de escombros por sus ciudades destruidas, motivo por el cual se abocaron a reciclar los residuos y utilizarlos como material de construcción, obteniendo muy buenos resultados (Montiel Miguel y Cottier Caviedes, 2017, pp. 12-13).

Estos inicios, así como los aspectos relevantes para la conciencia ambiental global y de normatividad los vemos de manera gráfica con una línea de tiempo en la **Figura 1**, que nos muestra la

evolución en el uso de los residuos de construcción y demolición, así como los diferentes esfuerzos para su correcto manejo y aprovechamiento.

Figura 1

Línea de tiempo de aspectos relevantes sobre el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición



Nota: Elaboración propia, antecedentes relevantes en la época actual sobre el aprovechamiento de RCD.

1945. En la época post guerra, los residuos se utilizaron en la elaboración de concreto para la reconstrucción, particularmente en Alemania y Gran Bretaña. Posterior a las experiencias de Europa, en Estados Unidos de América se vieron motivados a realizar algunas investigaciones. La mayor parte de los textos describen la utilización del producto obtenido de la demolición de tabique ya que este era el material de construcción predominante. A partir de estos acontecimientos la humanidad se dio cuenta que la acción de reciclar o reutilizar residuos de construcción y demolición (RCD) era una realidad, lo cual contribuiría en gran medida a la satisfacción de necesidades o requerimientos demandados por la misma (Montiel Miguel y Cottier Caviedes, 2017, pp. 8-9).

1972. Se celebró la Conferencia Científica de las Naciones Unidas también conocida como la Primera Cumbre para la Tierra, en Estocolmo, Suecia del 5 al 16 de junio, adoptó una declaración que enunciaba los principios para la conservación y mejora del medio humano y un plan de acción que contenía recomendaciones para la acción medioambiental internacional (ONU, 2022).

1984. En octubre de 1984 se reunió por primera vez la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (World Commission on Environment and Development) atendiendo un urgente llamado formulado por la Asamblea General de las Naciones Unidas en el sentido de establecer una agenda global para el cambio (A global agenda for change). La Comisión partió de la convicción de que es posible para la humanidad construir un futuro más próspero, más justo y más seguro(ONU, 2022).

1987. En abril de 1987 su informe denominado *Nuestro Futuro Común*. El *Informe Brundtland* plantea la posibilidad de obtener un crecimiento económico basado en políticas de sostenibilidad y expansión de la base de recursos ambientales, en este informe se utilizó por primera vez el término desarrollo sostenible. Implica un cambio muy importante en cuanto a la idea de sustentabilidad, principalmente ecológica, y a un marco que da también énfasis al contexto económico y social del desarrollo. Este informe se ha convertido en un referente fundacional del desarrollo sostenible (Organización de las Naciones Unidas, 1987).

1992. La comunidad internacional se reunió en Río de Janeiro, Brasil, para discutir los medios para poner en práctica el desarrollo sostenible. Durante la denominada Cumbre de la Tierra de Río, los líderes mundiales adoptaron la Agenda 21, con planes de acción específicos para lograr el desarrollo sostenible en los planos nacional, regional e internacional (ONU, 2022).

1997. La piedra angular de la acción sobre cambio climático, en virtud de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, resultó ser la adopción del Protocolo de Kioto en Japón en diciembre de 1997, que constituye la acción más influyente en materia de cambio climático que se haya emprendido hasta la fecha (ONU, 2022).

2002. En su libro de 2002 *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, el arquitecto William McDonough y el químico Michael Braungart presentaron una integración de diseño y ciencia que proporciona beneficios duraderos para la sociedad a partir de materiales seguros, agua y energía en economías circulares y elimina el concepto de desperdicio (McDonough y Braungart, 2002). Y en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible se aprueba el Plan de Aplicación de Johannesburgo (ONU, 2022).

2003. Se estableció la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, se tuvo como objetivo principal la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial para prevenir la contaminación de sitios con estos residuos (SEDEMA, 2022).

2004. Surgen las primeras normas y leyes de manejo de los RCD aplicables a la Ciudad de México, NADF-007-RNAT-2004. El reciclaje de residuos de construcción y demolición se enfocó en triturar los residuos y convertirlos en agregados finos y gruesos, de tipo hidráulicos y mixtos, pero con escasos instrumentos que apoyen estas iniciativas (SEDEMA, 2022).

2014. La Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) desarrolla el Plan de Manejo de los Residuos de la Construcción y la Demolición (PMRCD) que tiene como uno de sus principales objetivos, el facilitar la construcción sustentable, minimizando la generación de Residuos de la Construcción y la Demolición (RCD) y maximizando su aprovechamiento, bajo el concepto de corresponsabilidad entre los tres órdenes de gobierno y los diferentes actores que participan en la cadena de valor de la industria de la construcción (CMIC, 2014).

2015. La ONU aprueba la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, con la misión de promover el desarrollo sostenible a nivel mundial. La agenda cuenta con 17 objetivos, que incluye apartados como: Ciudades y comunidades sostenibles, producción y consumo responsables, e industria, innovación e infraestructuras (ONU, 2015). Durante este año se firma el acuerdo de París, un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante, fue adoptado por 196 partes en la COP21 en París, el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, su objetivo es limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2°C, preferiblemente a 1,5 grados centígrados, en comparación con los niveles preindustriales (CMNUCC, 2016).

2016. Se integra el Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE. Tiene como objetivo la gestión adecuada de los residuos de la construcción y demolición y de los materiales reciclados, que incluye la manipulación correcta de residuos peligrosos. Forma parte de un paquete sobre la economía circular novedoso y ambicioso que presenta la Comisión Europea, que incluye propuestas legislativas sobre los residuos con el fin de estimular la transición de Europa a una economía circular para mejorar la competitividad global, fomentar el crecimiento económico sostenible y generar nuevos puestos de trabajo (Comisión Europea, 2016). También, surge la Metodología para la gestión ambiental de RCD en ciudades de América Latina con el objetivo de repetir la experiencia de Bogotá en otras grandes ciudades, a través de un conjunto de 10 acciones y del programa Escombros Cero el cual busca “diseñar e implementar un modelo eficiente y sostenible de gestión de los escombros en la ciudad, propendiendo por la mayor recuperación y reincorporación al proceso constructivo de la

ciudad y por la utilización de plantas de reciclaje"(Metodología para la gestión ambiental de RCD en ciudades de América Latina, 2016).

2019 – 2021. En la actualidad, se ha buscado introducir el uso de agregados reciclados, procedentes de RCD en diversas aplicaciones dentro de la industria de la construcción con la actualización más reciente de la Norma Ambiental NACDMX-007-RNAT-2019 se establece la clasificación y especificaciones para el manejo adecuado de los residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México para garantizar su reciclaje, reúso y su correcta disposición final (SEDEMA, 2022).

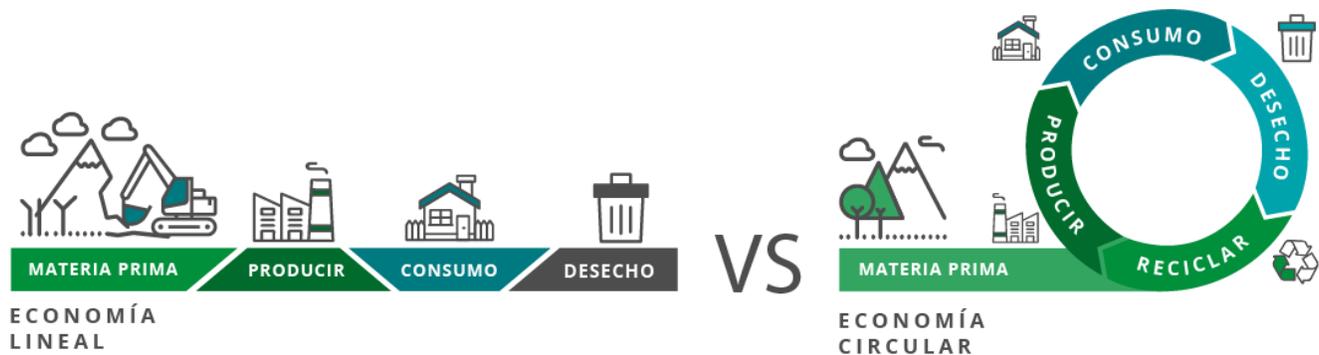
Economía circular de los materiales de construcción

Los modelos de producción y consumo globales se han basado en el uso intenso de recursos finitos. El proceso ha sido sencillo: extracción de materiales, transformación, venta, uso y desecho. A pesar de sus grandes contribuciones en el crecimiento de la economía mundial, hoy es evidente que este viejo modelo y sus externalidades negativas, no podrá soportar los retos que enfrentamos de cara al futuro como: el cambio climático, el deterioro de los ecosistemas, la escasez de recursos, la urbanización y el crecimiento de la población mundial (Herramientas de la Economía Circular, 2022).

Existe un gran avance en tecnologías que han permitido incrementar la eficiencia y productividad de los recursos, es decir, han permitido hacer más con menos. Sin embargo, esto no será suficiente, ni cambiará sistemáticamente el modelo de Economía Lineal (EL) de tomar, usar y desechar, por esta razón, la Economía Circular (EC) propone un modelo de producción y consumo diferente, basado en la restauración y regeneración de los recursos, preservando el valor de los materiales al máximo en todo momento. De esta manera, se entiende como un ciclo que optimiza el uso de recursos y su rendimiento, y previene los riesgos de externalidades y desabastecimiento de recursos escasos. En la **Figura 2** podemos ver de manera conceptual las diferencias en los procesos.

Figura 2

Visiones sobre los procesos económicos: Economía lineal vs Economía circular



Fuente: Imagen obtenida de la web https://relevocontigo.com/wp-content/uploads/2019/06/diagrama_orig-1024x293.png.webp

Aunque existen diversas definiciones de le Economía Circular, una ampliamente aceptada es la propuesta por la Fundación Ellen MacArthur de:

Sistemas de producción y consumo que promuevan la eficiencia en el uso de materiales, agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil a través de la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores y

el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible. (Ellen MacArthur Foundation, 2022)

¿Cuál es la diferencia entre el reciclaje y la economía circular? El reciclaje comienza en la etapa de 'desecho', al final del ciclo de vida de un producto, por otro lado, la economía circular inicia desde la planeación “desde cero” para evitar que se produzcan desechos y contaminación. El reciclaje no será suficiente para combatir la enorme cantidad de desechos que producimos a la luz de los desafíos ambientales actuales. “En una economía circular debidamente construida, uno debería centrarse más bien en evitar la etapa de reciclaje a toda costa. Puede sonar sencillo, pero evitar que se generen desechos en primer lugar es la única estrategia realista” (Ellen MacArthur Foundation, 2022).

La economía circular se basa en tres principios, impulsados por el diseño:

- Eliminar los desechos y la contaminación,
- Hacer circular productos y materiales (a su valor más alto),
- Regenerar la naturaleza.

Para que la industria de la construcción avance hacia una economía circular serán necesarios una serie de cambios conceptuales, cambios culturales, ajustes a los modelos de producción y negocios, estrategias de gestión e incluso de gobernanza. El campo de la economía circular requiere un aprendizaje constante, flexibilidad en los enfoques, análisis y medición de los procesos, por ende, de los resultados fomentar la colaboración dentro y fuera de las cadenas de valor y generar nuevas relaciones de confianza. (CONAMA, 2018, p. 25)

Si bien, algunos procesos en la industria de la construcción reutilizan materiales, elementos o flujos, en su conjunto se basa generalmente en procesos lineales (Figura 3) y el cierre de ciclos ocurre con mayor frecuencia durante la fase de producción que entre fases. Actualmente, el proceso de demolición no representa un porcentaje notable de recuperación de materiales o componentes al final de la vida útil del edificio, ya que no siempre es posible la separación de los materiales desde la fuente y la gestión de los RCD normalmente acaba en el vertido. Por otro lado, el conocimiento y la información no siempre son compartidos por los expertos que trabajan en cada fase, como resultado, la industria está lejos de tener un modelo basado en la economía circular si no se trabaja en conjunto. (CONAMA, 2018, p. 10)

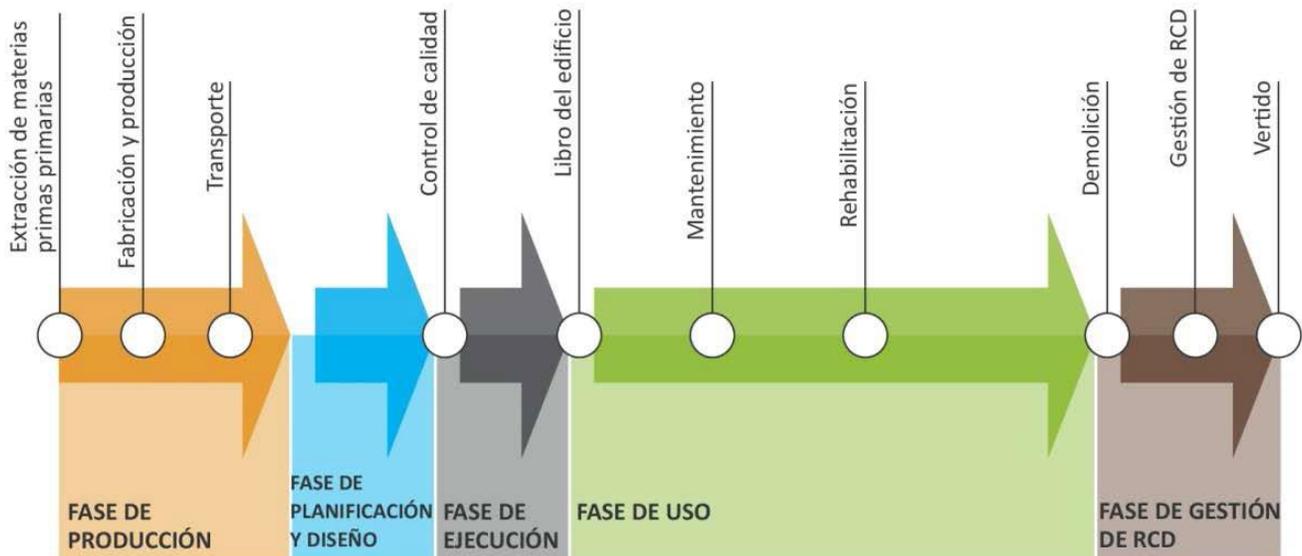
Sin embargo, existe un gran potencial para alcanzar un modelo circular si los distintos agentes y procesos implicados trabajan para adaptarse a medida que cambien los procesos económicos del sector de la construcción.

De acuerdo con el diagrama de la Figura 4, la fase de planificación, diseño y la fase de producción deben trabajar juntas para preparar todo lo que sucederá durante la fase de ejecución. Es fundamental que los profesionales que trabajan en estas tres fases

colaboren y compartan conocimientos, y que las distintas administraciones implicadas estén supervisadas y reguladas. (CONAMA, 2018, p. 11)

Figura 3

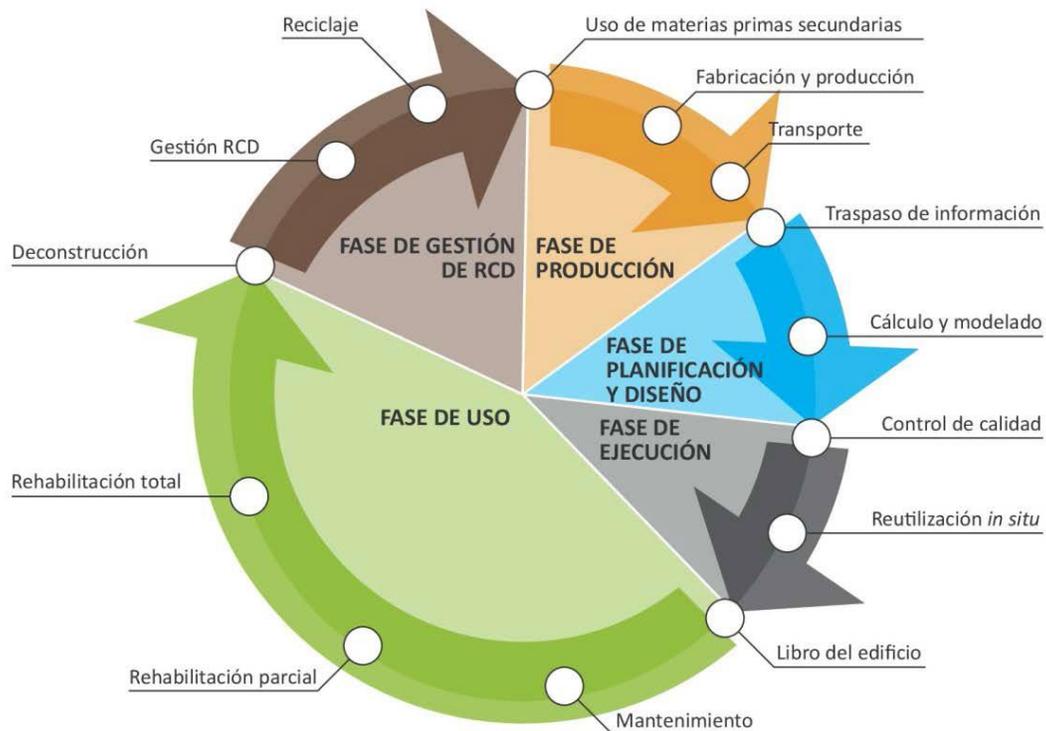
Esquema simplificado del proceso convencional del sector de la construcción - Economía Lineal (EL)



Fuente: Imagen obtenida de: Economía Circular en el sector de la construcción (CONAMA, 2018, p. 13).

Figura 4

Esquema simplificado del proceso futuro del sector de la construcción - Economía Circular (EC)



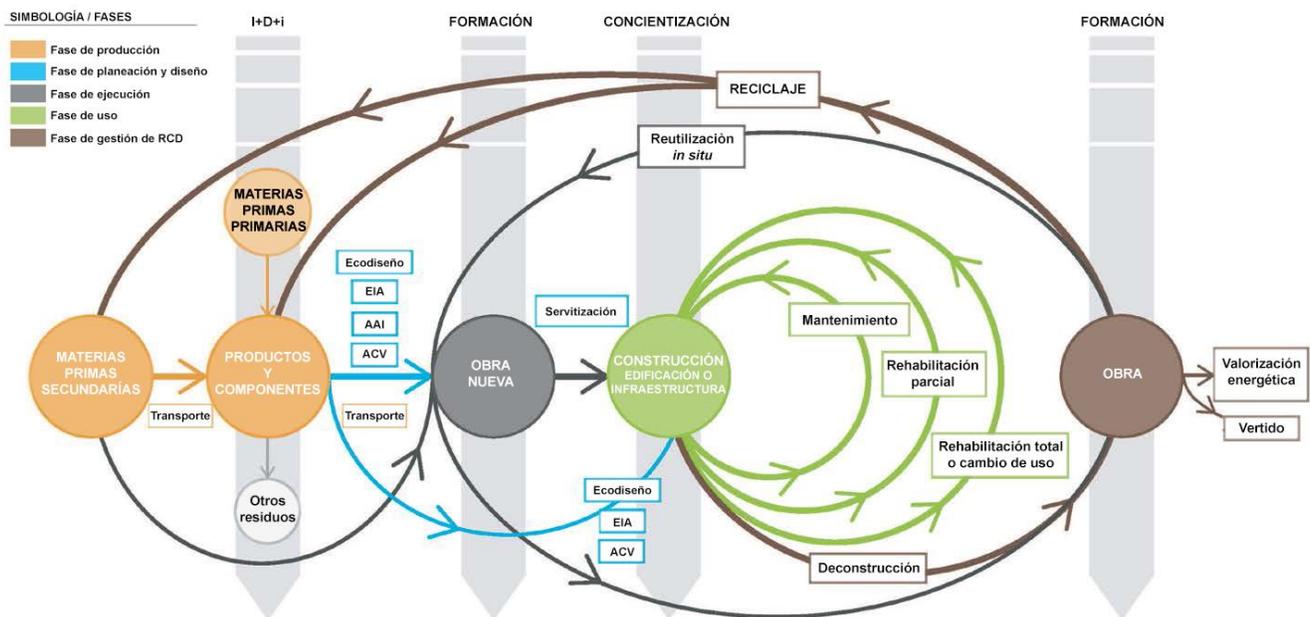
Fuente: Imagen obtenida de: Economía Circular en el sector de la construcción (CONAMA, 2018, p. 11).

Hay una transferencia de responsabilidad en la construcción entre los distintos profesionales hacia los usuarios entre la fase de ejecución y la fase de uso. El usuario necesita tener una mejor comprensión del diseño que permita el uso a largo plazo a través del mantenimiento, rehabilitación parcial o la rehabilitación total, además, deberá poseer el criterio para ponerse en contacto con los expertos según sea la necesidad. Todo esto para asegurar durante la fase de gestión de RCD el máximo retorno de todos los materiales y componentes a las etapas anteriores con un proceso la deconstrucción o demolición selectiva del edificio. (CONAMA, 2018, p. 11)

Aún existen barreras y por tanto retos dentro del sector de la construcción para el desarrollo de una economía circular, en este apartado se presentarán algunos, siendo conscientes que se requiere aún de un análisis más detallado para determinar con precisión algunas posibles medidas más apropiadas para solventarlas (Figura 5). A continuación, se exponen aquellos que se consideran más importantes en cada etapa del ciclo circular de los materiales para la construcción (CONAMA, 2018, pp. 25-41).

Figura 5

Esquema completo de Economía Circular (EC) para la industria de la construcción



Fuente: Imagen intervenida obtenida de: *Economía Circular en el sector de la construcción* (CONAMA, 2018, p. 12). Notas: EIA (Evaluación de impacto ambiental), AAI (Autorización ambiental integrada), ACV (Análisis del ciclo de vida).

Selección y extracción de materias primas: Es necesaria la selección de materiales de calidad y con elevada durabilidad que generen bajo impacto en su ciclo de vida. Para los materiales que se producen a partir de materias primas procedentes de la industria extractiva, se debe considerar que sean 100% reciclables tras el proceso de demolición o deconstrucción, debe asegurarse su separación evitando que se contaminen por otros residuos. “Cuando esta gestión se realiza adecuadamente, estos materiales se pueden reciclar para obtener subproductos o materias primas secundarias” (CONAMA, 2018, p.28).

Productos de construcción: El desarrollo de productos de construcción que se utilizarán en la obra es un paso crucial porque influye en cómo se aplican los criterios de economía circular. “El campo

de ecodiseño aplicado a los productos de construcción necesita ser promovido para crear productos lo más sostenibles posible, teniendo en cuenta todas las variables ambientales” (CONAMA, 2018, pp. 28-29).

Fase de planificación y diseño: Una de las fases fundamentales de la construcción es la planificación y el diseño, durante la cual se toman decisiones que afectan a todo el proceso y determinan si se aplicarán o no diversas acciones relacionadas con la economía circular. La construcción debe aplicar principios de ecodiseño, suponiendo un reto especialmente desafiante, estos deben aplicarse tanto a obra nueva como a la rehabilitación. Se han identificado los siguientes principios de ecodiseño para fomentar en la construcción (CONAMA, 2018, pp. 29-31):

- Alta durabilidad y calidad
- Que facilite su mantenimiento
- Que sea reparable
- Que permita su rehabilitación
- Flexibilidad de uso: que permita su reconversión en otra tipología o distinto uso
- Que sea deconstruible: su diseño debe permitir una demolición selectiva para una mayor reutilización y reciclado de sus componentes
- Resilientes (cambios de usos, cambio climático, otros riesgos que se identifique de forma específica en el contexto)
- Alto rendimiento (intensidad de uso, no espacios vacíos no justificados), alto confort, bajo consumo

Fase de ejecución de obra: “Es durante esta fase del ciclo cuando se genera la mayor parte de los residuos de construcción, agrupados en dos tipos: tierras de excavación y RCD propiamente dichos” (CONAMA, 2018, p. 32):

- Históricamente las tierras sobrantes de excavación han sido gestionadas a través de la reutilización, por lo tanto, es crucial prevenir su contaminación.
- En lo que respecta a la reutilización de RCD, el control de calidad de los materiales, los procesos y la adecuada formación de los responsables de la obra son un punto importante a tener en cuenta durante la fase de construcción. “Un buen control de calidad y una buena gestión de procesos pueden implicar la reducción en el uso de materiales, evitar costes adicionales, trabajo, materiales, energía y agua” (CONAMA, 2018, pp. 32-33).

Uso, mantenimiento y rehabilitación: “La fase de utilización de las infraestructuras y la edificación se convierte dentro del esquema de la economía circular en una etapa clave para mantener los recursos naturales el mayor tiempo posible” (CONAMA, 2018, p. 33).

- Las operaciones de mantenimiento son especialmente importantes, aunque son más comunes y están más reguladas en infraestructuras que en edificios. En el caso de edificaciones, es necesario conocer mejor su funcionamiento y sus instalaciones para dar un buen uso y aplicar los estándares adecuados de mantenimiento.
- La rehabilitación de infraestructuras y edificios, ya sea parcial o total, para el mismo uso o para otro diferente, permite aprovechar los recursos disponibles, al mismo tiempo que los renueva, igualando o mejorando sus beneficios (CONAMA, 2018, pp. 33-34).

Demolición al final de la vida útil: La demolición selectiva es uno de los principales retos al final del ciclo de vida, en otras palabras, que un edificio o pieza de infraestructura llegue al final de su vida útil y logre ser desmontado en partes o componentes permite la gestión de los recursos y logra altas tasas de reciclaje, si eso no es posible, se optaría por la revalorización a través de la recuperación. Para que este desmontaje o demolición selectiva sea viable, es necesario que este punto haya sido considerado durante la fase de proyecto (CONAMA, 2018, p. 35).

Residuos de construcción y demolición: Es necesaria la aplicación de los protocolos de gestión de residuos de construcción y demolición, “con el objetivo de aumentar la confianza en el proceso de gestión de los RCD, así como la confianza en la calidad de los materiales reciclados procedentes de ambas actividades. Asimismo, la aplicación permitirá alcanzar los siguientes objetivos” (CONAMA, 2018, pp. 35-40):

- Aumento de la demanda de materiales reciclados de construcción y demolición.
- Promoción de (nuevas) actividades y actores empresariales en el sector de la infraestructura de los residuos.
- Aumento de la cooperación a lo largo de la cadena de valor de los residuos de construcción y demolición.
- Avance hacia la consecución de los objetivos de los residuos de construcción y demolición.
- Avance hacia mercados para los materiales reciclados de construcción y demolición.
- Generación de estadísticas fiables sobre los residuos de construcción y demolición.
- Reducción del impacto medioambiental y contribución a la eficiencia de los recursos.

Reciclaje y materias primas secundarias: Lograr transformar los residuos para obtener materias primas secundarias y a la vez contribuir a utilizar menos recursos naturales, es uno de los mayores retos. Hay cinco factores que se han considerado determinantes (CONAMA, 2018, pp. 40-41):

- Es necesaria una mejor gestión de los residuos en obra para garantizar una adecuada recogida selectiva de residuos.
- El coste de la logística y la gestión de los residuos son determinantes para que la distancia no encarezca el precio de dicha materia prima secundaria.
- Dos tipos diferentes de carga burocrática. Por un lado, la conversión de residuos en materias primas secundarias, lo que requeriría una revisión de la optimización de los procedimientos administrativos para hacerlos lo más sencillos posible, garantizando el pleno nivel de protección del medio ambiente y la salud. Por otro lado, la eliminación de obstáculos al transporte de materias primas secundarias.
- Incrementar la confianza en las materias primas secundarias. Generar un sistema de calidad que permita certificar o garantizar las condiciones y características de dichos materiales para que puedan ser incorporados en el mercado.
- El mercado de recuperación de residuos debe expandirse a través de acciones como:
 - Fomentar convenios sectoriales para promover la comercialización de materias primas secundarias.
 - Revisar la posibilidad para implementar la obligatoriedad de uso o requisitos mínimos donde un porcentaje de los materiales en obra sean reciclados.
 - Estímulos gubernamentales para la utilización de materias primas secundarias.

Análisis del ciclo de vida de los materiales de construcción

Para el análisis del ciclo de vida de los materiales de construcción, se inicia este tema retomando las palabras de Vefago (2012) y de como un material pasa a considerarse un residuo.

Un producto que tiene alguna utilidad se denomina material, y cuando este *material* pierde su utilidad por alguna razón se le llama *residuo*. El residuo generalmente se considera como no agradable pero normalmente inevitable. El termino *ciclo de vida* proviene de la naturaleza, en el cual los organismos vivos nacen, se desarrollan y muere, por lo tanto, se trata del camino de un organismo y su interacción con el medio ambiente.

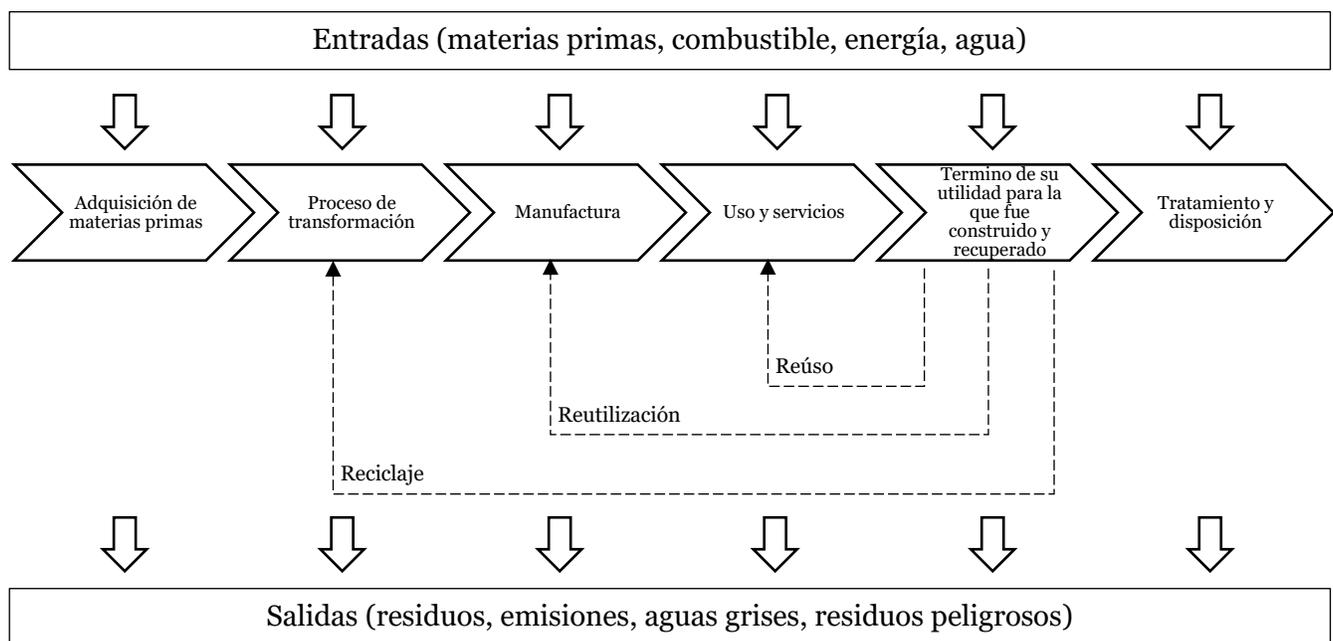
De manera similar, los materiales de construcción también un ciclo de vida que inicia con la extracción de la materia prima, pasa por la fabricación del producto, para ser utilizado con un determinado objetivo, al final se descarta en un vertedero o se reincorpora a un nuevo ciclo con la elaboración de nuevos productos. El ciclo de vida de un material llega a su fin debido a diferentes factores, tales como vida física, funcional, capacidad tecnológica, económica o legal, otros factores independientes de la capacidad del material son la demolición o deconstrucción. (Vefago, 2012, p. 81)

El análisis del ciclo de vida (ACV o LCA en inglés) es una metodología para evaluar la carga ambiental de procesos y productos (bienes y servicios) durante su ciclo de vida desde la cuna hasta la tumba. El ACV se ha utilizado en el sector de la construcción desde 1990 y es una herramienta importante para evaluar materiales, sistemas y edificaciones (Ortiz et al., 2009, pp. 2-3).

El análisis del ciclo de vida de los materiales se ha convertido en una metodología ampliamente utilizada debido a que se basa en estándares internacionales, evaluando sus impactos medioambientales y manteniendo la calidad de los datos. Esta metodología permite evaluar los impactos de los productos o servicios de una forma integral, tomando en cuenta todas las variables involucradas (Boletín Sustentabilidad, 2012). Observaremos este proceso en la Figura 6.

Figura 6

Ciclo de vida (adaptado de ISO 14040:2006, Gestión Ambienta – Evaluación de Ciclo de Vida – Marco y Principios)



Fuente: Elaboración propia con datos del Boletín de Sustentabilidad (2012, p. 2).

Consta de cuatro pasos analíticos distintos: Marco (diferir el objetivo y el alcance, inventario, evaluación de impactos y finalmente la interpretación de los resultados).

Ortiz (2009) en su revisión resume estas etapas.

- Primera etapa, en el marco se define el objetivo y el alcance que implica definir el propósito, la

recepción y los límites del sistema.

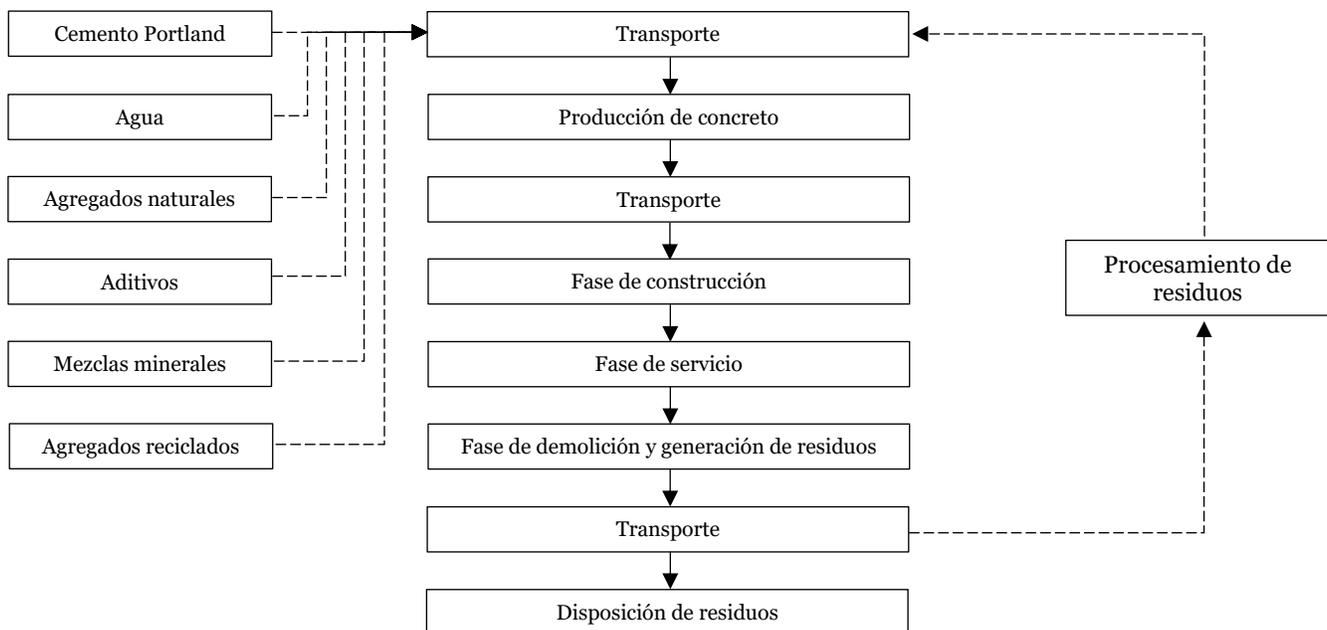
- Segunda etapa, el inventario del ciclo de vida implica recopilar los datos para cada proceso unitario respecto a todas las entradas y salidas relevantes.
- Tercera etapa, la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida, evalúa los impactos ambientales potenciales y estima los recursos utilizados en el sistema modelado.
- Cuarta etapa, la última fase es la interpretación de los resultados para identificar problemas significativos, evalúa hallazgos para llegar a conclusiones y formular recomendaciones. El informe final es el elemento que completa las fases de ACV.

Las metodologías más recientes que incorporan información sobre los impactos ambientales y la energía incorporada en los materiales de construcción son necesarias para el desarrollo sostenible. Estudios han concluido que el material utilizado en casa habitación con el mayor nivel de energía incorporada es el concreto con un 61% y que es responsable del 99% del total de las emisiones CO₂ en la construcción de viviendas (Ortiz et al., 2009). Es por esto que las metodologías para materiales de construcción como los materiales reutilizados y los eco-materiales han llamado la atención en las investigaciones. Seleccionar materiales duraderos y renovables es una alternativa para promover las buenas prácticas y técnicas como el reciclaje, la reutilización y la recuperación de materiales son estrategias que se han comprobado como adecuadas para la compensación y mitigación de los impactos (Boletín Sustentabilidad, 2012, p. 4).

El ACV aplicado al concreto ha dado lugar a numerosos estudios con el fin de aumentar la sustentabilidad del material, considerando su importancia socioeconómica a nivel mundial. Muchos puntos en el ciclo de concreto, ilustrados en la [Figura 7](#), actualmente se están estudiando para hacer que este material sea más sostenible. Los estudios sobre las mezclas de concreto se enfocan en sustituir la gran cantidad de cemento y en el uso de agregados reciclados, siempre con la cautela para mantener la calidad del material, asegurando la mayor vida útil posible en la etapa de servicio (Vieira et al., 2016, p.7).

Figura 7

Ciclo de vida del concreto



Fuente: Elaboración propia con datos de (Vieira et al., 2016).

Actualmente, es posible clasificar los estudios de ACV sobre concreto en 3 límites del sistema: de la cuna a la puerta, de la cuna a la tumba y de la cuna a la cuna, en tendencia esta última. En estos análisis, el uso de residuos reciclados como agregados en la producción de concreto, se debe prestar mucha atención a los tipos de transporte utilizados en el proceso y la distancia desde la planta de procesamiento de residuos para asegurar una compensación económica y ambiental (Vieira et al., 2016). En países como lo es México en vías de desarrollo, existe una gran necesidad de incorporar residuos reciclados al inicio del ciclo de vida del concreto y de transformar los residuos generados al final de este y así generar insumos para el mismo sistema productivo o de otro sistema.

1.2. Agenda 2030: Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

Uno de los principales desafíos a escala mundial es conseguir un desarrollo sostenible. En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible (ODS), una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendan un nuevo camino, con el cual mejorar la vida de todos. (ODS, 2015). La agenda cuenta con 17 objetivos (Figura 8), cada objetivo tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos años. Donde textualmente dice:

Los Objetivos de desarrollo sostenible son el plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos. Se interrelacionan entre sí e incorporan los desafíos globales a los que nos enfrentamos día a día, como la pobreza, la desigualdad, el clima, la degradación ambiental, la prosperidad, la paz y la justicia. Para no dejar a nadie atrás, es importante un esfuerzo integral para cumplir con cada uno de estos objetivos. (ODS, 2023)

Figura 8
Objetivos de desarrollo sostenible



Esta investigación tiene como fundamento el desarrollo sustentable, que específicamente podemos relacionar con metas a alcanzar de los ODS, como:

Objetivo 9 – Agua, industria, innovación e infraestructura: enfocado a construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación (ODS 9, 2015).

De aquí a 2030 es prioridad:

- Modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.
- Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente.
- Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas.

Objetivo 11 – Ciudades y comunidades sustentables: con meta a lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles (ODS 11, 2015).

De aquí a 2030 es prioridad:

- Aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países.
- Redoblar los esfuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural y natural del mundo.
- Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo.
- Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional.
- Aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres, y desarrollar y poner en práctica.

Objetivo 12 – Producción y consumos responsables: para garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles (ODS 12, 2015).

De aquí a 2030 es prioridad:

- Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
- Lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.
- Reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.
- Alentar a las empresas, en especial las grandes empresas y las empresas transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes.
- Promover prácticas de adquisición pública que sean sostenibles, de conformidad con las políticas

y prioridades nacionales.

- De aquí a 2030, asegurar que las personas de todo el mundo tengan la información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible y los estilos de vida en armonía con la naturaleza.
- Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles.

1.3. Experiencia internacional y buenas prácticas

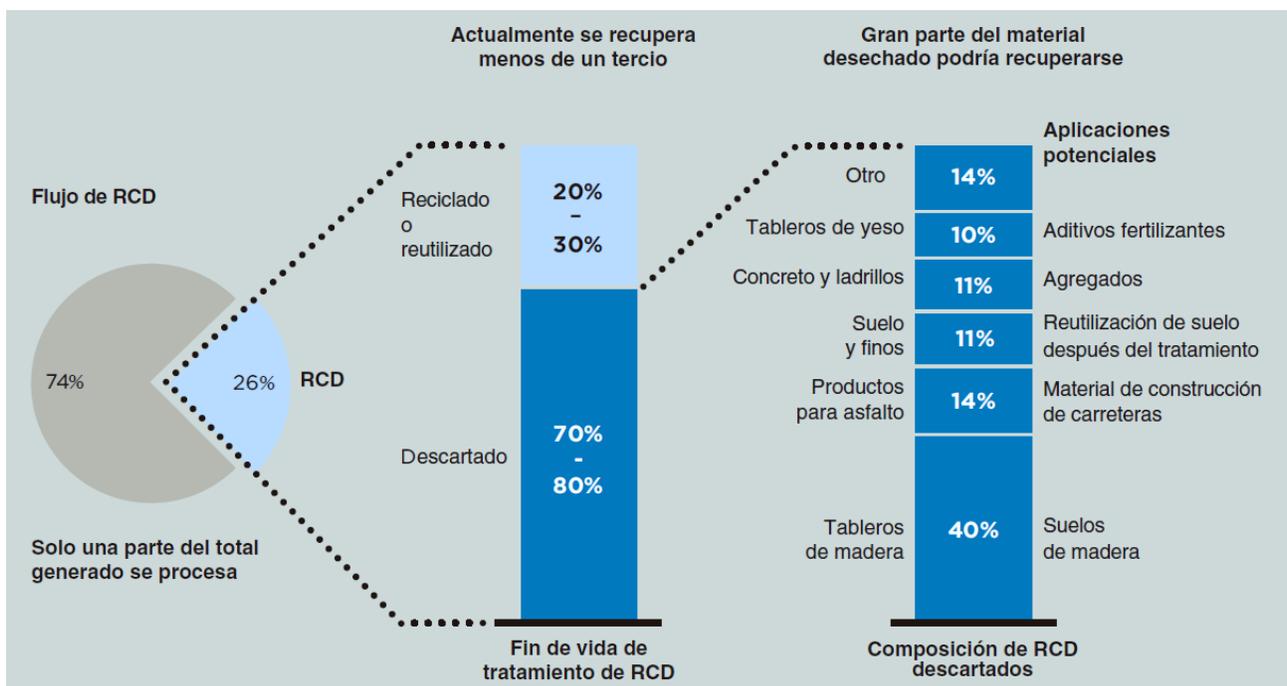
Recircular, reusar, reciclar y disminuir el uso de materiales no es tarea fácil, el modo convencional es comprar, consumir y botar. Parece algo aceptar el entendimiento de que los productos que desechamos aún tienen valor para ser recuperados y aprovechados. Requerimos un cambio cultural para entender el nuevo modelo de la economía circular e inversiones en nueva tecnología para alcanzar una verdadera transformación productiva.

La innovación tecnológica es un elemento indispensable de la economía circular, esta difícilmente avanzará sin ella. La circularidad pretende diseñar procesos que contengan menos material, energía y agua, a través de la implementación de nuevas tecnologías que logran recuperar componentes de valor de los residuos desechados. Además, se inspira en la naturaleza al buscar generar ciclos circulares en los que los residuos de una empresa pueden ser los insumos de otra. Otras innovaciones tecnológicas asociadas a la EC incluyen nuevos diseños de productos que incorporen materiales reciclados y que generan menos residuos (Herramientas de la Economía Circular, 2022).

En una economía circular, los productos están diseñados para que sean fáciles de reutilizar, desmontar, reacondicionar o reciclar, entendiendo que es la reutilización de grandes cantidades de material recuperado de productos al final de su vida útil, en lugar de la extracción de recursos, ese es el objetivo (Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 15).

Figura 9

Flujo de RCD: posibles aplicaciones potenciales para el aprovechamiento de residuos descartados en el procesamiento de RCD



Fuente: Imagen reinterpretada al español, obtenida de *Towards the Circular Economy vol.1* (Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 18)

En la producción de bienes, se pierden volúmenes significativos de materiales dentro de la cadena, entre la extracción y la fabricación final, las pérdidas son evidentes a nivel de industrias específicas. Para efectos de esta investigación nos enfocamos en los residuos producidos por la industria de la construcción durante los trabajos de obra y demolición de edificios, donde desde una perspectiva internacional se tiene que solo del 20 al 30 % de todos los desechos de construcción y demolición se reciclan o reutilizan **Figura 9**, lo que resulta una pérdida significativa de materiales valiosos (Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 17).

El sector de la construcción es el mayor consumidor de recursos naturales de cualquier economía, la utilización excesiva de la reserva de recursos disponibles y los centros urbanos cada vez más inflados han traído repercusiones en términos de contaminación y desequilibrio ecológico. La industria de la construcción es el mayor consumidor de materiales, utiliza entre el 35 y el 45% de los recursos y consume entre el 25 y el 40% de la energía mundial, en particular, el sector y sus cadenas de suministro locales y globales son responsables de una cantidad significativa de mala asignación de recursos y explotación de energía, combinados con emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se estima que el consumo de materiales de la construcción por habitante es de 9.4 ton, por año (CMIC, 2022).

Ahora, con datos obtenidos de la Cámara Mexicana de la industria de la Construcción (CMIC, 2022) analizaremos algunos ejemplos internacionales sobre su experiencia en la gestión de RCD y sus buenas prácticas en sus planes de manejo (CMIC, 2014g).

Alemania

A continuación se retoma información obtenida de (Gestión de residuos de construcción y demolición en Alemania, 2014a, pp. 1-2)

Breve historia de los residuos de construcción y demolición en Alemania:

Europa, y quizás Alemania en mayor medida, quedaron devastadas después de la Segunda Guerra Mundial. Alemania tenía recursos limitados, tanto materiales como financieros, ante esto, el gobierno y los profesionistas de la construcción se dieron cuenta del enorme volumen de residuos que se había producido, del orden de los 600 millones de m³ en el conjunto de las ciudades alemanas y de unos 75 millones de m³ sólo en el sector oeste de Berlín, advirtiendo el enorme potencial que tenía como fuente de materia prima ante la urgente necesidad de construcción. Como resultado, se desarrollaron una variedad de estrategias diferentes que incluyó la fabricación de concreto con materiales reciclados. (CMIC, 2014a, p.1)

Marco legislativo para los RCD: Debido a la presión de factores externos, Alemania desarrolló su legislación para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) con la premisa de fomentar el uso de materiales reciclados en nuevas construcciones, logrando con éxito la expansión de este mercado y creando un sistema de circuito cerrado de reciclaje. Como resultado, Alemania se ha convertido en un líder mundial en políticas ambientales y de gestión de residuos, con un historial de promulgación de políticas novedosas con excelentes resultados. La ley de la Unión Europea (UE), la ley federal, la

ley regional y los estatutos de los servicios de gestión de residuos de las autoridades locales sirven como base para la legislación actual de gestión de residuos en Alemania. (CMIC, 2014a, p. 1)

Gestión de RCD en Alemania: La base para la gestión de residuos en Alemania está en su política de uso de materiales en la construcción, ya que los productores y distribuidores de estos materiales están obligados a diseñarlos de tal manera que se reduzca la generación de residuos, permitiendo su valorización y eventual eliminación con el objetivo de disminuir el daño ambiental. Todos los residuos deben recogerse por separado y sumarse a la actividad económica de la industria de la construcción como parte de este proceso. Dado que RCD se puede recuperar ha habido una disminución significativa en su disposición en vertederos, por un lado influyen los elevados costos de eliminación de desechos y por otra parte aún más importante es que los materiales reciclados son de alta calidad. (CMIC, 2014a, p. 2)

Estados Unidos de América (EEUU)

A continuación se retoma información obtenida de (Gestión de residuos de construcción y demolición en los EEUU, 2014f, pp. 1-5)

Breve historia de los residuos de construcción y demolición en EEUU: Desde la era de la Gran Depresión hasta bien entrada la década de 1970, el vertido de residuos a cielo abierto fue la forma de tratamiento más popular. La Ley de conservación y recuperación de recursos de 1976 “*Resource Conservation and Recovery Act*” (RCRA), estableció los requisitos mínimos para el desarrollo y mantenimiento de rellenos sanitarios, también obligó al cierre de vertederos al aire libre en todo el país. Esto aumentó significativamente el costo de disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) y supuso el reciclaje de RCD como una alternativa económicamente viable. Todavía se desconoce la cantidad de RCD mezclado con RSU en los vertederos, pero se estima que el 48% se recuperó en 2003 y el resto se contuvo en sitios específicos. (CMIC, 2014f, p. 1-2)

Marco legislativo para los RCD: Los RCD no están expresamente regulados a nivel federal en los EEUU, pero la eliminación de desechos sólidos y peligrosos está cubierta por la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos de 1976, estableciendo los siguientes objetivos principalmente. (CMIC, 2014f, p. 3):

- La protección de la salud humana y el medioambiente frente a los riesgos potenciales de eliminación de residuos.
- La conservación de energía y recursos naturales.

- Reducir la cantidad de residuos generados.
- Asegurar que los residuos sean manejados en forma ambientalmente racional.

Programas que incentivan la gestión de RCD: Existen incentivos para que los RCD no sean dispuestos en tiraderos (CMIC, 2014f, p. 5):

- *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)*, la eficiencia de los recursos es una de las áreas de la salud ambiental que se aborda específicamente en el programa LEED, que certifica que los edificios cumplen con los estándares de sostenibilidad. Un proyecto recibe puntos si reduce el volumen de RCD desechado en vertederos.
- *Enterprise Community Partners*, administra la iniciativa nacional para construir viviendas ecológicas para familias de bajos ingresos, con criterios que relacionan el diseño, la fabricación, la eficiencia de los recursos, la salud ambiental y el mantenimiento.
- El *National Green Building Standard*, utilizado como base para los códigos de construcción en los EEUU, este programa certifica el diseño del sitio, la eficiencia de los recursos, la eficiencia del agua, la eficiencia energética, la calidad ambiental interior, la operación y el mantenimiento de la construcción.
- Programa cubierta *AirPlus* de la EPA, certificado para operar a un nivel más alto de eficiencia energética que los hogares típicos.

España

A continuación se resume información obtenida de (Gestión de residuos de construcción y demolición en España, 2014e, pp. 2-4)

Breve historia de los residuos de construcción y demolición en España: A raíz del proyecto de la Comunidad Europea, que supuso la aprobación de la "Directiva 75/442/CEE, Marco de Residuos" entre 1973 y 1976, la cuestión sobre la generación y gestión de residuos en España adquiere carácter oficial. La publicación de la Ley 42/1975, que trataba de los RSU y se encargaba de regular los residuos de la construcción y demolición (RCD), logrando un impacto directo en España ya que por ello los gobiernos de algunas autonomías comenzaron a publicar planes de gestión de estos residuos. (CMIC, 2014e, p. 2)

Con el apoyo y la experiencia adquirida el Ministerio de Medio Ambiente elaboro el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR 2008-2015), por el que se regula la producción y la gestión de los RCD que contempla el principio de responsabilidad del productor y el poseedor a estos residuos. Entre las acciones que propone destacan los siguientes. (CMIC, 2014e, pp.2-3):

- Prohibir el depósito de RCD en los tiraderos sin tratamiento previo.
- Durante todo proyecto se debe incluir un análisis para la gestión de RCD y una valoración de los costos previstos.
- Planear la separación y clasificación de los residuos.
- Fomentar los acuerdos voluntarios entre los responsables para la gestión de los residuos y los responsables de la restauración de los espacios ambientalmente degradados (CMIC, 2014e, p. 3).

Gestión de RCD / obligaciones de los generadores de residuos de construcción y demolición: El generador se compromete a elaborar y entregar un estudio para la gestión del RCD, que deberá como mínimo (CMIC, 2014e, p. 4):

- Estimación de la cantidad de los RCD (peso=ton o volumen=m³).
- Medidas para la prevención de residuos.
- Acciones para la reutilización, valorización o eliminación.
- Procedimientos para la separación de los residuos de obra.
- Facilidades para el manejo, almacenamiento, clasificación y otras operaciones de manejo de RCD de la obra, según sea necesario.
- Valorización del costo previsto de la gestión de los RCD.

Brasil

A continuación se retoma información obtenida de (*Gestión de residuos de construcción y demolición en Brasil*, 2014b, p. 1-2)

Breve historia de los residuos de construcción y demolición en Brasil: El problema de los residuos sólidos en Brasil refleja una tendencia mundial que ve la producción de residuos en cantidades mayores y más variadas en los principales centros urbanos. Esta nación presenta un importante atraso en la creación de proyectos de manejo de residuos, resultado de las dificultades políticas que ha enfrentado y las escasas inversiones realizadas en esta materia. La industria de la construcción en Brasil juega un papel importante en la economía del país porque crea directa o indirectamente una gran cantidad de puestos de trabajo. Por otro lado, también representa casi la mitad de la producción de residuos sólidos del país y cerca de la mitad de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. (CMIC, 2014b, p. 1)

Impacto ambiental en el sector de la construcción: Cada año se producen alrededor de 35 millones de toneladas de cemento en Brasil, este cemento se combina con agregados para crear concreto, estos agregados se estiman podrían llegar hasta 210 millones de toneladas. Como resultado, los agregados naturales han comenzado a escasear en las zonas aledañas, obligando a transportar la arena natural de distancias mayores a los 100 km, impactando en un mayor uso de energía e incremento de la contaminación. (CMIC, 2014b, p. 2)

Marco legislativo para los RCD: En Brasil, las políticas públicas dirigidas a la gestión de residuos buscan apoyar el desarrollo de negocios con una nueva perspectiva, así como implementar medidas de control para la reducción de residuos que todavía son considerados poco usuales o desconocidas.

La publicación de la Resolución N° 307/2002R del Consejo Nacional del Medio

Ambiente (CONAMA) es la principal acción legalmente vinculante que se ha completado, en vigencia desde enero de 2003. La resolución establece la creación del Plan de Manejo de Residuos de la Construcción (PGRCC), como un trámite para solicitar un permiso integral de construcción, requisito que debe estar listo desde el inicio de la obra y presentado a nivel municipal. En esta resolución se contempla la elaboración por parte de las constructoras del Plan de Manejo Integral de Residuos Construcción Civil, que deberá incluir lineamientos técnicos del Programa Municipal de Gestión de Residuos de la Construcción Civil. (CMIC, 2014b, p. 2)

Chile

A continuación se retoma información obtenida de (*Gestión de residuos de construcción y demolición en Chile*, 2014c, p. 1-6)

Breve historia de los residuos de construcción y demolición en Chile: A partir de 1998 Chile comenzó a abordar seriamente los problemas ambientales relacionados con el sector de la construcción. uniéndose a la organización mundial *Green Building Challenge* e involucrándose directamente en el tema de la construcción sostenible, lanzando iniciativas para elevar el estándar de la construcción en la nación.

En el año 2000 entra en vigor el Acuerdo de Producción Limpia (APL), el cual tiene como objetivo general el de servir como un instrumento de gestión que permita mejorar las condiciones productivas, ambientales, de higiene y seguridad laboral y de eficiencia energética. (CMIC, 2014c, p. 1)

Gestión ambiental de escombros y materiales de construcción: El 27 de febrero de 2010 la región centro-sur del país fue golpeada por un gran terremoto, dejando en ruinas kilómetros de infraestructura vial y destruyendo miles de viviendas. Debido a esto, toneladas de escombros se acumularon, dejando impotente al gobierno chileno, el cual se vio obligado a disponer de los residuos en espacios públicos, generando graves problemas de contaminación. (CMIC, 2014c, p. 2)

Medidas enfocadas a la gestión de RCD en Chile: El gobierno de Chile, trabajando con los organismos gubernamentales permitentes y las empresas constructoras representadas por la Cámara Chilena de la Construcción, ha iniciado un proceso gradual para abordar la necesidad e importancia de la Gestión de RCD. Algunas medidas que ha detectado son. (CMIC, 2014c, pp. 5-6):

- Sensibilizar a las autoridades sobre el compromiso financiero necesario para mantener un sistema de gestión de residuos de la construcción en la ciudad.

- Educar a los involucrados en la construcción para una adecuada gestión de los residuos de construcción.
- Para reducir la producción de residuos y pérdidas, plantear un diseño modulado para los espacios del proyecto.
- Elaborar un plan de acción y manejo para RCD y lugares de disposición final.
- Es importante la certificación de los sitios de disposición final y del organismo encargado de su administración para regular el manejo de los RCD en los lugares autorizados.

Colombia

A continuación se retoma información obtenida de (*Gestión de residuos de construcción y demolición en Colombia, 2014d, pp. 2-8*)

Breve historia de los residuos de construcción y demolición en Colombia: La producción de residuos de construcción y demolición ha aumentado en la última década junto con la industria de la construcción. Para dar una idea, la Secretaría Distrital de Planificación y Medio Ambiente de Bogotá estima una aportación de 2 toneladas per cápita, lo que representa una magnitud de producción alarmante si se compara con el promedio en Europa.

En Colombia, se ha impulsado la creación de normas legales que rijan la producción y gestión de RCD, con el objetivo de mejorar el entorno urbano, la reducción de la producción de residuos, el reciclaje de los que no se pueden reutilizar, la valorización energética de los que no se pueden reciclar y el depósito adecuado de todo lo que no se puede recuperar en un vertedero. (CMIC, 2014d, p. 2)

Gestión de los residuos de la construcción: El desarrollo de estándares es un intento de detener el deterioro ambiental, pero esto requiere un cambio radical en la mentalidad de todas las partes involucradas, solo con la participación activa es posible acercarse a la sostenibilidad global de la actividad constructora. Estos pasos deben tomarse con la intención de reducir los desechos a largo plazo y maximizar el uso de materiales reciclables. (CMIC, 2014d, p. 3)

Por lo anterior, se toman como prioritarios los siguientes proyectos (CMIC, 2014d, pp. 7-8):

- Estrategia de producción sostenible. Mediante la sustitución de insumos y productos finales recuperables o biodegradables, lo cual pretende reducir la cantidad de residuos generados.
- Una tradición de minimización de residuos y separación desde el origen. A través de campañas de mercadeo sobre las ventajas del reciclaje, la separación en el origen y la disposición diferenciada de residuos sólidos.
- Para la transformación de los residuos sólidos recuperados, el proyecto tiene como objetivo implementar un diseño técnico y financiero del modelo de reciclaje que describa las distintas rutas de acopio, centros de acopio y parques industriales.
- Escombros cero. Se refiere a crear e implementar un modelo para la gestión eficiente y

sostenible de los residuos en la ciudad, educando a la población sobre la importancia de una mayor recuperación de recursos, la reincorporación a la construcción de la ciudad y el uso de plantas de reciclaje.

- Gestión integral de residuos especiales y peligrosos. A partir de la caracterización de residuos, diseñar e implementar un modelo eficiente y autofinanciable de manejo de residuos sólidos especiales y peligrosos.

Aspectos a tener presentes por el responsable de RCD de la obra: Se requiere un directorio de posibles compradores y vendedores de materiales usados o reciclados cercanos para reducir y reciclar todos los desechos generados, además, todo el personal del sitio debe estar consciente de sus responsabilidades con respecto al manejo de desechos.

En obra, es importante promover el reciclaje y reutilización de los materiales, los cuales deben mantenerse separados entre sí mediante contenedores especiales para cada tipo. Esto aumentará la probabilidad de reciclaje y reutilización.

Para controlar la ruta de los residuos desde su origen hasta su destino final durante el transporte, es necesario detallar en un formulario los residuos que se transportarán y verterán. Este documento también ayudará en la planificación de la eliminación de residuos en el futuro. (CMIC, 2014d, p. 8)

1.4. Reflexión capitular

La industria mundial de la construcción sigue creciendo, porque las actividades de construcción contribuyen al crecimiento económico y a la calidad de vida de la población. Sin embargo, entre sus diferentes impactos, la producción de masiva de residuos de construcción y demolición ejerce tal presión al medio ambiente que se ha vuelto insostenible y con los métodos convencionales los recursos naturales se agotaran rápidamente.

Hace algunos años en la Ciudad de México no se habría pensado en reutilizar residuos de construcción como fuente de agregados para nuevos materiales, dado que hay un suministro abundante de materias primas, no obstante, numerosos estudios alrededor del mundo han comprobado que los materiales reciclados pueden sustituir satisfactoriamente los agregados naturales, como una manera de transformar el sector de la construcción en una actividad sostenible. (CMIC, 2014, p. 2)

Esta revisión se analizaron conceptos que demuestran que un cambio de paradigma de una economía lineal (EL) a una economía circular (EC) es crucial para reducir los efectos negativos generados por la industria, al llevar una gestión eficiente de los residuos de la construcción al contemplar: la reducción, reutilización, reciclado y otras formas de revalorización. Y que al aplicar análisis del ciclo de vida (ACV) de los materiales y del entorno construido, es posible optimizar los procesos en todas sus fases del proyecto, construcción, utilización, mantenimiento y demolición.

La adopción de este tipo de acciones tanto por parte de la obra pública como de la iniciativa privada depende de la educación, que es un componente crucial. Se debe reforzar el concepto de construcción sostenible mediante la reducción de pérdidas materiales y la minimización de la generación de residuos, por lo que es necesario educar en buenas prácticas a los profesionales del sector ya la sociedad en su conjunto. (CMIC, 2014, p. 9)

La presión que ejerce la especie humana sobre el medio natural a través de la extracción de materiales y la generación de residuos es ampliamente reconocida, por lo cual existe una necesidad apremiante de hacer la transición hacia un futuro más sostenible.



CAPÍTULO 2

2. Residuos de construcción y demolición (RCD)

La norma ambiental NACDMX-007-RNAT-2019 define los residuos de construcción y demolición (RCD) como “materiales, productos o subproductos generados durante las actividades de construcción tales como: construcción, modificación, remodelación, ampliación, adecuación, rehabilitación, restauración, reparación, sustitución de infraestructura, conservación, mantenimiento, instalación, demolición u otras; así como el producto proveniente de la excavación cuando se haya alterado en sus condiciones físicas, químicas y biológicas originales” (NACDMX-007-RNAT-2019, 2021, p. 5).

Debido al peso de las inversiones la industria de la construcción está estrechamente relacionada con los entornos financieros y económicos nacionales y mundiales. Además, de hacer uso de materiales de diferentes industrias impactando positivamente a más de 63 de las 79 ramas de la actividad productiva en el país, lo que vuelve a la industria de la construcción uno de los principales motores de la economía a nivel nacional. (Plan de manejo de residuos de la construcción y demolición, 2014, p. 7)

Sin embargo, como cualquier actividad económica que emplea insumos en su labor, los transforma y procesa, también genera residuos. Generalmente los residuos de la construcción y demolición no se aprovechan, cuando actualmente ya existen opciones para su reciclaje y reincorporación en diferentes obras y proyectos. Este tipo de residuos en algunos casos son depositados en sitios autorizados, pero en mayor volumen son vertidos en tiraderos clandestinos, como terrenos baldíos o en áreas ecológicas con un alto valor ambiental, que de manera general pueden provocar afectaciones en: agua, aire, suelo, flora, fauna, ecosistemas e infraestructura (PAOT, 2010).

La industria de la construcción ha evolucionado favorablemente en el aspecto técnico y operativo, sin embargo, un área de oportunidad está en la gestión y manejo integral de los residuos que genera en su actuar cotidiano, refiriéndose a las actividades de reducción en la fuente, separación, recolección, reutilización, reciclaje, co procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, incluyendo los requisitos de manejo ambiental, su gestión administrativa y su forma de verificación por parte de la Secretaría del Medio Ambiente. (NACDMX-007-RNAT-2019, 2021, p. 4)

Analizaremos algunas características relevantes entorno de los residuos de construcción y demolición, con el objetivo de reconocer los instrumentos que permiten restituir su valor económico, evitando su disposición final y recuperándolos como materiales secundarios.

2.1. Principales materiales que componen los residuos de construcción y demolición

La norma ambiental para la Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019 (2021), establece la clasificación de los residuos de la construcción y demolición (Tabla 1). Los RCD deben seleccionarse en el origen y entregarse en los sitios autorizados por la Secretaría o por la autoridad ambiental competente, de forma separada, para facilitar su valorización, en las siguientes categorías:

Tabla 1

Clasificación de los residuos de construcción y demolición

Categorías	Residuos
a) Concreto simple	Concreto de elementos prefabricados Concreto de elementos estructurales y no estructurales Sobrantes de concreto (Sin elementos metálicos)
b) Concreto armado	Elementos de concreto armado prefabricados y colados en obra
c) Metales	Residuos metálicos como: - Acero de refuerzo - Metales ferrosos - Metales no Ferrosos (aluminio, cobre, etc.)
d) Mampostería con recubrimiento	Residuos de mampostería y pétreos con recubrimiento y mortero de juntas, como: blocks, tabicones, adoquines, block cerámico, prefabricados de arcilla recocida (tabiques, ladrillos, tejas, etc.), muros de piedra braza, etc.
e) Pétreos	Materiales pétreos sin recubrimientos o sin juntas de mortero
f) Mezcla asfáltica	Provenientes de bases asfálticas o negras
g) Excavación	Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales
h) Elementos prefabricados con materiales mixtos	Paneles y sistemas prefabricados conformados por materiales mixtos (como panel de yeso, panel de tabla cemento y otros paneles en general)
i) Otros Residuos de Manejo especial generados en obra	Residuos con tratamiento y manejo especial, listados de manera enunciativa no limitativamente: - Residuos de instalaciones eléctricas, residuos electrónicos, lámparas, balastras y baterías - Llantas - Textiles - Madera - Lodos bentoníticos - Unicel

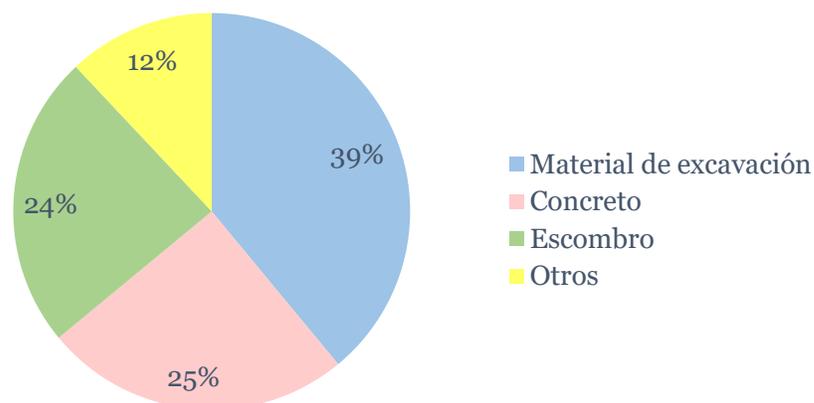
Nota: Los residuos no enlistados en esta tabla deberán clasificarse de acuerdo con sus características de similitud. Elaboración propia con datos obtenidos de la norma ambiental NACDMX-007-RNAT-2019, 2021, p. 6.

A continuación se analiza una caracterización general de los RCD presentada en el *Plan de manejo de residuos de la construcción y demolición* (PM-RCD) elaborada por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) que toma como base parámetros porcentuales sintetizados de diferentes estudios desarrollados por el Gobierno de la Ciudad de México y de trabajos de tesis relacionados con los RCD (PM-RCD, 2014, p. 72), resaltando que cada obra de construcción tiene sus particularidades.

Los resultados son presentados en **Figura 10**, muestran que los residuos provenientes del material de excavación, de concreto y de escombros, en conjunto representan cerca del 87% del total, materiales susceptibles para su recuperación y revalorización en la producción de agregados. Se estima que actualmente sólo el 4% de los RCD que se generan, son aprovechados (3% reciclaje y 1% reúso).

Figura 10

Estimación de la caracterización de los RCD



Nota: Elaboración propia, con datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (PM-RCD), 2014, p. 17.

Tabla 2

Clasificación y estimación de los residuos de construcción y demolición

Grupo	Subproducto	Porcentaje de incidencia
Material de excavación	Material de relleno	39
Concreto	Concreto: bases hidráulicas, concretos hidráulicos, adocretos, adopastos, bordillos, postes de cemento-arena, morteros.	24
	Asfalto: carpetas asfálticas	0.3
Elementos mezclados prefabricados y pétreos	Piedra, block- tabique, tabicones, mortero, adoquines, tubos de albañal, mamposterías, tabiques, ladrillos	24
Otros	Yeso, muro falso, madera, cerámica, plástico, metales, lamina, vidrio, papel y cartón	12
RSU	RSU	Centro de reciclaje
Residuos orgánicos Productos de despalme	Hojas, ramas, troncos y raíces	Compostables
Totales		100

Nota: Elaboración propia, con datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (PM-RCD), 2014, p. 18.

Dentro de la obra es primordial evitar o reducir la generación de RCD, pero como observamos en los porcentajes presentados en *Tabla 2*, muestran materiales que siguiendo los protocolos y planes de manejo se pueden reutilizar o en su caso transformar en las plantas de reciclaje, clasificándose de la siguiente forma:

- a) Materiales reutilizables: constituidos fundamentalmente por piezas de acero estructural, elementos de maderas de calidad en buen estado, ladrillos, bloques, mampostería, cerámicas

y tierras de excavación. En ciertos casos, la mezcla de residuos de demolición no seleccionados pero libres de impurezas, puede ser utilizada como material de relleno, en subbases de caminos secundarios o en vías temporales de tránsito de rellenos sanitarios.

- b) Materiales reciclables: constituidos principalmente por metales (férreos y no férreos), plásticos, vidrio, concreto, ladrillos, bloques, mampostería, etc., que cumplan ciertas propiedades físicas, para emplearse en diversas actividades (Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generada por las actividades de construcción en México, 2011, p. 13)

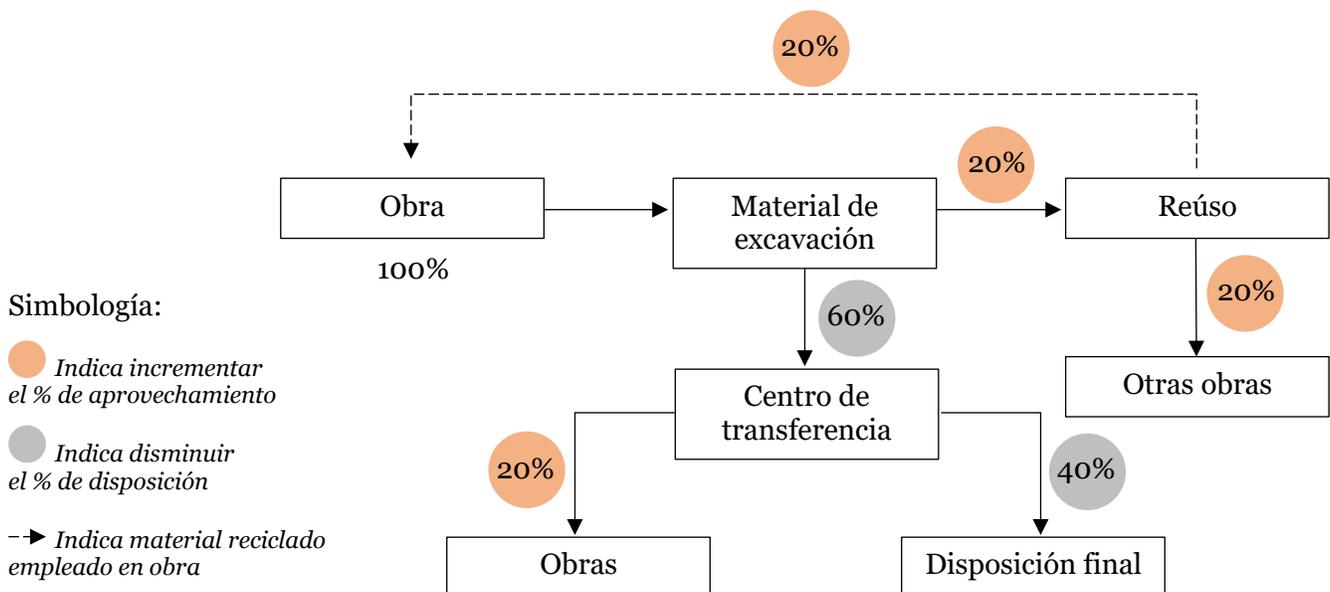
Dentro de la obra se generan residuos de otro tipo, por lo que el constructor, deberá cumplir con los ordenamientos en materia municipal para la separación, transporte y disposición de estos residuos (CMIC, 2014, pp. 18 - 19):

- a) Residuos sólidos urbanos (RSU): producidos durante las actividades que se realizan, pero éstos no se consideran parte de los RCD, por lo que no deben mezclarse.
- b) Residuos orgánicos: residuos resultados de actividades de despalme, producidos durante los trabajos preliminares de acondicionamiento de terrenos, se consideran incidentalmente relacionados como producto de la actividad de construcción. A pesar de ello, no están incluidos como parte de los RCD y deben considerarse compostables ya que con un manejo adecuado pueden reintegrarse al medio natural.
- c) Residuos peligrosos: ante la posibilidad de que durante el proceso de construcción o demolición puedan estar presentes residuos peligrosos, estos deberán ser debidamente identificados y separados para darles el manejo que marca la ley. Los residuos peligrosos no están incluidos en el plan de manejo de RCD por ser de jurisdicción federal.

Considerando los tres grupos más importantes en cuanto a la clasificación de los RCD, analizaremos el ciclo de vida de cada uno con información del plan de manejo de residuos de la construcción y demolición de la CMIC (2014).

Figura 11

Ciclo de vida del material de excavación



Nota: Elaboración propia, con datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (PM-RCD), 2014, p. 25.

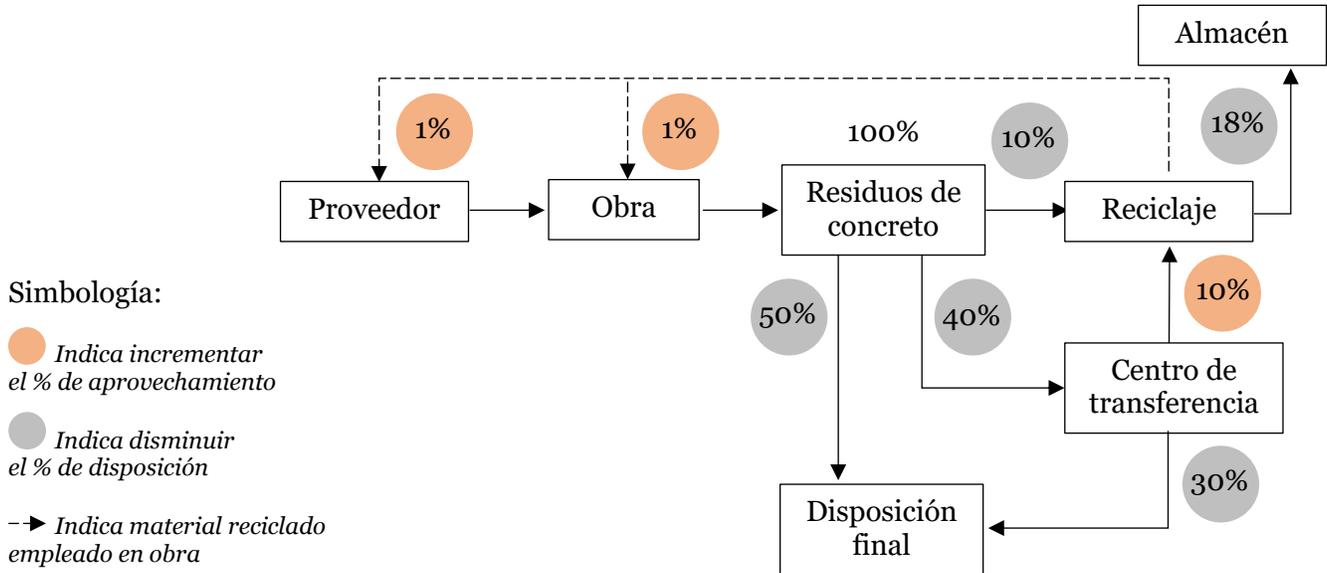
En la Figura 11 se expone el ciclo de vida de los materiales de excavación, en donde se estima que el 60% de material actualmente es enviado a centros de transferencia, de estos el 20% se envía para

reusó en otras obras y el 40% a sitios de disposición final.

En la **Figura 12**, muestra los resultados del análisis del ciclo de vida de los elementos de concreto, donde se considera que solo el 20% de los residuos son enviados a plantas de reciclaje y el 80% restante a sitios de disposición final. Es significativo señalar que solo el 2% del volumen recibido en las instalaciones de reciclaje se utiliza en nuevas obras y el material restante se almacena (CMIC, 2014, p. 25).

Figura 12

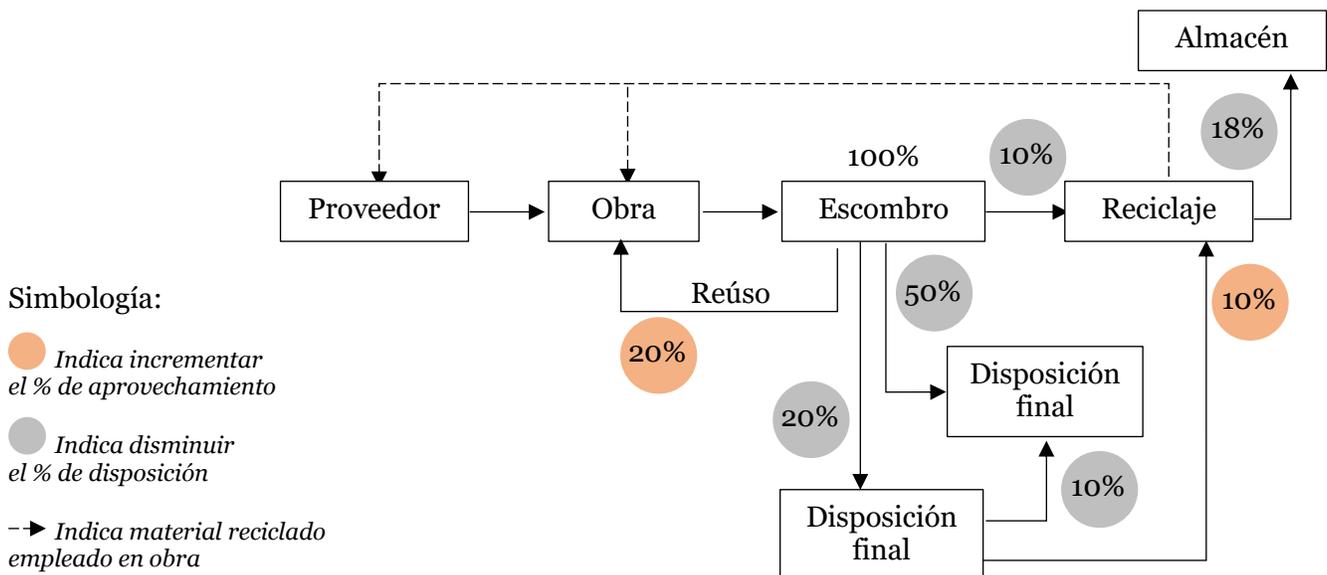
Ciclo de vida de residuos de concreto



Nota: Elaboración propia, con datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (PM-RCD), 2014, p. 26.

Figura 13

Ciclo de vida de los elementos mezclados prefabricados y pétreos



Nota: Elaboración propia, con datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (PM-RCD), 2014, p. 27.

Finalmente, en la **Figura 13** se muestra el ciclo de vida de los elementos mezclados prefabricados pétreos. Que tienen un comportamiento similar al del ciclo de vida de elementos de concreto, estimando que solo el 20% de los residuos son enviados a centros de reciclaje y el 80% restante a disposición final. Sin embargo, debido a la baja demanda de materiales reciclados sólo el 2% de los materiales recuperados son aprovechados (CMIC, 2014, p. 26).

Algunas entidades federativas han implementado listas de proveedores de servicios, que incluyen la recolección y el transporte de dichos residuos, así como, en algunos casos centros de recolección y transferencia e incluso sitios de disposición final para el manejo de los RCD. Se debe puntualizar que son pocas las entidades que cuentan con la infraestructura para brindar una gestión adecuada de los RCD (CMIC, 2014, p.19). Actualmente se encuentran en operación dos plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición (PR-RCD) en la Ciudad de México.

2.2. Efectos sobre el medio ambiente por la mala disposición de los RCD

La disposición sin separación ni tratamiento de los RCD en sitios clandestinos genera un impacto ambiental relevante. Considerando que cada tipo de construcción tiene sus procesos predominantes de ejecución y su propia generación de contaminantes dados en mayor o menor proporción, misma que depende del grado de concientización que tenga el generador, acompañado de su experiencia y tecnología.

En la **Tabla 3** observaremos algunos efectos de impacto al medio ambiente la mala disposición de RCD (Spinola Paniagua, 2015, pp. 19-20):

Tabla 3

Características de los materiales contenidos en los RCD y su impacto al medio ambiente

Material	Características	Impactos en el ambiente
Concreto	Material durable y resistente que impide la penetración de agua para proteger al acero de refuerzo utilizado en la estructura de las construcciones	Es un residuo pesado que repercute en los sitios de tiro, compacta el suelo y puede repercutir en la pérdida de infiltración y aumento de escorrentía. Es inerte, no modifica el pH del suelo.
Tabique de barro recocido	Resisten los embates del agua, tierra o lodo con bastante buena disposición, pero quedan limitados en dimensiones	Es un material inerte, no modifica el pH del suelo, pero puede aumentar la escorrentía y compactación del suelo
Tabique de concreto	Estas piezas pueden ser huecas (tabiques ligeros) y macizos	Es un material inerte, no modifica el pH del suelo, pero puede aumentar la escorrentía y compactación del suelo
Mamosterías de piedras naturales	Clasificada como de tercera, por estar formada con piedras naturales sin labrar y unidas con mortero de cemento y arena	Es un material inerte, no modifica el pH del suelo, pero puede aumentar la escorrentía y compactación del suelo
Mortero	Mezcla de cemento y arena que se utiliza para unir piedras o tabique	Es un material inerte, no modifica el pH del suelo, pero puede aumentar la escorrentía y compactación del suelo
Madera	Es un conjunto de células huecas, alargadas y cementadas longitudinalmente entre sí. Compuesto por celulosa (40-50%), hemicelulosas varias (20-35%), y lignina (15-35%)	Albergue de fauna nociva. Los beneficios de su descomposición es que se reincorpora la materia orgánica al suelo

Cal	Sustancia sólida cáustica. La cal hidráulica es una cal compuesta principalmente de hidróxido de calcio, sílice (SiO ₂) y alumina (Al ₂ O ₃) o mezclas sintéticas de composición similar. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua	La cal viva modifica el pH del suelo
Aluminio	Es un metal ligero, con alta conductividad eléctrica, son resistencia a la corrosión y bajo punto de fusión. Blando pero resistente	Es un residuo que se recicla y reincorpora como materia prima. De encontrarse en sitios de tiro es un residuo inerte
Vidrio	Compuesto por varios silicatos metálicos, presentes en distintas proporciones, son duros pero frágiles	Es inerte, generalmente es un residuo reciclable, de encontrarse en un sitio de tiro puede afectar aumentando la escorrentía y disminuyendo la capacidad de infiltración del agua
Acero	Es una mezcla de metales (aleación) formada por varios elementos químicos, principalmente hierro y carbón como componente minoritario (desde el 0.25% hasta el 1.5% en peso)	Como residuo puede afectar al sitio por su peso compactando el suelo y aumentando la escorrentía
Yeso	Es un aglomerante hidráulico cuyo fraguado es muy rápido	Es un residuo inerte de baja densidad que puede afectar al sitio de tiro aumentando la escorrentía y por lo tanto disminuyendo la capacidad de infiltración del agua
Cerámica	Los materiales cerámicos provienen de arcillas sometidas a distintos procesos: Cerámica ordinaria: se utiliza a temperatura ambiente Cerámica refractaria: se utiliza a temperatura elevada. Sus componentes fundamentales son: sílice, alúmina y óxidos metálicos.	Es un residuo inerte de alta densidad que puede afectar un sitio de tiro compactando el suelo, aumentando la escorrentía y disminuyendo la capacidad de infiltración del agua

Fuente: Datos obtenidos de Spinola Paniagua, 2015, pp. 19-20.

Como observamos, los RCD constituyen un problema serio cuando no se disponen de manera adecuada, los tiraderos clandestinos de residuos de la construcción pueden provocar afectaciones al agua, aire, suelo, flora y fauna, ecosistemas y al drenaje, también provoca la saturación de los sitios de disposición final (PAOT, 2010). Para hacer un análisis más amplio se hará un desglose de sus impactos

De acuerdo con la [Figura 14](#), para una mejor comprensión se hace una descripción de cada uno de los impactos ambientales y urbanos ocasionados por los residuos de la industria de la construcción (PAOT, 2010, pp. 24-25):

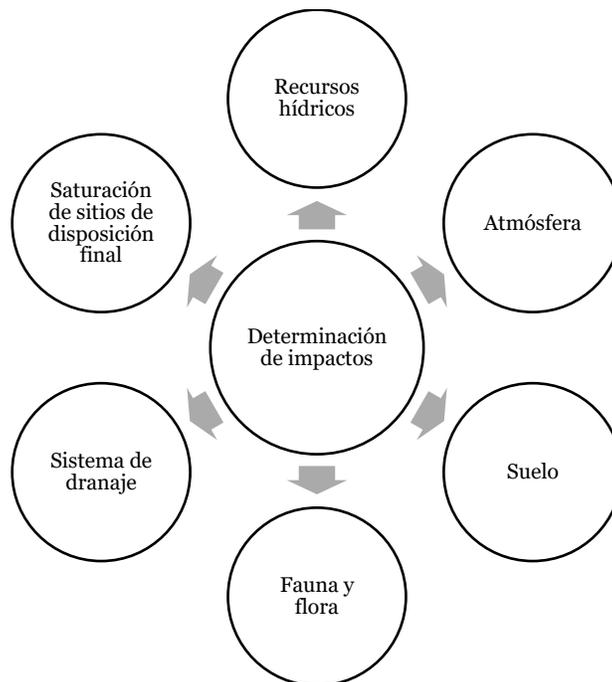
- **Impacto de los recursos hídricos:** Además de contaminar las aguas superficiales o subterráneas utilizadas para el abastecimiento público, la disposición final de los residuos de construcción combinados con residuos peligrosos sin tratar, en sitios aprobados o clandestinos, puede resultar en inundaciones por la obstrucción de los canales de drenaje y alcantarillado urbano. El impacto del vertido de residuos de la construcción en aguas superficiales como arroyos, canales o humedales, se manifiesta directamente en su azolvamiento, pérdida de profundidad, aumento de la exposición al sol, temperatura y evaporación, disminución del oxígeno disuelto.
- **Impacto atmosférico:** Cuando la materia orgánica o los desechos peligrosos se combinan con los residuos sólidos de la construcción, la contaminación al aire se convierte en un problema

importante. En esta situación, se producen olores desagradables alrededor de los tiraderos clandestinos, lo que lleva a la producción de gases asociados a la digestión bacteriana de la materia orgánica en proceso de descomposición.

- **Impacto del suelo:** En entornos periurbanos, urbanos o rurales, la descarga y acumulación de desechos produce efectos antiestéticos y polvo irritable. Los tiraderos clandestinos pueden provocar deslizamientos de tierra, además, el peso del depósito de residuos de construcción compacta el suelo, evitando que el agua de lluvia penetre naturalmente en el suelo, aumentando la escorrentía y la velocidad del agua.
- **Amenazas a la flora y fauna:** La alteración directa o indirecta de la flora tiene un impacto ambiental directo sobre la fauna. Debido a la alteración del hábitat de la fauna, esta se ve obligada a reubicarse en zonas menos perturbadas.
- **Afectación al sistema de drenaje del área urbana:** Cuando llueve, el acarreo de residuos de construcción a la zona baja de la Ciudad de México ocasiona una acumulación de residuos que obstruyen los sistemas de drenaje y alcantarillado, aumentando la probabilidad de inundaciones en consecuencia.
- **Saturación de los sitios de disposición final:** La falta de adopción de políticas que incentiven la prevención, reutilización, reciclaje y procesamiento de los residuos generados en las obras de construcción y demolición, afecta negativamente a los sitios de disposición final, saturándolos y reduciendo su vida útil. El manejo de los residuos de construcción en los rellenos sanitarios es un problema importante porque consume un espacio valioso y en su mayoría, los terrenos no están diseñados para soportar la alta densidad y peso.

Figura 14

Esquema de los impactos ambientales y urbanos ocasionados por los residuos de la industria de la construcción



Nota: Elaboración propia, con datos del Estudio de zonas impactadas por tiraderos clandestinos de residuos de la construcción en el Distrito Federal (PAOT, 2010, pp. 24-25).

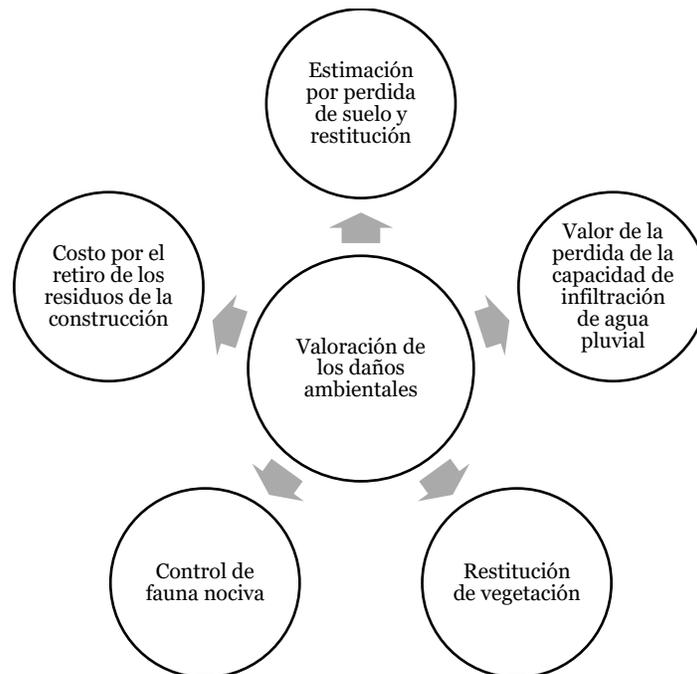
La ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, en su artículo 5°, establece que es responsabilidad y obligación de quien contamine, deteriore el ambiente o afecte los recursos naturales locales, reparar los daños ocasionados conservando su estado original, en caso contrario se tendrá que pagar una indemnización (Ley general de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 2015, art. 5).

La PAOT sugiere caracterizar el tipo de residuos de construcción que se encuentran en el sitio, la superficie afectada, el volumen del tiradero, su zonificación de acuerdo al Programa General de Ordenamiento Ecológico y Territorial de la Ciudad de México, y factores como precipitación, inclinación o grado de pendiente, impacto en la flora y fauna del sitio, textura del suelo y tipo de vegetación (PAOT, 2010, p. 25).

Con la ayuda de estos datos, es posible hacer la valorización de los daños ambientales provocado por los residuos de la construcción y la pérdida de servicios ambientales. Ejemplos de estos impactos se muestran en la **Figura 15**.

Figura 15

Esquema de los impactos ambientales y urbanos ocasionados por los residuos de la industria de la construcción



Nota: Elaboración propia, con datos del Estudio de zonas impactadas por tiraderos clandestinos de residuos de la construcción en el Distrito Federal (PAOT, 2010, p. 26)

Algunas medidas de mitigación de la contaminación por construcción y demolición son (Martel Vargas y Gutiérrez Palacios, 2008):

- Reducción y control de las fuentes contaminantes,
- Empleo de infraestructura y tecnología adecuada para disminuir la emisión de gases provenientes de equipo y maquinarias,
- Uso de camiones cerrados para el transporte de agregados pétreos y cascajo o uso de lona para evitar la dispersión de polvo,
- La estabilización y riego con agua tratada de los caminos de acceso,
- Reciclado de materiales,
- Uso de áreas de almacenamiento adecuado para el control de derrames de residuos peligrosos,
- Limpieza de los derrames de residuos peligrosos tan pronto como sea posible,
- Las actividades de demolición requieren del control del polvo, ruido, vibración, según sea el caso.

2.3. Normatividad y planes para el manejo de los RCD en México

Para los usuarios, profesionistas e implicados en el sector de la construcción es importante conocer los instrumentos legales vigentes y sus actualizaciones en materia de “*residuos de manejo especial*”, de esta manera prevenir su producción y proceder de manera eficiente en la gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD).

Ley general de equilibrio ecológico y protección al ambiente

La ley general del equilibrio ecológico y protección al ambiente (2015), establece en el Capítulo IV la prevención y control de la contaminación del suelo donde menciona que: “Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo”, “Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos” y “Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reusó y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes” (Ley general de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 2015, art. 134). Así mismo manifiesta lo siguiente: “Queda sujeto a la autorización de los municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reusó, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales” (Ley general de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 2015, art. 137).

Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos

Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (2015), tiene como objetivo principal la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

En el título tercero clasifica a los residuos de construcción, mantenimiento y demolición como residuos de manejo especial como 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. De acuerdo con la misma ley, un gran generador es una persona física o moral que genere una cantidad igual o superior a 10 toneladas en peso bruto total de residuos al año o su equivalente en otra unidad de medida. Adicionalmente, con el objetivo de minimizar la generación y maximizar el reciclado estos materiales deben estar sujetos a un plan de manejo especial. (Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, 2015)

Reglamento de construcciones para el Distrito Federal

De acuerdo con lo marcado por Reglamento de construcciones del Distrito Federal (2021), en cuanto a residuos sólidos maneja los siguientes artículos (Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, 2021, art. 236 y 243):

Artículo 236. Con la solicitud de licencia de construcción especial para demolición considerada en el Título Cuarto de este Reglamento, se debe presentar un programa en el que se indicará el orden, volumen estimado y fechas aproximadas en que se demolerán

los elementos de la edificación. En caso de prever el uso de explosivos, el programa señalará con toda precisión el o los días y la hora o las horas en que se realizarán las explosiones, que estarán sujetas a la aprobación de la Delegación.

Artículo 243. Los materiales, desechos y escombros provenientes de una demolición deben ser retirados en su totalidad en un plazo no mayor de 30 días hábiles, contados a partir del término de la demolición y bajo las condiciones que establezcan las autoridades correspondientes en materia de vialidad, transporte y sitio de disposición final.

NACDMX-007-RNAT-2019

Para efectos específicos de residuos de construcción y demolición existe la norma ambiental NACDMX-007-RNAT-2019 (2021), la cual tiene por objeto determinar la clasificación de los residuos de la construcción y demolición, establecer las especificaciones y requisitos técnicos para su manejo integral; establecer los requisitos complementarios que deberán observarse en la formulación de los planes de manejo de RCD; así como establecer su procedimiento para la evaluación de la conformidad.

Establece la siguiente clasificación de los residuos de construcción y demolición:

- a) Concreto simple
- b) Concreto armado
- c) Metales
- d) Mampostería con recubrimiento
- e) Pétreos
- f) Mezcla asfáltica
- g) Excavación
- h) Elementos prefabricados con materiales mixtos
- i) Otros residuos de manejo especial generados en obra

Adicionalmente, la norma presenta especificaciones para el manejo de residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México, como la separación de residuos, el acopio, el almacenamiento, la recolección, transporte, su adecuada disposición final y valorización, del cual es importante considerar los siguientes puntos (NACDMX-007-RNAT-2019, 2021):

8.6.1.3. Los centros de acopio y/o transferencia autorizados, podrán recibir los residuos con la finalidad de llevar a cabo la separación y recuperación de los materiales para reintegrarlos en los ciclos económicos, así como de que se envíen a las PR-RCD¹

8.6.2.1. Los generadores de RCD deberán, siempre que sea factible y de conformidad con los requisitos especificados en las normas, reutilizar los RCD en el sitio de generación, indicándolo en su plan de manejo. El material residual, deberá ser enviado a centros de

¹ PR-RCD se refiere a Planta de Reciclaje de Residuos de la Construcción y de la Demolición: Instalación cuyo objetivo es transformar los residuos de la construcción, demolición y excavación en agregados reciclados y subproductos para reincorporarlos a un ciclo de vida, a fin de evitar que se desperdicien estos residuos potencialmente útiles, reducir el consumo de materiales naturales, así como el uso de energía.

acopio, transferencia y/o PR-RCD para su debido aprovechamiento, o en su caso, cuando sea material no reciclable o aprovechable, deberá enviarse a un sitio de disposición final autorizadas por la Secretaría o la autoridad ambiental correspondiente

8.6.2.2. Se deberá incorporar producto reciclado para las obras privadas y públicas de construcción, de construcción, tales como: construcción, modificación, remodelación, ampliación, adecuación, rehabilitación, restauración, reparación, sustitución de infraestructura, conservación, mantenimiento, instalación, demolición u otras, asimismo el porcentaje de utilización de agregados reciclados se debe asentar en el proyecto ejecutivo de obra

8.6.2.4. Tratándose de productos prefabricados hechos con agregados reciclados, como adocretos, adopastos, losetas, guarniciones, bordillos, postes de cemento-arena, blocks y tabiques, entre otros, estos podrán aprovecharse en las obras de construcción, tales como: construcción, modificación, remodelación, ampliación, adecuación, rehabilitación, restauración, reparación, sustitución de infraestructura, conservación, mantenimiento, instalación, demolición u otras, de acuerdo con sus especificaciones técnicas y cuando sus características estructurales lo permitan.

NOM-161-SEMARNAT-2011

Norma oficial mexicana de carácter obligatorio NOM-161-SEMARNAT-2011 (2013), establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de estos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.

Dentro de los criterios para determinar los residuos de manejo especial nos dice que: “sea un residuo sólido urbano (RSU) generado por un gran generador en una cantidad igual o mayor a 10 toneladas al año y que requiera un manejo específico para su valorización y aprovechamiento” (NOM-161-SEMARNAT-2011, 2013).

Plan de manejo de residuos de la construcción y demolición PM-RCD

El plan de manejo de residuos de la construcción y demolición (PM-RCD) publicado por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), tiene por objetivo el facilitar la construcción sustentable, minimizando la generación de residuos de la construcción y la demolición y maximizando su aprovechamiento, bajo el concepto de corresponsabilidad entre los tres órdenes de gobierno y los diferentes actores que participan en la cadena de valor de la industria de la construcción.

En el proceso de generación de RCD, se han identificado dentro de la cadena productiva diferentes actores de los tres grandes sectores de la economía. En el sector primario extractivo y materiales de construcción, se ubican los proveedores de insumos, desde materiales pétreos, maderas y accesorios para acabados. En el sector secundario, se identifican los actores cuya actividad se encuentra relacionada con la construcción y

servicios relacionados. Finalmente, en el sector terciario, los actores cuyas labores son de soporte e incluyen a los comerciantes y proveedores de servicios, incluso técnicos y financieros.

De acuerdo con documento de la CMIC, la gestión en material de residuos de construcción y demolición en México presenta serias deficiencias, pues son pocas las entidades que cuentan con infraestructura adecuada para el manejo de los RCD. (Plan de manejo de residuos de la construcción y demolición, 2014)

El plan de manejo hace la recomendación de implementar las siguientes estrategias para el manejo de residuos:

- En la planeación
 - Identificación de residuos e indicadores de manejo para reciclaje, aprovechamiento, reúso y disposición final por tipo de obra.
- Dentro de la obra
 - Minimización en la generación, sistemas de reducción de residuos, empleo de materiales que se puedan reciclar.
 - Separación de residuos por tipo de aprovechamiento, materiales de excavación, concretos, escombros, otros.
 - Reúso de materiales, empleo de materiales reciclados, identificar infraestructura de reciclaje, especificaciones mínimas para el uso de reciclados.
- Fuera de la obra
 - Acopio y transporte, control documental de traslados, medidas para evitar dispersión de finos, empleo de transportistas acreditados.
 - Disposición final únicamente en sitios autorizados.

2.4. RCD sus aplicaciones y limitaciones en la construcción

En México, el reciclaje de residuos de construcción y demolición se ha enfocado en triturar los residuos y convertirlos en agregados finos y gruesos, de tipo hidráulicos o mixtos. Con las actualizaciones en la normatividad se ha buscado introducir el uso de los agregados reciclados (AR) en diversas obras de construcción, sin embargo, los ingenieros, arquitectos, constructores, contratistas y hasta las autoridades descartan su utilización argumentando que no son adecuados o que no cumplen con las especificaciones de calidad necesarias. (Urrutia Segura y Ávalos Rendón, 2019)

Por otro lado, se han desarrollado diferentes prototipos prefabricados ecológicos en los que se utilizan agregados reciclados que cumplen con las especificaciones técnicas requeridas por las normas, sin embargo, su uso no se ha comercializado ya que estos materiales aún se encuentran en etapa de investigación.

La norma ambiental NACDMX-007-RNAT-2019 (2021) nos marca como los agregados reciclados provenientes de residuos de la construcción deberán aprovecharse en elementos no estructurales de acuerdo con la [Tabla 4](#):

Tabla 4

Aprovechamiento de agregados reciclados en elementos no estructurales

Origen del agregado	Usos del agregado reciclado
A) Residuos de concreto	Bases y subbases
B) Residuos de concreto armado	Bases hidráulicas en caminos y estacionamientos
	Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones
	Bases para ciclo pistas, firmes, guarniciones y banquetas
	Construcción de andadores y trota pistas
	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.
C) Residuos pétreos	Material para la conformación de terrenos
	Rellenos en cimentaciones
	Plantillas para cimentación
	Concreto ciclópeo
	Rellenos en jardines
	Mobiliario urbano
	Lechos, acostillamientos y relleno de tuberías
	Conformación de parques y parterres
	Zanjas drenantes
	Bases y subbases
	Subbases en caminos y estacionamientos
	Construcción de terraplenes
	Cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios
	Construcción de andadores y trota pistas
	Bases para ciclo pistas, firmes, guarniciones y banquetas
D) Residuos de mampostería o pétreos con recubrimiento	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
	Caminos de jardines
	Construcción de banquetas, guarniciones y bordillos
	Bases asfálticas o negras
	Concretos asfálticos elaborados en caliente
	Concretos asfálticos templados o tibios
E) Asfálticos	Concretos asfálticos elaborados en frío
	Bases asfálticas espumadas
	Micro carpetas en frío (slurries)

Notas: Para tal efecto el usuario de los productos o materiales reciclados, o en su caso a través de su director responsable de obra (DRO), deberá constatar que cumplen con las características, disposiciones y normatividad que para su efecto se emitan (NACDMX-007-RNAT-2019, 2021, pp. 11-12).

Existen diferencias cuando se proyecta un edificio con materiales totalmente nuevos, respecto a cuando se propone uno con materiales reutilizados. En el primer caso, los materiales se especifican después de la realización del proyecto por parte del arquitecto; los materiales y componentes se encuentran fácilmente en las proporciones requeridas. En el segundo caso, el proyecto se debe concebir a partir de los materiales recuperados y

por lo tanto se deben conocer las características de los materiales que van a ser utilizados.

(Vefago, 2012, p. 98)

Un aspecto importante es conocer si el material o componente encontrado satisface los criterios mínimos establecidos por las normativas vigentes. En algunos casos, los análisis visuales pueden ser suficientes para ser seleccionados para una determinada función. Sin embargo, para aplicaciones estructurales u otras que requieran un elevado grado de desempeño, son necesarios ensayos más específicos, el avance en los estudios de estos materiales permitirán reducir estas limitantes.

2.5. Reflexión capitular

Después de revisar los antecedentes y las experiencias internacionales sobre el uso y gestión de los residuos de construcción y demolición en el capítulo 1, ahora en el capítulo 2 contamos con información específica a nivel nacional sobre la industrial de la construcción mexicana.

Los resultados muestran que cerca del 87% del total de los RCD resultantes son susceptibles para su recuperación y revalorización. Y que, por el contrario, actualmente sólo el 4% de los RCD que se generan, son aprovechados (3% reciclaje y 1% reúso). Por esto es indispensable analizar los protocolos y herramientas disponibles para en lo posible aumentar el uso de agregados reciclados y la recuperación de materiales. Hay que eliminar la idea de deshacernos de los residuos, ya que estos son materia prima potencial si se maneja de manera adecuada.

Como observamos, los RCD constituyen un problema serio cuando no se disponen de manera adecuada, los tiraderos clandestinos de residuos de la construcción pueden provocar afectaciones al agua, aire, suelo, flora y fauna, ecosistemas y al drenaje, también provoca la saturación de los sitios de disposición final

Se ha hecho la revisión de como México se suma a ser un país que toma acciones en cuanto al manejo integral de los residuos de construcción y demolición, en particular la Ciudad de México y la actualización en sus normas que incentivan el uso de los agregados reciclados y el mayor aprovechamiento para alargar la vida de los materiales de construcción.

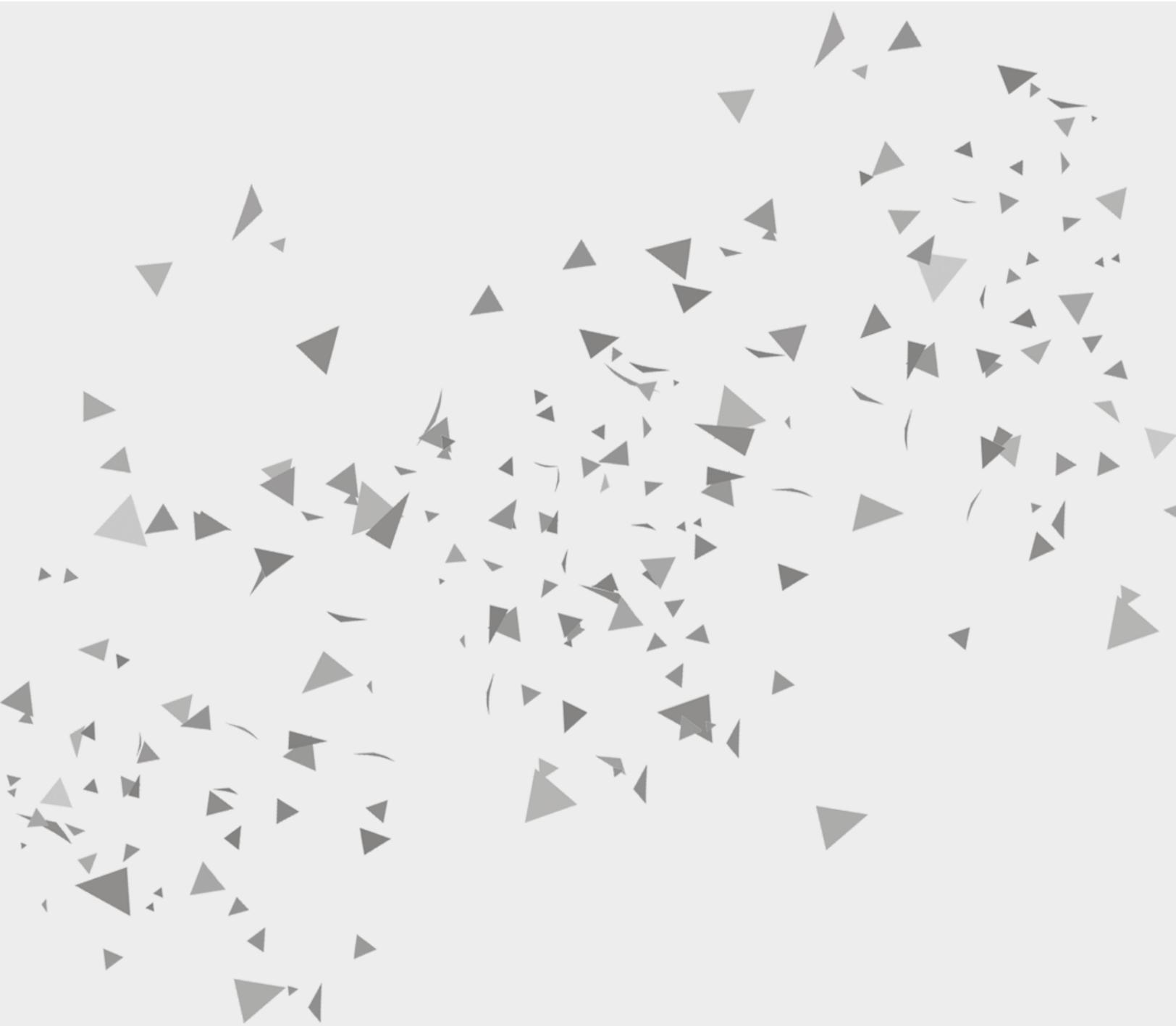
En la revisión de la normatividad aplicable se observan ventajas que brinda el aprovechamiento de los RCD como la disminución del volumen destinado para su disposición final, ya que se procura buscar una gestión integral para su manejo y controlar la contaminación que estos generan debido a su mala disposición en forma clandestina, además de favorecer al ecosistema al disminuir la explotación de los elementos naturales.

En México, el reciclaje de residuos de construcción y demolición se ha enfocado en triturar los residuos y convertirlos en agregados finos y gruesos, de tipo hidráulicos o mixtos. Con las actualizaciones en la normatividad se busca introducir el uso de los agregados reciclados (AR) en diversas obras de construcción, sin embargo, los ingenieros, arquitectos, constructores, contratistas y hasta las autoridades descartan su utilización argumentando que no son adecuados o que no cumplen con las especificaciones de calidad necesarias.

Para contrarrestar esta ideología es necesaria generar una conciencia colectiva que sepa de los beneficios, y de los daños en caso de no tomar acción y se debe reducir la incertidumbre sobre la calidad de los materiales reciclados. Por lo anterior, según las experiencias internacionales a nivel nacional se pueden tomar algunas medidas que hagan el cambio de paradigma:

- Las autoridades deben proveer de un sistema integral de gestión de RCD en la ciudad.
- Los integrantes de la construcción, constructores, jefes de obras, maestros, etc. Deben estar capacitados para dar un adecuado manejo de los residuos de la construcción.

- En la obra, se debe fomentar el reciclado y reutilización de los materiales, los cuales deben ser separados unos de otros por medio de recipientes individuales para cada tipo de material, maximizando la reutilización y las posibilidades de su reciclaje.
- Los proyectos de diseño deben estar concebidos modulando sus espacios, con el fin de reducir las pérdidas y la generación de residuos.
- Difusión de los planes de acción y gestión de los RCD, así como sitios de disposición final.
- Es necesario concientizar al sector de la construcción y al resto de la ciudadanía sobre el tema.
- Deben existir incentivos para la certificación y para las buenas prácticas, así como la promoción de sus beneficios.
- Obligatoriedad en el manifiesto de planes de manejo de residuos, así como integración presupuestal en los conceptos de obra.
- Uso mínimo de materiales reciclados en obras públicas o privadas.
- Directorio de compradores/vendedores potenciales de materiales usados o reciclados cercanos, con el propósito de reducir y reciclar todos los residuos generados.
- Sanciones estrictas por el vertido ilícito de RCD y materiales nocivos.



CAPÍTULO 3

3. Agregados de concreto reciclado

La norma ambiental NACDMX-007-RNAT-2019 define a los materiales reciclados como “Aquellos materiales producto de los residuos de la construcción y demolición, que han sido transformados mediante un proceso de reciclaje, selección, molienda, cribado, almacenamiento y que por sus características pueden ser reincorporados en los ciclos económicos” y como reciclaje a la “Transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, sin generar perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos. (NACDMX-007-RNAT-2019, 2021, p. 5).

La gestión de los residuos se debe realizar desde la fase de planeación de la obra, en esta etapa se proponen estrategias que permitan establecer las metas de reúso, reciclaje y aprovechamiento de los residuos según el tipo de obra y los residuos que se generen. Si bien, muchos de estos aspectos se encuentran fuera del control regulatorio, si existen especificaciones de para el manejo de los residuos de la construcción y demolición, establecidas por la norma ambiental para el manejo integral de RCD (NACDMX-007-RNAT-2019, 2021). Los generadores de RCD y los prestadores de servicios deben cumplir las especificaciones indicadas para las siguientes fases del manejo integral, según sea aplicable:

- a) Separación de residuos,
- b) Acopio
- c) Almacenamiento
- d) Recolección y transporte,
- e) Valorización y
- f) Disposición final

En algunas entidades federativas con infraestructura suficiente, se ha logrado implementar un proceso para el manejo de los RCD, con un listado de proveedores de servicios, que incluyen la recolección y el transporte de dichos residuos, así como, en algunos casos centros de recolección y transferencia e incluso sitios de disposición final. A pesar de lo anterior, son más las entidades que carecen de la infraestructura necesaria para gestionar de manera eficaz los RCD (CMIC, 2014, p.19).

En la ciudad de México se cuentan con dos plantas fijas procesadoras de residuos y de una planta móvil, por lo que en este capítulo se hace una descripción específica de cada uno de estos procesos para la obtención de agregados reciclados.

Actualmente, gran parte de los residuos de la construcción y demolición generados son depositados en su mayoría en sitios inadecuados, otra parte es depositada en rellenos sanitarios, estos malos manejos restan calidad al material y en gran proporción evita que puedan ser procesados para su recuperación. La calidad de los agregados reciclados es indispensable para asegurar buenas propiedades en los materiales compuestos resultantes, de ahí radica la importancia de su correcta gestión. Por esto es indispensable conocer que normatividad es aplicable y lograr un control de calidad óptimo que aumente su competitividad contra los agregados naturales.

Los agregados reciclados han sido estudiados ampliamente en sus generalidades pues al ser de origen diverso también se ve comprometido su impacto en la elaboración de materiales. Entonces, para objeto de esta investigación analizaremos su clasificación como producto y sus propiedades, así como su influencia en la elaboración de concreto.

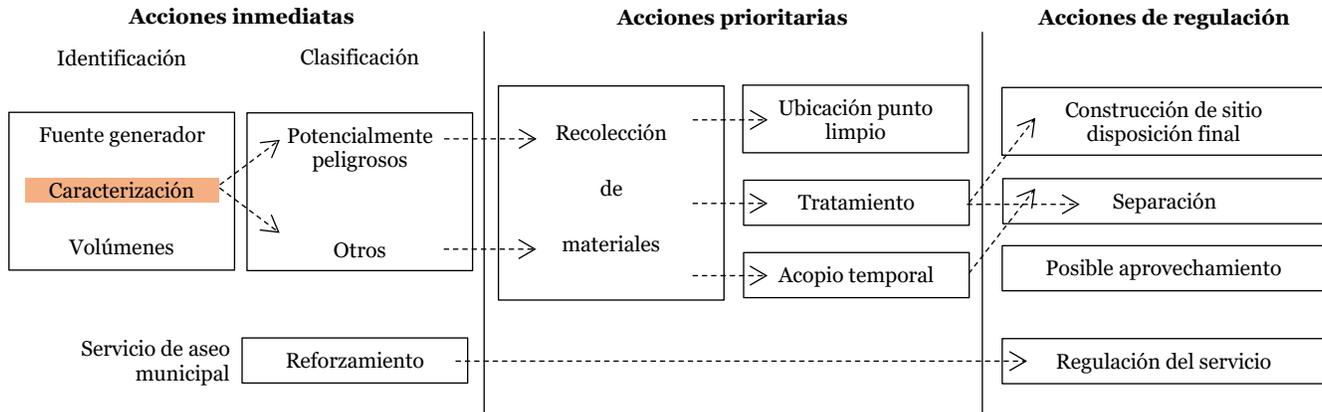
3.1. Origen y producción de agregados reciclados

El tratamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD) no debe comenzar en la planta de tratamiento, sino que debe ser considerado desde el momento de diseño, producción, deconstrucción o demolición. Así para la obtención de agregados reciclados (AR) de RCD de calidad es

necesaria una secuencia en la gestión de residuos, se plantean 3 etapas primordiales con: acciones inmediatas, acciones prioritarias y acciones de regularización (Figura 16).

Figura 16

Secuencia de gestión de RCD



Nota: Elaboración propia, con datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (PM-RCD), 2014, p. 61.

Plantas de reciclaje de residuos de la construcción y la demolición (PR-RCD)

La norma ambiental NACDMX-007-RNAT-2019 define como planta de reciclaje de residuos de la construcción y de la demolición (PR-RCD) como una “Instalación cuyo objetivo es transformar los residuos de la construcción, demolición y excavación en agregados reciclados y subproductos para reincorporarlos a un ciclo de vida, a fin de evitar que se desperdicien estos residuos potencialmente útiles, reducir el consumo de materiales naturales, así como el uso de energía” (NACDM-007-RNAT-2019, 2021, p. 4).

El principio fundamental de una instalación de reciclaje de RCD es la clasificación y separación de diversos residuos, así como, la reducción de tamaño y eliminación de impurezas para producir productos finales valorizables. A diferencia de la extracción y producción de agregados naturales, el reciclaje exige el uso de técnicas de clasificación superior, principalmente para optimizar la homogeneización del material procesado y la reducción de contenido contaminante. (Martínez Daniel y Muriá Vila, 2013, p.21)

Las plantas de reciclaje pueden clasificarse según la movilidad de sus equipos que está en función de su complejidad o tecnología de procesos. El proceso de reciclado puede hacerse en instalaciones móviles, fijas y semi móviles (Martínez Daniel y Muriá Vila, 2013, p.28). La movilidad de las plantas puede ser un factor limitativo en las posibilidades de tratamiento de los RCD y por ende en la producción del producto final.

- Instalaciones tipo 1: Son unidades móviles de trituración que reciben directamente en obra los materiales previamente seleccionados (material homogéneo limpio) procedente de demoliciones selectivas u obras específicas.
- Instalaciones tipo 2: Son aquellas que disponen de un emplazamiento fijo y con una línea de producción completa. Siendo estas las más recomendables para el proceso de tratamiento de los RCD.
- Instalaciones tipo 3: Son aquellas que disponen de un emplazamiento fijo, pero estas disponen de más de una línea de producción a la vez, generando una amplia gama de productos (AR).

Martínez en su estudio resume algunas ventajas y desventajas que existen entre los diferentes tipos de instalaciones de tratamiento de RCD (Tabla 5).

Tabla 5
Comparativa de instalaciones de reciclaje fijas y móviles

Instalación	Ventajas	Desventajas
Móviles	<p>Aplicable para cualquier sitio y de fácil funcionamiento</p> <p>El material producido puede ser utilizado <i>in situ</i></p> <p>Gestión relativamente sencilla</p>	<p>Elevados costos de montaje y desmontaje</p> <p>Limitado número de materiales producidos</p> <p>Elevados costos de planificación</p>
Fijas	<p>De aplicación universal debido al tamaño y concepto de la instalación</p> <p>Mejor calidad del producto</p> <p>Mayor eficiencia de las instalaciones, debido a la capacidad de almacenamiento</p> <p>No hay gastos de transporte, montaje y desmontaje</p> <p>Reducidos gastos de explotación</p> <p>Amplia variedad de productos fabricados</p>	<p>Requiere de permiso y controles de las emisiones de la instalación</p> <p>Requiere de una garantía tanto para el suministro de residuos como para la comercialización de los mismos (relación entre la oferta y la demanda)</p>

Fuente: (Martínez Daniel y Muriá Vila, 2013, p. 29)

En la Ciudad de México tenemos 2 plantas fijas activas de tratamiento de RCD, la primera con más antigüedad, es la Planta Recicladora Concretos Reciclados S.A. de C.V. y la segunda de reciente inauguración es la Planta Recicladora Concretos Sustentables Mexicanos S.A. de C.V. Además, de una planta móvil administrada por la Secretaría de Obras y Servicios.

- Empresa **Concretos Reciclados SA. de CV.**, ubicada en el cerro “Yehualique”, en Av. del Árbol 106, Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa, 09760 Ciudad de México, CDMX (Figura 17).

Esta planta recicladora tiene una capacidad de reciclaje de 2000 toneladas por día, cuenta con una extensión de 16 hectáreas, ocho de las cuales están a 40 metros por debajo del nivel de la calle. Cualquier camión con residuos de la construcción lo puede entregar, siempre y cuando no esté mezclado con basura orgánica u otros residuos que no sean de la construcción.

Figura 17
Concretos Reciclados S.A. de C.V.



Fuente: Imágenes obtenidas de la web <http://www.concretosreciclados.com.mx/>

El objetivo de esta planta de reciclaje es generar agregados reciclados de calidad para su reutilización como material de construcción, los agregados que se producen son: arena reciclada (de 1/4" de finos), grava (3" y 1/2") grava controlada (2") y arcilla. La planta cuenta con sistemas de minimización de impacto ambiental lo que permite reducir la emisión de ruido y polvo al ambiente. (Martínez Daniel y Muriá Vila, 2013, p. 76)

Descripción de la línea de producción:

1. **Recepción del material:** La recepción del material consiste básicamente en la supervisión visual del material entrante. El control de ingreso se realiza a través del guardia de seguridad quien se encarga de corroborar el metraje del material recibido. Se realiza el proceso de control y recepción de documentación (placa, conductor, tipo de residuo). En esta planta se aceptan únicamente residuos limpios, tales como, mamposterías, bloques, arcillas, tabiques, cerámicos, etc. Existiendo una separación entre cada uno de estos.
 2. **Clasificación:** La clasificación del residuo se realiza por medios manuales, donde se realiza una primera separación de aquellos materiales contaminantes para los RCD tales como plásticos y cartones. Una vez realizado este proceso el residuo es almacenado en otra área.
 3. **Almacenamiento:** El acopio se realiza en el interior de la planta, área debidamente delimitada al encontrarse en una depresión de 40m bajo el nivel de la calle. Al ser un área grande y ser más el residuo que entra que el que sale procesado la planta se convierte cada día más en un depósito.
 4. **Alimentación:** La alimentación se realiza a través de medio mecánicos, utilizando camiones de volteo y retroexcavadoras para suministrar el material a los equipos de trituración. Al ser una planta de grandes dimensiones se cuenta con equipos móviles de trituración, los cuales pueden moverse por el interior de la planta para realizar el trabajo a la par de obtener un ahorro en el gasto de combustibles.
 5. **Trituración y cribado:** Se utilizan equipos de trituración a base de quijadas con sistema de electroimán para la separación de acero, además de contar con sistemas de aspersión de agua lo que permite minimizar la emisión de polvos al ambiente producidos durante este proceso. En esta etapa es donde se obtiene la clasificación del material con 4 curvas granulométricas diferentes. Cabe señalar que estos equipos de cribado son equipos móviles lo que permite un mejor desplazamiento por los diferentes almacenes, mitigado, así como la emisión de polvos producidos por los camiones que alimentan la trituradora.
 6. **Clasificación final:** Una vez concluido el proceso de cribado y teniendo las diferentes granulometrías del agregado reciclado este es transportado mediante camiones de volteo a un área medianamente delimitada. El material se encuentra separado de acuerdo al tipo de granulometría (Martínez Daniel y Muriá Vila, 2013, pp. 82-86).
- Empresa **Concretos Sustentables Mexicanos SA. de CV.**, ubicada en avenida 5 de mayo 150, Refinería 18 de marzo, Miguel Hidalgo, 11210 Ciudad de México, CDMX (Figura 18).

Concretos Sustentables Mexicanos se constituye en el año 2012. La Planta de Reciclaje CIREC Miguel Hidalgo se especializa en procesos enfocados al aprovechamiento de residuos de construcción a través de la implementación de un nuevo sistema de revalorización y acondicionamiento. Su misión es hacer de la economía circular una actividad rentable en el ámbito empresarial, social y ambiental (Concretos Sustentables Mexicanos S.A. de C.V., 2022).

Esta planta tiene una dimensión de 14,000 m² y 13 trabajadores operativos. Esta planta recicladora tiene una capacidad de reciclaje de 1200 toneladas por día.

A continuación, se mencionarán algunos datos otorgados por la empresa.

Figura 18

Concretos Sustentables Mexicanos S.A. de C.V.



Fuente: Imágenes obtenidas en visita de campo (fotografías propiedad del autor)

El material que llega a la recicladora es material enviado por el giro constructor (privado o gubernamental), se realiza a partir de un portal de generación de citas con el fin de disminuir el tránsito vehicular en la zona. No cuenta con servicios de acarreo y traslado, pero si para la distribución del concreto reciclado que ahí se produce.

Se recibe todo tipo de concreto estructural y no estructural. Se rechaza residuos de la construcción que contengan sustancias tóxicas o peligrosas, incluyendo envases que los contuvieron (residuales de impermeabilizantes, grasas, solventes, asbestos, hidrocarburos, etc.)

Descripción de la línea de producción:

1. **Recepción y acopio de RCD:** Se recibirá residuos de construcción y demolición mediante citas, esto con el fin de disminuir el tránsito vehicular.
 2. **Alimentador vibratorio:** Recibirá la carga de residuos mediante cargadores frontales o retroexcavadoras.
 3. **Trómel:** Pre clasificador rotativo en la que se llevará a cabo una separación por el tipo de material y posteriormente en función de su tamaño.
 4. **Separador neumático:** A partir de un soplador se utilizará para retirar fragmentos de elementos más ligeros (tierra, papel, plástico, etc.).
 5. **Cinta de clasificación:** Los materiales recuperables circulan por una cinta de clasificación
 6. **Clasificación manual:** Se realizará en una plataforma acondicionada para eliminar manualmente mediante una cinta transportadora residuos no valorizables que afecten el posterior funcionamiento de la actividad.
 7. **Separador de ferrosos:** Separará los materiales ferrosos mediante un electroimán.
 8. **Trituración:** Una vez teniendo el “escombro limpio” se procede a triturar
 9. **Cribado:** Se realizará una clasificación granulométrica del agregado reciclado.
 10. **Salida de agregado reciclado (planta de concreto):** Los flujos de salida del agregado reciclado será como material de relleno y concreto reciclado para elementos no estructurales.
- **Planta de reciclaje móvil,** administrada por la Secretaría de Obras y Servicios en las instalaciones Bordo Poniente IV Etapa. Esta Planta cuenta con dos máquinas trituradoras marca Rockster, modelos R-900 y R-1100 (Figura 19) con capacidad nominal de 810 toneladas por hora (Secretaría del Medio Ambiente, 2019).

Durante 2019, esta planta procesó y trituró residuos de la construcción provenientes de obras de diversas alcaldías y dependencias del Gobierno de la Ciudad de México, para reutilizarlos en la estabilización de suelos, como subbase en vialidades o relleno en sitios de disposición final.

Las características con las que cuenta son:

1. Separador magnético
2. Aislante acústico en motor
3. Control remoto
4. Supresión de polvos
5. Mecanismo de avance de orugas
6. Funciona a base diésel

La mayor recepción de residuos provenientes de alcaldías se reportó durante los meses de mayo, diciembre, junio y agosto, y durante los meses de febrero y noviembre. En cuanto a los generadores con mayor cantidad de residuos, fueron los enviados por las alcaldías Venustiano Carranza y Benito Juárez, respecto a los entes de gobierno, fue la Dirección de Infraestructura Vial quién reporto un mayor envío a la planta.

Figura 19

Planta móvil Rockster



Fuente: Imagen obtenida del inventario de residuos sólidos de CDMX 2019 (Secretaría del Medio Ambiente, 2019)

3.2. Clasificación de los agregados reciclados

Siendo los agregados reciclados producto de materiales no naturales, se pueden definir como aquellos agregados fabricados a partir de residuos de construcción y demolición. Los agregados reciclados son residuos de naturaleza fundamentalmente inerte, y al igual que un agregado natural, se trata de materiales granulares principalmente utilizado en la construcción.

Las características básicas que definen el material serán las mismas que se tienen en cuenta en el caso de agregados naturales, granulometría, contenido de materia orgánica y sales solubles, coeficiente de los ángulos, etc.

Respecto a la tipología de los agregados reciclados en función del tamaño de sus partículas, se tiene la siguiente clasificación (García Beltrán, 2017, p. 52):

- a) **Zahorras recicladas:** materiales granulares de granulometría continua, normalmente entre 0-40 mm.
- b) **Gravas recicladas:** agregados con tamaño de partículas superior a 4 mm. Suele

diferenciarse, al igual que las gravas naturales, entre gravilla reciclada (4-8 mm) y grava reciclada (<8 mm).

- c) **Arenas recicladas:** son agregados con tamaño de partículas inferior a 4 mm, también llamados agregados reciclados finos. Pueden diferenciarse, entre arenas gruesas (>2 mm) y arenas finas (<2 mm).
- d) **Filler:** partículas con tamaño inferior a 0.063 mm. Este tipo de agregado se suele encontrar impregnado en otras partículas, repercutiendo negativamente en sus propiedades.

La tipología de los agregados por su cantidad de material predominante, se puede clasificar en agregados reciclados de concreto, agregados reciclados mixtos (García Beltrán, 2017, pp. 52-54).

- a) **Agregados reciclados de concreto:** Suele ser heterogéneo en sus propiedades debido al elevado número de factores que lo afectan, como su naturaleza en origen, la presencia de impurezas o el tipo de trituración. Suele presentar una densidad no excesivamente baja (entre 2.1-2.6 kg/dm³) aunque inferior a un agregado natural de fracción granulométrica similar. Esta reducción de densidad puede ser debido esencialmente a la pasta de mortero adherido a las partículas que conforman los agregados.
- b) **Agregados reciclados mixtos:** son aquellos cuyo contenido en partículas cerámicas es de $\leq 30\%$ y $\geq 0\%$ en peso total y cuyo contenido de partículas de concreto sea de $\geq 70\%$ y $\leq 90\%$ en peso total. Presentan una gran variabilidad de porcentaje de finos (0.5-18%). Su densidad suele encontrarse en torno a 1.8 kg/dm³ debido a la menor densidad de las partículas cerámicas respecto de los agregados naturales y al mortero adherido a las partículas del concreto reciclado y su absorción esta entre 6-12%. Suele utilizarse en terraplenes, su bases y explanada de carreteras.

Los usos de los agregados reciclados en la construcción pueden ser tan amplios como el de los naturales, siempre y cuando cumplan las especificaciones de normatividad y de calidad requeridas en cada aplicación. En la [Tabla 6](#) se mencionan algunos destinos usados y posibles de los agregados reciclados de acuerdo a su tipología.

Tabla 6

Tipología de material y destinos

Material	Naturaleza	Destino
Arena	Mixta	Cama de tuberías y tierra vegetal
	Concreto	Cama de tuberías, mortero de albañilería y concreto no estructural
Grava	Mixta	Relleno de material drenante
	Concreto	Rellenos, material drenante y concreto pobre
Zahorra	Mixta	Caminos rurales y subbases para carreteras
	Concreto	Caminos rurales y subbases para carreteras, acerados y carriles para bicicleta
Agregado grueso >32mm	Mixta	Material drenante
	Concreto	
Tierra de excavación		Tierra vegetal y rellenos

Fuente: (García Beltrán, 2017, p.55)

3.3. Principales propiedades de los agregados de concreto reciclado

En la mayoría de los estudios consultados se muestra que los agregados reciclados no presentan características que lo definan con carácter de uniformidad, de manera que la procedencia va a repercutir considerablemente en las propiedades de los agregados y de los materiales que se elaboren con ellos. No obstante, los concretos fabricados con sustituciones parciales de los agregados naturales por reciclados, han cumplido los requisitos mínimos conforme a la normatividad técnica ya que pueden y han demostrado proporcionar el suficiente nivel de confianza por sus propiedades mecánicas (Martín-Morales, 2013, p. 66).

De acuerdo con la bibliografía consultada, las propiedades de los agregados reciclados (AR) vienen condicionadas por los siguientes factores (Sáiz Martínez, 2015, pp. 41-48).

- Las características de los materiales de los que proceden
- Las características de los equipos de trituración utilizados en su producción
- La naturaleza de los cribados que se hayan realizado
- Los procedimientos empleados para eliminar impurezas

Ante la numerosa información encontrada en relación a la utilización de agregados reciclados, haremos un repaso de sus propiedades más relevantes para conocer las posibles afectaciones que podemos esperar en las mezclas de concreto.

Mortero adherido

El contenido de mortero en los agregados reciclados es de aproximadamente entre 35-40%. Este mortero ocasiona una gran variedad de reacciones, que incluyen: poca densidad, alta absorción, menor dureza, baja resistencia a la abrasión, reacción álcali añadida y ataque de sulfatos. Estas características impactan de forma perjudicial en la creación de nuevos materiales de construcción, afectando sus propiedades mecánicas y por ende en su durabilidad. (Martínez Daniel y Muriá Vila, 2013, p. 89)

Granulometría

La granulometría de las arenas recicladas tiene especial relevancia a la hora de dosificar tanto morteros como concretos en el diseño de las mezclas. Una distribución granulométrica continua tiene un efecto directo sobre algunas propiedades de este tipo de materiales, tales como, la trabajabilidad, la porosidad, la permeabilidad, grado de compactación y la segregación. Esos factores representan las características importantes del concreto fresco y también afectan sus propiedades cuando ya ha fraguado, resistencia a la contracción y durabilidad (Adam, 2000, p. 112).

Contenido de finos

Los agregados reciclados suelen tener altos porcentajes de arenas finas, es decir, el material que pasa por el tamiz N°200. Por un lado, se ha observado que las propiedades de una partícula se empobrecen con la disminución de su tamaño y afecta directamente la trabajabilidad de las mezclas de concreto o mortero. Por otro lado, se ha comprobado que los procesos de reciclaje influyen en la producción de finos, ya que los sistemas de trituración primario generan poca cantidad de fino en comparación con los

sistemas que incorporan trituración con molinos de impacto. (Sáiz Martínez, 2015, p. 34)

Forma y textura superficial

La forma de las partículas de los agregados tiene influencia en las propiedades de la mezcla, las partículas angulares requieren más agua para lograr trabajabilidad, además, la textura superficial del agregado afecta a la adherencia a la pasta de cemento. Esta circunstancia hace que los morteros y los concretos que se elaboren con agregados reciclados presenten problemas durante la etapa de mezclado.

La forma y la textura superficial de las partículas de agregados reciclados depende principalmente del tipo de triturado al que han sido sometidos y en función del material que se quiera obtener se puede modificar la abertura de la trituradora. Las partículas de los agregados reciclados suelen presentar una textura más rugosa y porosa que las de los agregados naturales debido a la presencia de mortero adherido a la superficie del agregado.

El concreto elaborado con agregados con forma redondeada presentan un mejor comportamiento en las propiedades de trabajabilidad y resistencia. Los agregados que presentan una forma angulosa tienen una mayor superficie específica que los agregados redondeados y producen una mejora en las mezclas en cuanto a adherencia se refiere. Siendo la forma y la textura de los agregados una gran influencia en la resistencia del concreto (Adam, 2000, pp. 78-80).

Densidad y absorción

Debido a la cantidad de mortero adherido, las propiedades de absorción y densidad de los agregados reciclados se ve significativamente afectadas en comparación con los agregados naturales. Se pueden distinguir algunos factores que pueden influir tanto en la densidad como en la absorción de los agregados, por ejemplo (Sáiz Martínez, 2015, p. 32):

- En general, se ha demostrado una relación entre el tamaño de las partículas ya que a menor tamaño es mayor su absorción y una tiene una menor densidad.
- La densidad de los agregados reciclados está influenciada por el proceso y maquinaria empleada para la trituración.
- La calidad de los agregados reciclados depende del concreto de origen. Debido a esto, la importancia de una clasificación anticipada en obra.

Aunque no exista una relación clara entre la resistencia del concreto y la absorción de agua del agregado utilizado, los poros de la superficie de la partícula afectan la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento y por lo tanto puede ejercer cierta influencia en la resistencia del concreto (Adam, 2000, p. 90).

Resistencia al desgaste

“La resistencia a la abrasión es un indicador de resistencia al desgaste”. Debido a la pérdida de densidad que se produce cuando se retira parcial o totalmente el mortero adherido, el desgaste en los agregados reciclados presenta valores superiores a los de los agregados naturales, esta pérdida se puede minimizar empleando trituraciones sucesivas para eliminar el mortero y conseguir valores comparables a los de los áridos naturales. La resistencia a la abrasión de los AR, como todas las demás propiedades, está influenciada por el material de procedencia (Sáiz Martínez, 2015, pp. 33-34).

Contaminantes e impurezas

Es uno de los problemas que frecuentemente presentan lo AR. La presencia de diversas sustancias puede producir pérdida de resistencia en el mortero y concreto, como ataques por sulfatos

debido a la presencia de yesos o presencia de arcillas que produzcan una mayor compresión. Los contaminantes e impurezas presentes en los agregados reciclados dependen de la procedencia de los mismos, en caso de los agregados reciclados de concreto presentan menor cantidad de impurezas a comparación con los agregados mixtos.

Producir concreto con impurezas que puedan interferir con las reacciones químicas de hidratación, en el caso de encontrarse materia orgánica la descomposición de materia vegetal puede manifestarse como humus o margas orgánica (Adam, 2000, p. 94).

Reacción Álcali - Sílice

Las arenas que contienen minerales silicatados pueden reaccionar con los álcalis del cemento, produciendo un deterioro del concreto fabricado. Esta reacción lleva consigo la formación de geles que en presencia de humedad producen su expansión, ocasionando agrietamientos y movimientos diferenciales, disminuyendo su durabilidad. Los AR debido a la presencia de mortero adherido pueden facilitar este tipo de reacciones. El empleo de cementos con adiciones de cenizas volantes o escorias disminuye la reacción álcali-sílice (Adam, 2000, pp. 99-100).

Contenido de cloruros

“La cantidad de cloruros que pueden presentar los AR, está relacionada con el origen del concreto”. En la recuperación de materiales de obra es posible encontrar una cantidad de cloruros superior a los límites establecidos por la normativa, esto influenciado por su ubicación geográfica, por ejemplo, obras que han estado en contacto con agua de mar o en zona de montaña. Otra causa, es el uso de aditivos en los materiales de construcción que podría favorecer un mayor contenido de cloruros en los agregados obtenidos de estos (Sáiz Martínez, 2015, p. 36).

Contenido de sulfatos

“El contenido de sulfatos en los AR, presenta una mayor problemática en comparación que el contenido de cloruros”. Los sulfatos se pueden encontrar en los agregados reciclados por varias razones, como, que se origine de los propios agregados naturales, el mortero adherido, que haya presencia de yeso en los residuos. “El alto contenido en sulfatos puede provocar dilataciones por formación de etringita y por la aparición de hidróxido de calcio libre producido en la hidratación del cemento”. Este si bien es un punto observable, en los estudios recientes no se ha documentado que los límites que pone la normatividad sean superados (Sáiz Martínez, 2015, pp. 36-37).

Resumen sobre los aspectos de calidad de los agregados reciclados

Se considera necesario indicar algunas de estas propiedades generales de los agregados reciclados para extraer conclusiones de su posible comportamiento en comparación con el de los agregados naturales (Muñoz Socha, 2016, p. 19).

- a) Los agregados de reciclado de concreto, tienden a ser menos esféricos (20%) en comparación con los agregados naturales, lo cual es por un lado resulta negativo para la manejabilidad del concreto en su estado plástico, pero por otro lado es positivo ya que mejora la adherencia entre los agregados y la pasta.
- b) El contenido de material que pasa la malla #200 (limos y arcillas), es muy alto en los agregados reciclados.
- c) En los ensayos de resistencia al desgaste, los agregados reciclados tienen significativamente menor resistencia comparado al de los agregados naturales. Esta propiedad afecta la resistencia y durabilidad del concreto.
- d) Los agregados reciclados procedentes de concreto tienen mayor porosidad, lo que implica un mayor porcentaje de absorción de agua y una densidad menor en comparación con los

agregados naturales.

- e) Las propiedades mecánicas de los concretos realizados con agregados reciclados resultan inferiores a los concretos fabricados con agregado natural, sin embargo, los primeros llegan a alcanzar valores que se exigen comúnmente.

Influencia de agregados reciclados en el comportamiento del concreto

Diferentes estudios han establecido la viabilidad de que los agregados reciclados en la elaboración de concreto, estos se centran fundamentalmente en la comprobación de sus características mecánicas y de su durabilidad. Demostrando que los agregados reciclados dentro de las mezclas, pueden alcanzar propiedades mecánicas similares a los agregados convencionales.

Diferentes autores han estudiado las distintas proporciones de agregados reciclados en sustitución de los naturales, con el objetivo de elaborar mezclas en las que los aspectos negativos del material reciclado y que este no comprometa las propiedades del concreto. Diferentes autores consideran el uso de solo un tipo agregado reciclado en el diseño de mezcla, ya que por su alta capacidad de absorción de agua y su cohesión, dificulta el cumplimiento en el control en sus estados tanto de concreto fresco como endurecido (Martín-Morales, 2013, p. 67).

- **Agregados Gruesos**

Los agregados gruesos reciclados, tienen una textura de superficie más alargada, irregular y áspera, presentan mayor porosidad que los agregados naturales, estas características se reflejan directamente en la absorción del agua, además de la disminución de la trabajabilidad de las mezclas de concreto.

Diversos estudios indican que el uso de agregado grueso reciclado de materiales mixtos provoca en el concreto una disminución en su resistencia a la compresión que varía del 25 al 45% cuando se utiliza únicamente agregado reciclado, cuando el remplazo fue menor al 15% no se observan cambios significativos en la resistencia. En general, el uso de agregados gruesos reciclados representa una disminución en la calidad del concreto y sus propiedades, se recomienda su uso en elementos no estructurales (Urrutia Segura y Ávalos Rendón, 2019, p. 52).

- **Agregados finos**

Los agregados finos reciclados pueden contener grandes cantidades de polvos finos, mortero adherido e impurezas como asfalto, papel, madera, vidrio, plástico u otros desechos de construcción. Los polvos finos reducen la trabajabilidad del concreto en estado fresco y las propiedades mecánicas del concreto endurecido debido a su mayor absorción de agua. Adicionalmente, el mortero adherido absorbe cantidades relativamente grandes de agua de la mezcla. Generalmente los agregados finos reciclados son más porosos que los naturales y presentan mayor absorción de agua, lo que conduce a concretos con bajos rendimientos, afectando las propiedades.

Algunos estudios discuten que las características físicas y mecánicas, así como la durabilidad del concreto se ve afectado según aumente el porcentaje de sustitución de arena reciclada. Los concretos elaborados con arena reciclada, producto de residuos de concreto, presentan una reducción sistemática de la resistencia mecánica de hasta 30% cuando se reemplaza completamente el agregado natural. En el caso de los concretos elaborados con agregados finos de residuos mixtos, no presentan reducciones importantes cuando es alto el porcentaje de remplazo del agregado natural, hasta un 50% la resistencia es similar a la obtenida a una mezcla convencional y con una sustitución al 100% la reducción es menor al 10% (Urrutia Segura & Ávalos Rendón, 2019, p. 53).

Por otra parte, hay quienes consideran que el concreto elaborado con agregados finos reciclados, experimentan cierto aumento en su resistencia mecánica. Algunos estudios afirman los aportes de las arenas recicladas, discutiendo que la razón por la que los resultados en las pruebas a compresión se mantienen los resultados y en otros casos llegan a aumentar a pesar de incrementarse el porcentaje de sustitución de las arenas naturales, es porque la arena reciclada aporta un mayor contenido de cemento hidratado como no hidratado, que puede encontrarse en una proporción entre el 20-30% de su peso, incrementándose por lo tanto el contenido de cemento total de la mezcla. Por otro lado, se le atribuye a la rugosidad y a la mayor superficie específica con la que cuenta la arena reciclada, que contribuye a una mejor interconexión entre el agregado y la pasta de cemento (Martín-Morales, 2013, pp. 69-70).

La sustitución de arena natural por reciclada para aplicaciones de concreto estructural (aun estando restringida por la normatividad), ha sido también objeto de estudio. En la actualidad ha surgido el interés de diferentes autores y con ello la cantidad de investigaciones que han obtenidos datos positivos. Admitiendo que estos resultados van condicionados por una buena gestión del material reciclado, así como de la buena calidad del material de procedencia (Martín-Morales, 2013, p. 69).

3.4. Normas para el control de calidad con aplicabilidad a agregados reciclados

Delimitando el objeto de estudio analizaremos el tema correspondiente dirigido al control de calidad aplicado a agregados finos.

Como hemos señalado anteriormente, la calidad de los agregados reciclados tiene que ver directamente con las características de los materiales de los que proceden, para este apartado hay que indicar la necesidad de normas adecuadas para llevar a cabo una mejora en la clasificación específica por tipo de material de origen.

Por otra parte, al no existir normatividad específica en materia de agregados reciclados se tendrá el control de calidad a partir de las normas aplicables a los agregados finos naturales, para esto se propone un apego a las normas mexicanas de la industria de la construcción del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE).

La normatividad aplicada para el control de calidad de agregados reciclados esta propuesta por la siguiente lista de normas que se presentan a continuación (ONNCCE, 2022):

Tabla 7
Muestreo de agregados

Norma	NMX-C-073-ONNCCE-2004
Título	Agregados - Muestreo
Objetivo	Esta Norma Mexicana establece el método de prueba para la determinación de la masa volumétrica de los agregados finos y gruesos o de una combinación de ambos. Este método es aplicable a agregados cuyo tamaño máximo nominal no exceda de 150 mm.
Descripción	El método establece tomar una muestra de agregado de acuerdo con el método de muestreo descrito en la NMX-C-030-ONNCCE, y se reduce a un volumen de aproximadamente 1.5 veces la capacidad del recipiente que se va a emplear, de acuerdo con la NMX-C-170-ONNCCE. La muestra de agregados debe secarse hasta masa constante en el horno a una temperatura dada, para lo cual la muestra del material que se va a secar se introduce en el horno y periódicamente se seca, se deja enfriar y se pesa.

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-073-ONNCCE-2004

Tabla 8

Análisis granulométrico

Norma	NMX-C-077-1997-ONNCCE
Título	Análisis granulométrico – Método de prueba
Objetivo	Esta Norma Mexicana establece el método para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos con el fin de determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños por medio de cribas.
Descripción	El método establece que la muestra del agregado que se va a emplear para el análisis granulométrico debe tomarse de acuerdo con la NMX-030-ONNCCE y reducirse de acuerdo con lo indicado en la NMX-C-170-ONNCCE. El agregado fino debe humedecerse antes de iniciar la reducción del tamaño de la muestra para evitar la segregación, siendo el objetivo del método determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños por medio de cribas.

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-077-1997-ONNCCE.

Tabla 9

Determinación de impurezas

Norma	NMX-C-088-ONNCCE-2019
Título	Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino -Método de ensayo
Objetivo	Esta Norma Mexicana establece el método de prueba para la determinación aproximada de la presencia de materia orgánica dañina en agregados finos que se usan para la fabricación de concreto.
Descripción	Tomar una muestra representativa del material de 1.5 kg, secarla en el horno por 24 horas a 105 °C hasta que el agregado se encuentre totalmente seco, se añade una solución de hidróxido de sodio, después de cierto tiempo se determinara el contenido de materia orgánica.

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-088-ONNCCE-2019.

Tabla 10

Método de prueba de partículas finas

Norma	NMX-C-084-ONNCCE-2006
Título	Partículas más finas que la criba 0.075 mm (No. 200) por medio de lavado – Método de prueba
Objetivo	Esta Norma Mexicana especifica el método de prueba para determinar el contenido de partículas más finas de la criba 0.075 mm (No. 200) por medio de lavado. Las partículas de arcilla y otras que se disgregan por el agua de lavado y las que son solubles en el agua son separadas durante esta prueba.
Descripción	La muestra del agregado que se va a ensayar debe tomarse de acuerdo con lo indicado e la NMX-C-030-ONNCCE, y mezclarse completamente para reducirse de acuerdo con lo indicado en la NMX-C-170-ONNCCE, a un tamaño adecuado para el ensayo. La muestra de agregados se lava por agitación y el agua que contiene los materiales disueltos y en suspensión, se separa por decantación, pasándola por la criba 0.075 mm (No 200). La pérdida de masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como por ciento de la masa de la muestra original y se informa como el porcentaje del material más fino que la criba 0.075 (No 200) obtenida por el lavado.

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-084-ONNCCE-2006.

Tabla 11

Determinación de la densidad relativa del agregado grueso

Norma	NMX-C-164-ONNCCE-2014
Título	Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso – Método de ensayo
Objetivo	Esta Norma Mexicana establece el método de ensayo para la determinación de la densidad relativa y la absorción del agregado grueso. Esta Norma Mexicana es aplicable a los agregados con tamaño máximo de 76 mm (3 pulgadas).
Descripción	Esta norma establece el método para determinar la relación de la densidad del agregado a la masa del volumen de agua que desplaza al sumergirse en ella, también el aumento de la masa del agregado seco debido al agua que se introduce en los poros del material. Esta norma especifica el equipo a utilizar, la forma de preparar y acondicionar las muestras, las condiciones ambientales, el procedimiento del ensayo, el cálculo y la expresión de resultados.

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2014.

Tabla 12

Determinación de densidad relativa del agregado fino

Norma	NMX-C-165-ONNCCE-2014
Título	Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino – Método de ensayo
Objetivo	Esta Norma Mexicana establece el método de ensayo para la determinación de la densidad relativa aparente y la absorción del agregado fino en la condición saturada y superficialmente seca. Esta norma aplica a los agregados finos de un tamaño máximo de 4.75 mm (malla No. 4).
Descripción	Esta norma establece el método para determinar la relación de la densidad del agregado a la masa del volumen de agua que desplaza al sumergirse en ella, también el aumento de masa del agregado seco debido al agua que se introduce en los poros del material. Esta norma especifica el equipo a utilizar, la forma de preparar y acondicionar las muestras, las condiciones ambientales, el procedimiento del ensayo, el cálculo y la expresión de resultados.

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-165-ONNCCE-2014.

3.5. Reflexión capitular

El análisis a partir del proceso de obtención de los agregados reciclados mostró tener una importancia relevante en la calidad resultante y en consecuencia impactar en los productos para la construcción.

En la Ciudad de México y en general a nivel nacional estos procesos aún se encuentran en un nivel tecnológico básico, si se compara a nivel mundial, situación que no debe limitar los avances en la investigación, contrariamente es una oportunidad para hacer propuestas y aumentar los porcentajes del uso de agregados reciclados.

De la revisión anterior, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Es necesario incrementar el nivel de confianza que se tienen de los agregados reciclados, para esto es necesario tener estándares de calidad y normatividad que los rija.
- El tratamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD) no debe comenzar en la

planta de tratamiento, sino que debe ser considerado desde el momento de diseño, producción, uso, deconstrucción o demolición.

- Las plantas procesadoras de RCD en la CDMX han demostrado tener la capacidad de procesar los residuos que se generan, pero no deben volverse en sitios de acumulación.
- Los agregados reciclados tienen propiedades que, si bien pueden ser desventajosos en comparación con los agregados naturales, también son puntos de partida para el diseño de materiales con aplicaciones específicas.
- Los agregados reciclados a nivel mundial han sido útiles en la producción de concreto con propiedades técnicas adecuadas para la construcción.
- Son necesarios los estudios regionales para conocer los beneficios de reciclar, evaluar los recursos materiales y económicos, analizar los procesos, así como los alcances técnicos y tecnológicos.

El uso de agregados reciclados está en tendencia y con un cambio de paradigma se convertiría en una práctica común, la difusión de sus aplicaciones y de los impactos en los materiales de construcción, podría llevar a los diferentes integrantes de la industria de la construcción sustituir porcentajes de material natural por reciclado, aunado a los avances tecnológicos con el tiempo lograr mayores impactos.



CAPÍTULO 4

4. Método experimental del proyecto

En este capítulo se detallan los aspectos del método experimental del proyecto. Una vez determinada como una prioridad el apoyar el desarrollo sustentable de la arquitectura, enlistar los recursos y los procesos para la obtención de materiales reciclados y analizadas las características documentadas sobre los agregados de concreto reciclado, es posible establecer los pasos necesarios para alcanzar los objetivos definidos de esta investigación.

Para que la experimentación tenga validez, se siguieron los procesos detallados en normas nacionales e internacionales vigentes, se realizó una comprobación de las propiedades físicas del material reciclado, mediante pruebas de tamizado para conocer su granulometría y módulo de finura.

Se hizo un muestreo de diferentes diseños de mezcla y se llevó control del registro de su resistencia a las fuerzas de compresión en diferentes tiempos de fraguado. Para esta investigación es primordial conocer los efectos en la sustitución de los materiales naturales por reciclados al incrementar su porcentaje, conocer cómo se comportan en el proceso de elaboración de la mezcla, la trabajabilidad y la cohesión de los materiales en el concreto fresco y los resultados en la apariencia y de acabado en el concreto endurecido.

La materia prima para esta investigación son arenas de origen local obtenidos en la Ciudad de México, llevando este estudio de manera regional, ya que uno de los objetivos es establecer una comparativa entre agregados finos reciclados y arenas naturales en la elaboración de concreto con aplicación en pavimentos tipo A, con el uso de recursos comerciales disponibles.

Para lograr la aplicación en la arquitectura, se buscó diseñar un prototipo de adoquín con propiedades adecuadas según la norma y comparable con el producto comercial. Las pruebas mínimas requeridas por la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014, son los ensayos en pruebas de resistencia a la compresión, resistencia a la abrasión y porcentaje máximo de absorción de agua, adicionalmente se realizan pruebas para conocer el pH del material resultante y de microscopía óptica para observar la cohesión de los agregados con la pasta de cemento.

4.1. Diseño del método experimental

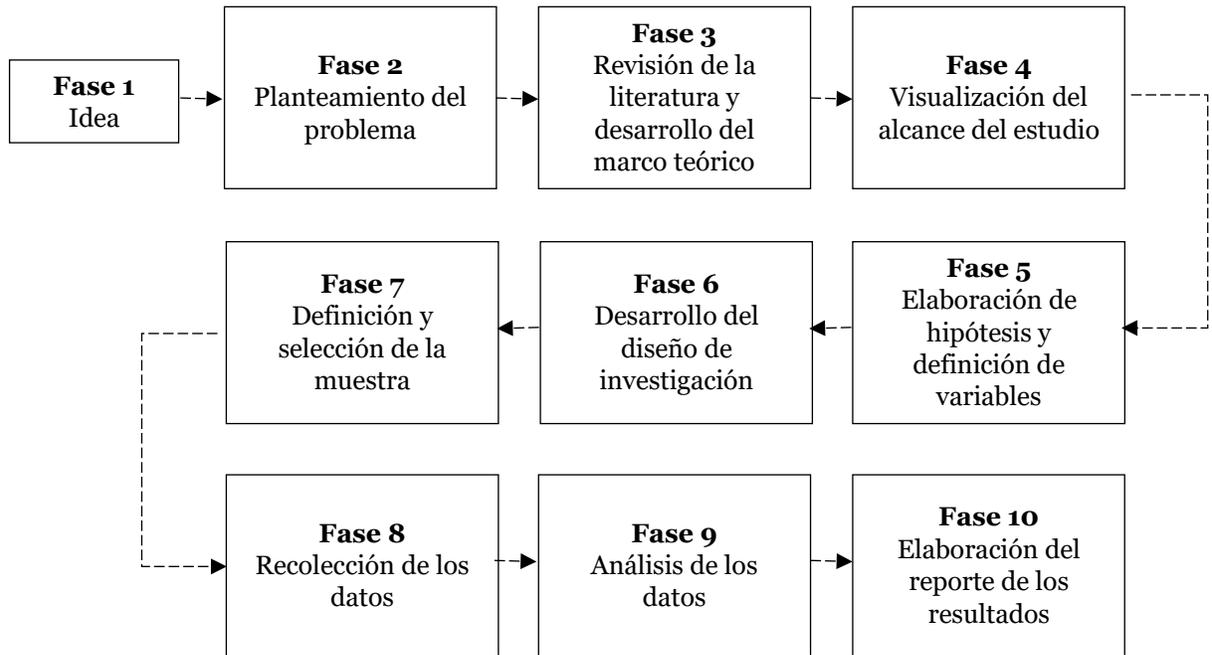
El método que se empleó para dar veracidad al estudio es de tipo experimental, mediante un proceso cuantitativo, [Figura 20](#) (Sampieri et al., 2014). Para lograr el objetivo de la investigación se llevó a cabo el cumplimiento y seriación de los pasos abstraídos en la [Figura 21](#). En el marco de investigación al ser de carácter tecnológico, el método debe contempló el uso de normas técnicas que den operatividad, veracidad, repetitividad y factibilidad a los resultados que se obtuvieron. El rigor del cumplimiento del método de investigación está directamente relacionado con la calidad de la información obtenida.

El proceso experimental ([Figura 22](#)) para el diseño de una mezcla ideal con agregados reciclados, consta como primer paso, conocer la materia prima y sus propiedades, para después hacer la sustitución parcial de los agregados finos naturales (arena) por agregados reciclados finos de concreto (50%, 60%, 70% 80%, 90% y 100% de sustitución). Además de una comparativa de sus propiedades por caracterización mecánica, tomando como medida de control una mezcla elaborada de forma convencional (testigo). Los resultados de las pruebas de caracterización mecánica son determinantes para comprobar si los agregados reciclados son capaces de sustituir a los naturales.

El objeto final a obtener es un prototipo de pavimento (adoquín), buscando la optimización de la mezcla de concreto con propiedades requeridas por la norma referente a pavimentos tipo A. Según la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014, las pruebas que debe satisfacer un adoquín son: el esfuerzo resistente a la compresión, a la abrasión y determinación del porcentaje de absorción de agua.

Figura 20

Proceso cuantitativo



Fuente: Metodología de la investigación (Sampieri et al., 2014)

Figura 21

Espacio experimental



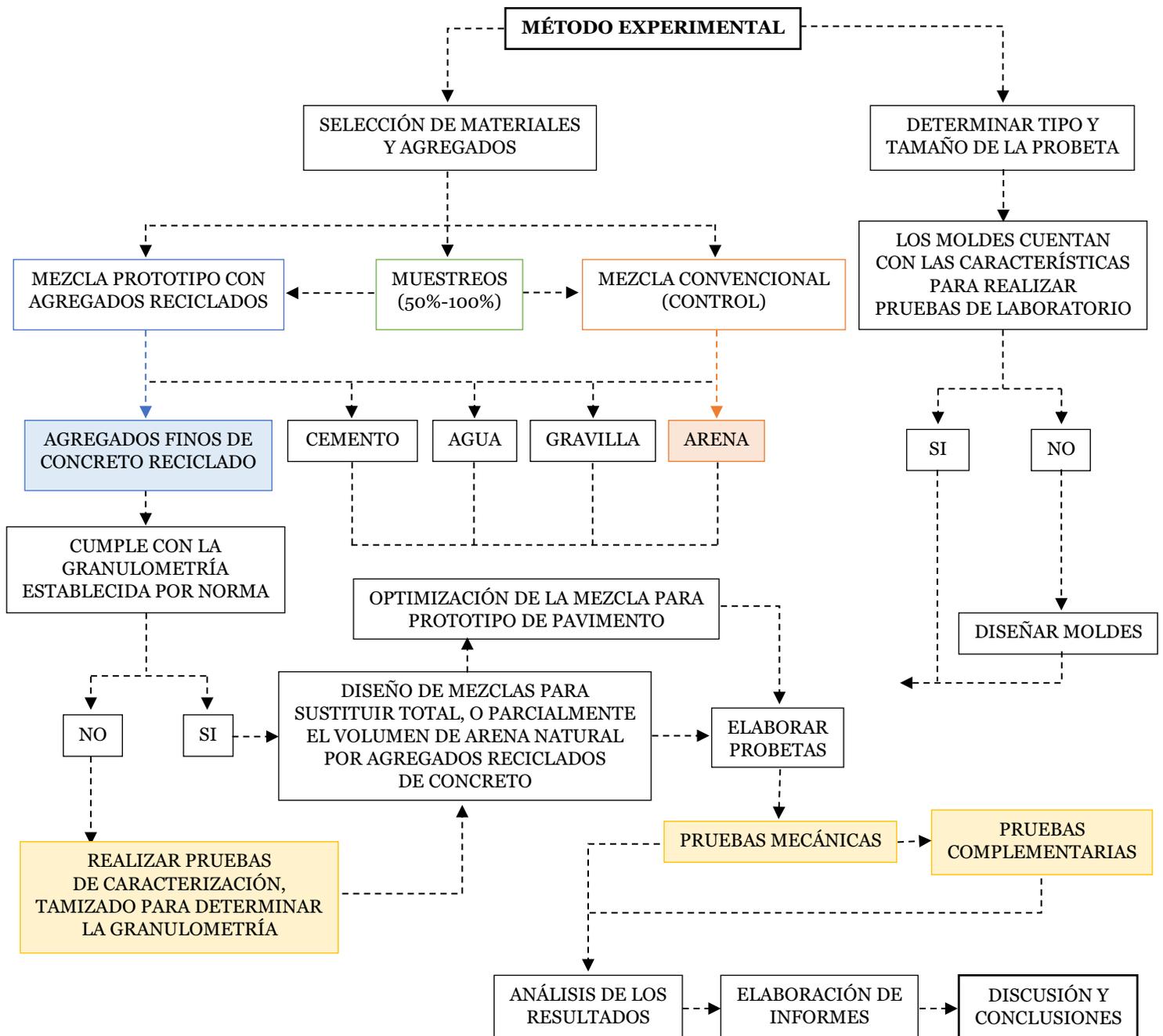
Fuente: Elaboración propia, imagen conceptual sobre el método experimental de la investigación.

Para agilizar la comprensión de estos procesos se plantea un espacio experimental dividido en 5 fases: Iniciando con la caracterización de los agregados reciclados ya que esto permitirá precisar su calidad y aplicaciones, la segunda fase es el diseño de las mezclas, la tercera fase es la elaboración, curado

y control de las probetas. Para el muestreo, se llevarán a cabo pruebas mecánicas de resistencia a la compresión para definir las proporciones en el que las propiedades del material no se vean comprometidas. Así llevarlas a una cuarta fase con la búsqueda de la mezcla ideal para el diseño del prototipo y llevar a cabo los ensayos requeridos por la normatividad vigente. Y finalmente, una quinta fase con el análisis y discusión de los datos.

Figura 22

Planteamiento general sobre la secuencia de las actividades



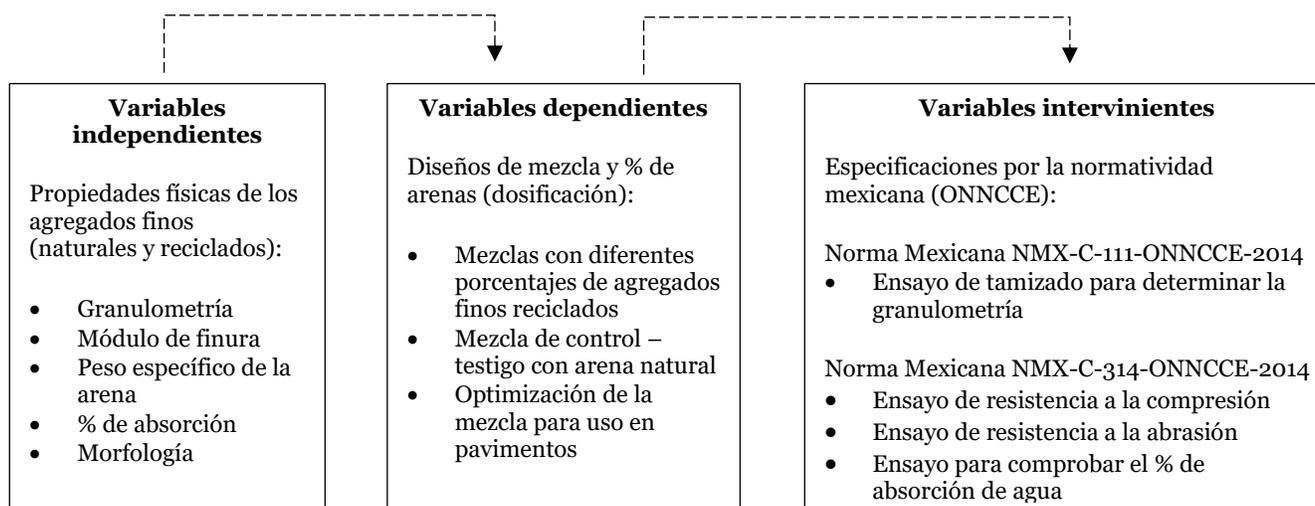
Fuente: Elaboración propia

Identificación de variables

Las variables otorgan propiedades cuantitativas y cualitativas (Figura 23). Para esta investigación se contará con una mezcla de control (con arenas naturales) y mezclas con diferentes porcentajes de agregados finos reciclados, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100% (Tabla 13). Los resultados de las pruebas de caracterización mecánica por el ensayo de resistencia a la compresión determinarán si se cumplen con las características mínimas necesarias según la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción – Mampostería- Adoquines para uso en Pavimentos – Especificaciones y Métodos de Ensayo”.

Figura 23

Variables de experimentación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

Muestra general de las mezclas

Mezcla	Dosificación variable				
	Arena natural	Arena reciclada	Agua	Gravilla	Cemento
Mezcla de control (testigo)	100%				
Mezclas con diferente % de sustitución	50-0%	50-100%	% Variable		Materiales de control
Mezcla optimizada (Prototipo)	-	100%			

Fuente: Elaboración propia

Las variables independientes identificadas son las referentes a las propiedades de los agregados finos. Los resultados de las pruebas de caracterización física por las pruebas de granulometría por tamizado, determinarán si los agregados finos de concreto cumplen con las características mínimas necesarias según la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo”, esta norma mexicana

establece las especificaciones y métodos de ensayo que deben cumplir los agregados naturales, procesados y mixtos de uso común para la producción de concretos de masa normal.

Las variables dependientes de la investigación son los diferentes diseños de mezcla y los porcentajes de dosificación de los agregados finos. Los resultados de las pruebas de caracterización mecánica por el ensayo de compresión, abrasión y absorción de agua determinaran si se cumplen con las características mínimas necesarias según la norma mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción – Mampostería- Adoquines para uso en Pavimentos – Especificaciones y Métodos de Ensayo”, esta norma mexicana aplica al adoquín utilizado en pavimentos para tránsito de peatones y vehículos, elaborado de concreto hidráulico, arcilla o de otros materiales.

Las variables intervinientes como se muestra son las referentes a la normatividad mexicana ya que estos son los parámetros de comprobación, se hará uso de las normas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).

Para la validación de los resultados es necesario contar con equipo de precisión y de instrumentos de medición apropiados. Para el apoyo de esta investigación se hace uso de las instalaciones de laboratorios facultados. Siguiendo los lineamientos de la normatividad vigente, conjunto de equipos calibrados y un correcto manejo de los materiales, la experimentación es replicable de ser necesario.

Materiales utilizados

Los materiales convencionalmente utilizados para la fabricación de adoquines son de origen pétreo, de esta manera al ser un material relativamente económico, por eso, es que los pavimentos conformados por adoquines se hayan vuelto un recurso asequible para la construcción (Montiel Miguel y Cottier Caviedes, 2017). Además, su fabricación es relativamente sencilla y es posible llevar un control de calidad en la elaboración de cada pieza. Sin embargo, existen características que deben cumplir por normatividad los materiales para la conformación del producto, a continuación, se hace un repaso de cada material utilizado.

Agregados finos naturales (arena): Es el material que pasa a partir del tamiz #4 hasta el tamiz #100, cuyo tamaño de partícula se encuentra entre 0.15mm y 4.75mm. Los agregados finos para la fabricación de adoquines deben cumplir los requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE. Para esta investigación, se refiere a arena natural constituida de gránulos duros, libre de materia orgánica. Esta arena se emplea como material de control y referencia para la comparación de sus propiedades físicas.

Se empleará arena gris por ser un material altamente comercial y de fácil disposición en la zona centro del país (Figura 24).

Agregados reciclados: La arena obtenida del procesamiento del concreto reciclado debe mantener las características de granulometría requeridas en los agregados finos naturales. Este material debe pasar a partir del tamiz #4 hasta el tamiz #100, cuyo tamaño de partícula se encuentra entre 0.15mm y 4.75mm.

Se harán pruebas de tamizado para determinar la granulometría y módulo de finura del agregado fino reciclado. Entendamos por granulometría, la distribución de los tamaños de las partículas del agregado, una buena combinación en el tamaño de los agregados resulta en una mejor distribución de las partículas y una mayor resistencia a los esfuerzos de compresión.

Este material es obtenido de la Planta de Tratamiento Concretos Sustentables Mexicanos S.A. de C.V., ubicada en avenida 5 de mayo #150, en las inmediaciones de la alcaldía Miguel Hidalgo, CDMX (Figura 24).

Figura 24

Agregados finos



Notas: Imagen izquierda: arena natural, imagen derecha: arena de concreto reciclado

Agregados Gruesos: Es el material cuyas partículas quedan retenidas en el tamiz #4, es decir no mayor a 9.50mm ni menor a 4.75mm. Los agregados gruesos para la fabricación de adoquines deben cumplir los requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE. Convencionalmente se usa para el diseño de la mezcla granzón, así que en específico se emplearán agregados con un tamaño máximo nominal de 9.5mm (3/8”).

Cemento: Cemento Portland Ordinario Tipo 1 (también denominado como Cemento Tipo 1-RTCR). El cemento empleado para la fabricación de adoquines debe cumplir los requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE.

Según datos del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC, 2022a) el Cemento Portland Ordinario es excelente para construcciones en general, zapatas, columnas, trabes, castillos, dalas, muros, losas, pisos, pavimentos, guarniciones, banquetas, muebles municipales (Bancas, mesas, fuentes, escaleras), etc. Ideal para la elaboración de productos prefabricados (Tabicones, adoquines, bloques, postes de luz, lavaderos, balaustradas, pilteas etc. Además de cumplir con la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE.

Agua: Agua embotellada, esto con el fin de descartar cualquier impacto provocado por un exceso de impurezas en el agua. De esta manera se garantizan las condiciones del agua durante el proceso de experimentación, considerando la duración de la investigación.

* **Aditivos:** Si bien algunas investigaciones consultadas hacen el uso de aditivos en el diseño de la mezcla, para esta investigación no se plantea, con el fin de apegarnos a los objetivos de esta investigación y observar los impactos de los agregados reciclados sin intervención de agentes adicionales. Teniendo esto en cuenta solo hay que contemplar que en la elaboración del concreto para adoquines se permite el uso de aditivos que mejoren las propiedades del producto y se debe cumplir con las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-255-ONNCCE.

El uso de aditivos sirve para modificar una o varias propiedades de las mezclas e incrementar sus cualidades. Una clasificación de los aditivos, es de acuerdo a su efecto (plastificadores, superplastificadores, inclusores de aire, aceleradores y retardadores), según las investigaciones consultadas los aditivos más empleados son los plastificantes (IMCYC, 2006).

- **Plastificantes:** Cuando se agregan a una mezcla de concreto, los plastificantes (agentes reductores de agua) son absorbidos en la superficie de las partículas de los aglomerantes,

haciendo que se repelan entre sí, lo cual da como resultado una mejora en la trabajabilidad y proporciona una distribución más uniforme de las partículas del aglomerante a través de la mezcla. Los principales tipos de plastificantes son los ácidos lignosulfónicos y sus sales, los ácidos carboxílico hidroxilados y sus sales, y modificaciones de ambos.

- Usos:
 - Los plastificantes usualmente incrementan el revenimiento del concreto con un contenido de agua dado.
 - Los plastificantes pueden reducir el requisito de agua de una mezcla de concreto para una trabajabilidad dada, como regla práctica, en aproximadamente 10%.
 - La adición de un plastificante posibilita alcanzar una resistencia dada con un menor contenido de cemento.
 - Los plastificantes pueden mejorar la bombeabilidad.

4.2. Normatividad y métodos de ensayo

Con la finalidad de dotar de certeza a los datos recabados en la experimentación, se reunieron las consideraciones necesarias para validar el proceso. Por ello las pruebas a realizar deben cumplir con la normatividad establecida. Para las pruebas mecánicas se usaran criterios establecidos por la normatividad mexicana, emitidos por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE, 2022).

Para los ensayos de caracterización granulométrica de los agregados finos (arenas), se tomará como referencia la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo”. Esto para determinar la proporción de las partículas finas, medias y gruesas en las arenas, determinar su módulo de finura y finalmente determinar la calidad de las arenas.

Para los ensayos de caracterización de las mezclas, se tomará como referencia la norma mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción – Mampostería- Adoquines para uso en Pavimentos – Especificaciones y Métodos de Ensayo”. Las especificaciones de los adoquines según la norma, para la investigación son referentes de lo que mínimamente se debe alcanzar en la elaboración de la mezcla. Las pruebas de caracterización mecánica brindarán información que comprobara o negara la hipótesis. Según la norma mexicana, las pruebas que debe satisfacer un pavimento (adoquín) son: resistencia a la compresión, resistencia a la abrasión y porcentaje de absorción de agua.

A continuación, se describen las especificaciones y métodos de ensayo mínimos necesarios requeridos para la elaboración de adoquines, según la normatividad mexicana.

Caracterización de materiales

Para cumplir los objetivos y según la ruta planteada para el análisis experimental son necesarios recursos que fundamenten el estudio, por lo que es necesario el apoyo de un laboratorio para las pruebas de caracterización granulométrica de los agregados finos.

Se harán pruebas de tamizado para determinar la granulometría de los agregados finos naturales como punto de referencia y de los agregados finos reciclados, para eliminar la incertidumbre sobre la calidad de los agregados. Entendamos por granulometría, la distribución de los tamaños de las partículas del agregado, una buena combinación en el tamaño de los agregados resulta en una mejor distribución de las partículas y una mayor resistencia a los esfuerzos de compresión.

Para los ensayos de caracterización de los agregados reciclados finos de concreto, se tomará como referencia la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo”. A continuación, ser retomaran especificaciones de los agregados finos según la norma, para la investigación son referentes

de lo que mínimamente deben cumplir los agregados para la producción de concretos. Inicialmente debemos especificar las siguientes definiciones:

- **Agregados:** Son materiales de naturaleza pétreo que pueden proceder de minas, de bancos de extracción, de la naturaleza de elementos de concreto o también resultantes de un proceso industrial que, al ser mezclados con cementantes, permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros.
- **Agregado fino:** Es el material conocido como arena que pasa por la criba con abertura de 4.75mm (malla No.4) y se retiene en la criba con abertura de 0.075mm (malla No.200) y cuya composición granulométrica varía entre los límites especificados.
- **Módulo de finura:** Es la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en las cribas 4.75mm (malla No.4), 2.36mm (malla No.8), 1.18mm (malla No.16), 0.600mm (malla No.30), 0.300mm (malla No.50) y la 0.150 (malla No.100), divididos entre 100, aplicable a la arena.

Se sugiere que los agregados finos cumplan con la granulometría especificada en la Tabla 14, para la obtención de estos datos se realiza la prueba de tamizado a la arena gris (natural) y a la arena de concreto (reciclada). Ambas comercializadas en la Ciudad de México, para obtener la curva granulométrica y su módulo de finura.

Tabla 14

Límites de granulometría para agregado fino

Criba Mm (malla No.)	Material acumulado en masa, en porcentaje; % que pasa por la malla
9,5 (3/8")	100
4,75 (No. 4)	95 - 100
2,36 (No. 8)	80 - 100
1,18 (No. 16)	50 - 85
0,600 (No. 30)	25 - 60
0,300 (No. 50)	10 - 30
0,150 (No. 100)	2 - 10

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014.

Especificaciones sobre adoquines

A continuación, se retomarán las especificaciones sobre adoquines según la norma, para la investigación son referentes de lo que mínimamente se debe alcanzar en la elaboración de la mezcla. Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción – Mampostería- Adoquines para uso en Pavimentos – Especificaciones y Métodos de Ensayo”.

Inicialmente debemos especificar las siguientes definiciones:

- **Adoquín:** Unidad prefabricada de concreto o de otros materiales, con forma prismática, cuyo diseño geométrico del área expuesta permite la colocación autotrabada de piezas en forma continua para formar pavimentos.
- **Prefabricado:** Material o sistema formado por partes fabricadas previamente para su montaje

posterior (RAE, 2022).

- **Área expuesta:** Es el área de la proyección horizontal de la figura delimitada por las caras verticales y que queda expuesta al tránsito peatonal o vehicular. Los adoquines tendrán una cara de vista con textura antiderrapante, que es la superficie que queda expuesta hacia arriba y una cara base que es la superficie inferior en contacto con el suelo.
- **Tránsito peatonal:** Es aquel destinado únicamente para la circulación de personas.

Según la norma, los pavimentos se clasifican en cuatro tipos, como se indica en la [Tabla 15](#), de acuerdo al uso que se destina el adoquín.

Tabla 15

Clasificación de acuerdo al uso al que se destine el adoquín

Tipo	Espesor mínimo nominal en mm	Uso
A	60	Tránsito peatonal
B	60	Tránsito ligero
C	80	Tránsito medio
D	80	Tránsito pesado

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014.

Según la norma, de acuerdo al uso a que se destinan, los adoquines deben satisfacer los requisitos de resistencia a la compresión que aparecen en la [Tabla 16](#).

Tabla 16

Resistencia a la compresión de acuerdo al uso de los adoquines

Tipo	Resistencia media MPa (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual MPa (kg/cm ²)
A	29,4 (300)	24,5 (250)
B	39,2 (400)	35,3 (360)
C	44,1 (450)	39,7 (405)
D	55,0 (560)	50,0 (510)

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014.

La Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014, especifica que es indispensable satisfacer la prueba de resistencia a la abrasión, con el método de ensayo de la prueba de chorro de arena, la cual no debe representar una pérdida de volumen mayor a 15 cm³ por cada 50cm² del área sometida al disparo (0,3 cm³/cm²) y la reducción del espesor no debe ser mayor que 3mm.

Según la norma, de acuerdo al uso a que se destinan, los adoquines de concreto deben satisfacer los requisitos de absorción total de agua en 24hrs que parecen en la [Tabla 17](#).

Tabla 17

Absorción total de agua en 24 horas de acuerdo al uso de los adoquines

Tipo	Absorción media %	Absorción máxima individual %
A	8	11
B	7	9
C	7	9
D	5	7

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014.

Probetas

Según la Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014, para el muestreo para los ensayos debe ser con el número mínimo de piezas indicado en la (Tabla 18). Y establece que deben ejecutarse a los 7, 14 y 28 días de edad.

Tabla 18

Numero de muestras mínimo por tipo de ensayo

Tamaño	Número de piezas	Mínimo de piezas a ensayar		
		Absorción y dimensiones	Resistencia a la compresión	Resistencia a la abrasión
Por lote	8-15	3-5	3-5	2-5

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014.

Para el diseño de las probetas se tomó en cuenta lo que dice la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013 “La probeta para el ensayo debe tener una relación largo: ancho de la superficie de carga que no exceda de 1:2 y ninguno de los lados deben ser menores que el espesor. La probeta debe formar una figura con dos ejes de simetría perpendiculares entre sí”, de esta manera para determinar las dimensiones se hará uso de la norma internacional ASTM C109 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars - Cube Specimens (ASTM, 2022)).

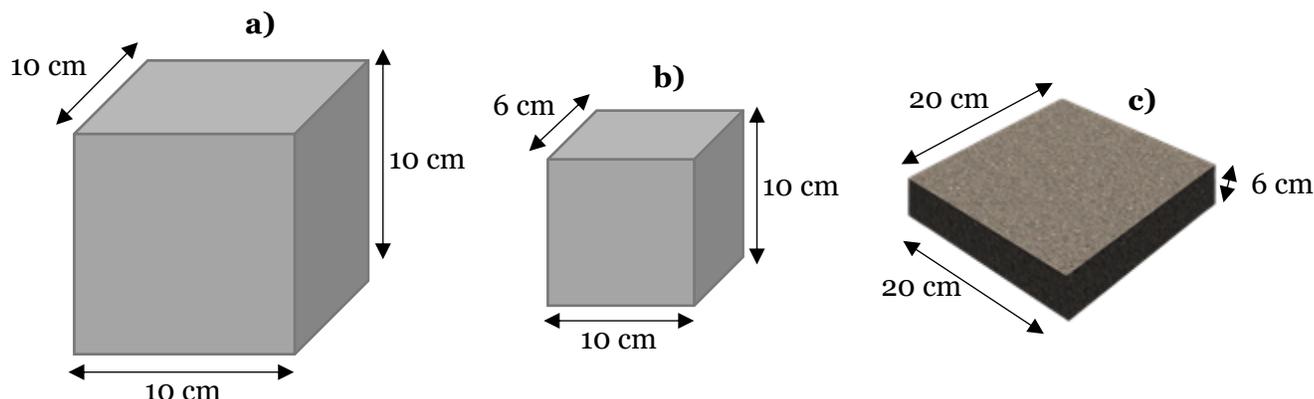
Se diseñaron moldes con las dimensiones y características necesarias según norma, las dimensiones de la probeta facilitan su preparación, manejo y traslado. Con base en tesis consultadas se planteó elaborar los moldes de madera, manteniendo las dimensiones de 10cm por lado para la etapa de muestreo, esta opción es conveniente por su fácil desmolde y obtener lados lisos, además de que es un material que no reacciona con las mezclas.

Para las pruebas de laboratorio del prototipo se diseñó el molde para la obtención de un adoquín de 20 cm de largo por 20 cm de ancho y 6 cm de altura (conforme a la norma) para las pruebas de resistencia a la abrasión y para obtener el porcentaje de absorción de agua, para las pruebas de resistencia a la compresión se elaboraron moldes cúbicos correspondiendo a la altura del prototipo, 6 x 6 x 6 cm por lado.

Es primordial elaborar el diseño gráfico de las probetas antes de su elaboración para evitar desperdicios de material y obtener exactitud en sus dimensiones (Figura 25).

Figura 25

Dimensiones de las probetas



Notas: Elaboración propia: a) molde para ensayos resistencia a compresión muestreo, b) molde para ensayos resistencia a compresión prototipo y c) molde para resistencia a la abrasión y porcentaje de absorción de agua de prototipo.

Se deben verificar las irregularidades de las probetas antes del ensayo, se debe hacer el ensayo preferentemente haciendo uso de las caras lisas no expuestas durante el colado.

Métodos de ensayo

Para cumplir los objetivos planteados, se emplearon técnicas de caracterización mecánica, con la finalidad de determinar la interacción de los agregados reciclados con los demás componentes en las mezclas de concreto.

- **Resistencia a la compresión**

El ensayo de compresión se realiza para determinar las propiedades de un material frente a una sollicitación axial negativa. Para los ensayos a la compresión, se tomará como referencia la Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013 “Industria de la construcción – Mampostería- Resistencia a la Compresión de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones y Adoquines - Métodos de Ensayo” (Tabla 19).

Tabla 19

Especificaciones para ensayo de resistencia a la compresión - Adoquines

Normatividad	Equipos de precisión	Tamaño de la muestra y tiempos de ensayo	Información producida del ensayo
Resistencia a la compresión NMX-C-036-ONNCCE-2013 “Industria de la construcción – Mampostería- Resistencia a la Compresión de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones y Adoquines - Métodos de Ensayo”	Báscula: Debe tener una capacidad mínima de 5000g con una precisión de $\pm 0.5g$. Vernier: Llevar un control de las dimensiones de las probetas. Precisión ± 0.1 mm. Máquina de ensayo: La máquina de ensayo puede ser de tipo a compresión o universal. El error permitido en la máquina, para la realización del ensayo a compresión, debe ser como máximo de $\pm 3\%$ de la carga aplicada.	Tamaño de la muestra: Cada muestra debe estar constituida por un mínimo de 3-5 piezas. Tiempos del ensayo: El material debe dejarse fraguar el tiempo necesario (7, 14 o 28 días) para alcanzar la resistencia.	Carga máxima en N (kg) de cada probeta. Esfuerzo resistente a la compresión especificada. Esfuerzo resistente a la compresión para cada probeta, calculado con aproximación de 0.01 MPa (0.1 kg/cm ²). Esfuerzo resistente promedio a la compresión para cada muestra con aproximación de 0.01 MPa (0.1 kg/cm ²). Defectos observados en el espécimen.

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013.

La prueba de resistencia a la compresión es la evidencia de la rigidez del diseño de mezcla en el concreto endurecido, esta prueba es primordial para alcanzar los objetivos de esta investigación. Esta prueba es usada en lapsos de 7, 14 y 28 días para las pruebas de muestreo, para pruebas específicas del prototipo se tomará en un tiempo de fraguado de 28 días.

Para el apoyo de estos ensayos se utiliza equipo de precisión (Figura 26) y las instalaciones del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE -UNAM, 2022b).

Figura 26

Equipo de precisión y ensayos de resistencia a compresión



Notas: Máquina de pruebas universales, del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura UNAM. Muestras de concreto ensayadas.

- **Resistencia a la abrasión**

Para determinar la resistencia a la abrasión, se tomará como referencia la Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción – Mampostería- Adoquines para uso en Pavimentos – Especificaciones y Métodos de Ensayo” (Tabla 20).

La resistencia a la abrasión es la habilidad de la superficie a resistir el desgaste realizado por el alto tráfico peatonal y de equipo mecánico. Con el tiempo, todos los pavimentos presentan cierto desgaste y raspaduras en la superficie. Algunas superficies soportan más abrasión que otras.

Esta prueba sirve para asegurar que el pavimento cumplirá con los estándares de resistencia a la abrasión, se determina con el ensayo de chorro de arena (conocido como sandblasting) verificando el volumen de material perdido del adoquín ante una acción controlada del agente abrasivo.

Tabla 20

Especificaciones para ensayo de resistencia a la abrasión - Adoquines

Normatividad	Equipos de precisión	Tamaño de la muestra y tiempos de ensayo	Información producida del ensayo
<p>Resistencia a la abrasión</p> <p>NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción – Mampostería- Adoquines para uso en Pavimentos – Especificaciones y Métodos de Ensayo”.</p>	<p>Báscula: Debe tener una capacidad mínima de 5000 g con una precisión de ± 0.5 g.</p> <p>Vernier: Llevar un control de las dimensiones de las probetas. Precisión ± 0.1 mm.</p> <p>Equipo de proyección de arena: Pistola tipo inyector, debe tener una corriente de aire a alta velocidad alimentada por un control de velocidad de flujo para el material abrasivo.</p> <p>Abrasivo: El abrasivo debe ser arena graduada que pase por la malla de $850\mu\text{m}$ (No. 20), siendo retenida en la malla $600\mu\text{m}$ (No. 30).</p>	<p>Tamaño de la muestra: Cada muestra debe estar constituida por un mínimo de 2-5 piezas.</p> <p>Tiempos del ensayo: El material debe dejarse fraguar el tiempo necesario, 28 días para alcanzar la resistencia. Ensayo en un periodo de 24 hrs.</p>	<p>Coefficiente de pérdida volumétrica de abrasión media en cm^3.</p> <p>Coefficiente de pérdida volumétrica de abrasión individual en cm^3.</p> <p>Volumen y densidad</p> <p>Defectos observados en el espécimen.</p>

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014.

La prueba de resistencia a la abrasión es la evidencia de la resistencia al desgaste del diseño de mezcla en el concreto endurecido, esta prueba es primordial para alcanzar los objetivos de esta investigación. Esta prueba es usada como prueba específica del prototipo, se tomará en un tiempo de fraguado de 28 días. Para el apoyo de estos ensayos se utiliza equipo de precisión (Figura 27) y las instalaciones del Laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC, 2022b).

Figura 27

Instalaciones del Laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.



Notas: Imagen tomada de la web <http://imcyc.com/app/wp-content/uploads/2016/06/servicio1.jpg>

- **Absorción de agua**

Para determinar la absorción de agua, se tomará como referencia la Norma Mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2013 “Industria de la construcción – Mampostería- Determinación de la Absorción Total y la Absorción Inicial de Agua en Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones - Métodos de Ensayo” (Tabla 21).

Definiciones:

- **Absorción inicial:** Es la cantidad de agua que absorbe un espécimen por capilaridad en una de sus caras bajo determinadas condiciones durante 10 min de inmersión en agua potable donde esta lo cubra 5 mm, manteniendo el nivel de agua constante en el recipiente y se expresa por un coeficiente de absorción.
- **Absorción volumétrica:** Cantidad de agua absorbida en litros por unidad de volumen aparente de la pieza en m³. El volumen aparente es aquel que corresponde a la geometría de la pieza y que incluye sus poros interiores, pero excluye el de las celdas.

Tabla 21

Especificaciones para ensayo de resistencia a la abrasión - Adoquines

Normatividad	Equipos de precisión	Tamaño de la muestra y tiempos de ensayo	Información producida del ensayo
<p>Absorción de agua máxima individual</p> <p>NMX-C-037-ONNCCE-2013 “Industria de la construcción – Mampostería- Determinación de la Absorción Total y la Absorción Inicial de Agua en Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones - Métodos de Ensayo”.</p>	<p>Báscula: Debe tener una capacidad mínima de 5000 g con una precisión de ± 0.5 g.</p> <p>Vernier: Llevar un control de las dimensiones de las probetas. Precisión +/- 0.1 mm.</p> <p>Recipiente con agua: De forma rectangular y área no menor a 1.936 cm² y con una profundidad mínima de 1.3 cm.</p>	<p>Tamaño de la muestra: Cada muestra debe estar constituida por un mínimo de 5 piezas.</p> <p>Tiempos del ensayo: El material debe dejarse fraguar el tiempo necesario, 28 días para alcanzar la resistencia. Ensayo en un periodo de 24 hrs.</p>	<p>Área de la sección para el cálculo de la absorción inicial de cada probeta, en cm², con aproximación al décimo.</p> <p>Absorción inicial individual y absorción promedio en g/ (cm² x min 0.5).</p> <p>Absorción total individual y absorción promedio en dm³/m³ y en porcentaje.</p> <p>En absorción máxima se reporta la absorción individual y la absorción promedio de las piezas.</p> <p>Defectos observados en el espécimen.</p>

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2013

La norma mexicana establece el método de ensayo para la determinación de la cantidad de agua que absorben las piezas de mampostería, así como la absorción inicial por capilaridad. El ensayo tiene como objetivo determinar la absorción de agua a través de la cara vista por capilaridad durante un periodo de tiempo de 24h, y medir la absorción total de agua por inmersión total hasta masa constante.

Esta prueba es usada como prueba específica del prototipo, se tomó en un tiempo de fraguado de 28 días. Para el apoyo de estos ensayos se utiliza equipo de precisión (Figura 28), se tomaron las medidas pertinentes para llevar a cabo este ensayo sin uso de instalaciones especializadas, respetando el rigor científico para la obtención de los datos.

Las condiciones ambientales no son determinantes en el ensayo, por lo que se puede efectuar a temperatura ambiente.

Figura 28

Imágenes de prueba para determinación de la absorción de agua y capilaridad



Notas: Imágenes propiedad del autor

- **Análisis visual por microscopio estereoscópico**

El análisis visual nos sirve para examinar la integración de los componentes en la mezcla de concreto, en específicos el de los agregados con la pasta de cemento. El microscopio estereoscópico es un tipo de microscopio óptico que nos permite observar la muestra generando una imagen en tres dimensiones. Esta es su característica principal que lo distingue del resto de microscopios donde la muestra siempre es observada en dos dimensiones (Figura 29). Los microscopios estereoscópicos, en cambio, observan la muestra a través de dos lentes distintas.

Figura 29

Toma de imágenes de concreto, pruebas visuales con microscopio estereoscópico



Notas: Imágenes propiedad del autor. Microscopio estereoscópico, del Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Posgrado UNAM.

Este tipo de microscopio es por lo tanto adecuado para observar de forma aumentada todo tipo de objetos sin necesidad de llevar a cabo un proceso de preparado de la muestra. Esto los hace muy útiles en todo tipo de campos y aplicaciones incluyendo el control de calidad de materiales. Para llevar a cabo esta actividad se hizo uso de un microscopio estereoscópico Motic modelo SMZ-161, del Laboratorio de conservación del patrimonio natural y cultural (Laboratorios - UNAM, 2022).

• Pruebas de pH

Para comprobar si la sustitución de agregados naturales por reciclados tiene alguna afectación al pH de las mezclas de concreto. Como primer paso se analiza el pH de las arenas (natural y reciclada) y anticipar si estas afectarían directamente el pH del concreto. Después, se realizaron pruebas de pH de la mezcla del prototipo de pavimento y se hace la comparativa contra una muestra de control.

Para el análisis del pH de las arenas y de las mezclas de concreto, se tomará como referencia la norma ASTM D-4262 “Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces”, con apoyo de un medidor de sobremesa multiparamétrico HANNA Modelo HI 2550 PH/EC/TDS/NaCl y de tiras reactivas de pH 0 a 14 marca Fermont (Figura 30).

- **Polvo:** Se utilizaron 10 g de material pulverizado de cada muestra homogenizada en 75 ml de agua destilada y se procedió a tomar las pruebas y registrar las lecturas arrojadas por el medidor de sobremesa multiparamétrico.
- **Muestra:** En secciones de concreto hidratado con agua destilada, se colocó directamente la tira reactiva de papel para medir el pH y proceder a hacer el registro.

Figura 30

Elaboración de pruebas de pH, pruebas a arenas y concretos



Notas: Imágenes propiedad del autor. Medidor de sobremesa multiparamétrico, del Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Posgrado UNAM.

Para llevar a cabo esta actividad se hizo uso de los recursos del Laboratorio de conservación del patrimonio natural y cultural (Laboratorios - UNAM, 2022).

4.3. Diseño de la mezcla inicial

Las investigaciones sobre agregados finos de concreto reciclado tienen suficientes datos teóricos para elaborar un diseño de mezcla y analizar los resultados, en un esfuerzo de incentivar su aplicación encontramos datos respaldados por el estado del arte. Para tomar una dirección diferente, vamos a analizar los impactos en diferentes porcentajes de sustitución y hacer recomendaciones en donde los procesos no se vean afectados por el uso de reciclados.

Todos los datos que recabados ayudan a alcanzar la optimización de la mezcla de concreto para el prototipo de adoquín.

Retomamos datos de la investigación sobre el uso de agregados reciclados y sus resultados para proporciones en concreto (Tabla 22) para definir una mezcla inicial de concreto con una resistencia a la compresión de 250 kg/cm² (Montiel Miguel y Cottier Caviedes, 2017, p. 41), con estos datos procedimos a elaborar diferentes diseños de mezclas con una variación en el porcentaje de sustitución de agregados finos.

El método que utilizó Montiel para el diseño de mezcla fue el ACI (American Concrete Institute), durante el proceso precisa que “los agregados reciclados resultan ser muy absorbentes y por esta razón se debe tener mucho cuidado al realizar el cálculo de corrección de agua por absorción” (2017, p. 40).

Tabla 22

Cantidades de material requerido para fabricar concretos con agregados reciclados

Tipo de pavimento	f _c de diseño kg/cm ²	Agua kg/m ³	Cemento kg/m ³	Grava kg/cm ³	Arena reciclada kg/cm ³
A	250	321	334	612	890
B	360	338	440	612	818
C	420	333	505	612	774
C	480	331	691	589	637

Fuente: (Montiel Miguel & Cottier Caviedes, 2017, p. 41)

En este paso no se llevaron a cabo ajustes por absorción de agua de los agregados, para observar el comportamiento en el proceso de mezclado variando solamente los porcentajes de agregados naturales y reciclados y dejando el resto de los componentes como materiales constantes.

Las variables otorgaron propiedades cuantitativas y cualitativas. Para esta investigación se contaron con una mezcla de control y mezclas con diferentes porcentajes de agregados finos reciclados (50, 60, 70, 80, 90 y 100%) Tabla 23.

Se analizó el acabado y la apariencia del material resultante, así como los resultados de las pruebas de caracterización mecánica por el ensayo de compresión para determinar el impacto de los agregados reciclados al incrementar el porcentaje de sustitución.

Tabla 23

Cantidades de material requerido en diferente porcentaje de sustitución de arena natural por reciclada - Pavimentos Tipo A

Pavimento Tipo A	Proporción AN/AR	Agua kg/m ³	Cemento kg/m ³	Grava kg/cm ³	Arena reciclada kg/cm ³	Arena natural kg/cm ³
Control	100% Natural	321	334	612	-	890
50%	50% / 50%	321	334	612	445	445
60%	60% / 40%	321	334	612	534	356
70%	70% / 30%	321	334	612	623	267
80%	80% / 20%	321	334	612	712	178
90%	90% / 10%	321	334	612	801	89
100%	100% reciclada	321	334	612	890	-

Nota: Elaboración propia

Para el diseño de la mezcla experimental, las variables son; principalmente los agregados finos reciclados de concreto y los diferentes porcentajes de sustitución de las arenas naturales, seguido del agua, ya que por las características de los reciclados (granulometría y porosidad) la demanda del líquido puede variar. De esta forma las variables de control son los agregados gruesos y el cemento.

Es así que, para la investigación se elaboró una mezcla de control y diferentes mezclas con porcentajes variables de sustitución de agregados finos naturales. Para el diseño de las mezclas se tomará inicialmente una proporción convencional por el método ACI para el diseño de una mezcla de concreto.

4.4. Determinación granulométrica de las arenas

En la práctica, no se realizan pruebas regulares para conocer las características granulométricas de las arenas, en especial de las arenas recicladas ya que no se tiene un control de calidad específico, por lo cual se desconocen las características que estas presentan.

Para obtener la curva granulométrica de las arenas se realizó una prueba de tamizado (Figura 31) tomando como referencia la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo”, los resultados de la prueba nos permitieron obtener los porcentajes de máximos y mínimos del tamaño del grano. Con estos registros es posible determinar si las arenas analizadas se encuentran dentro de los parámetros recomendados (Figura 32).

Figura 31

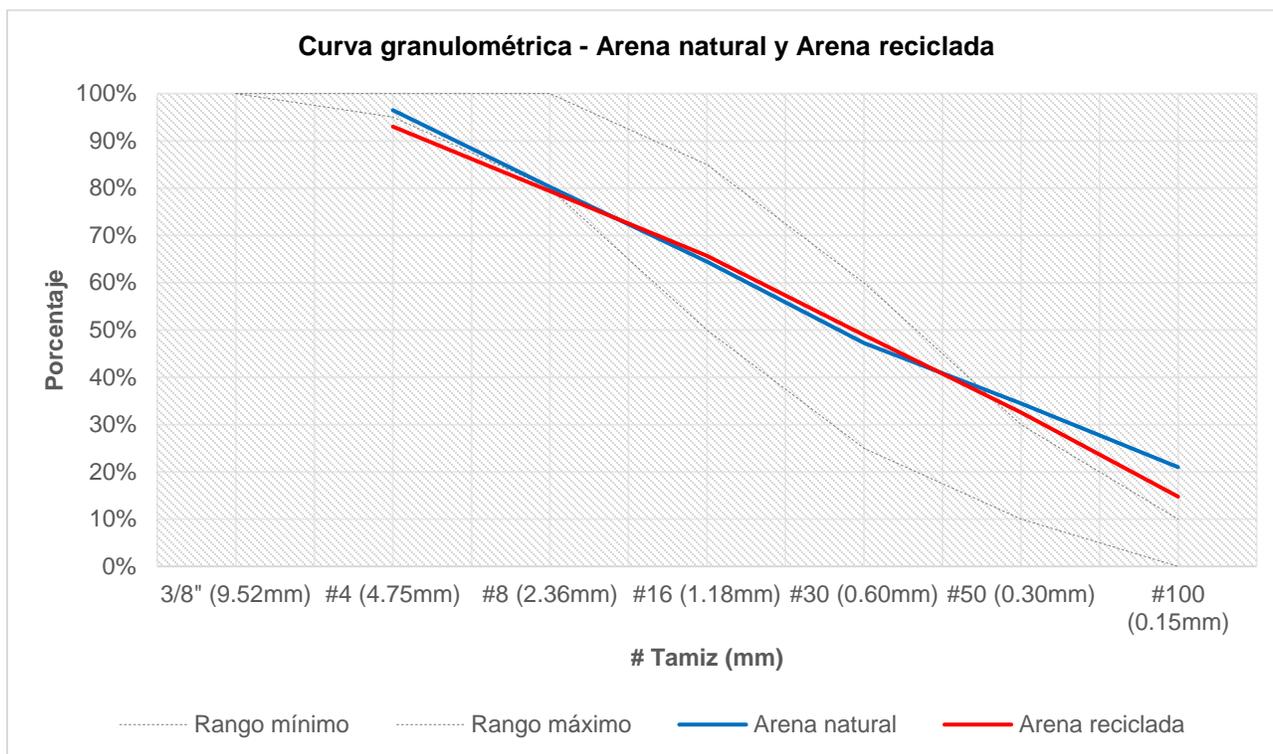
Elaboración de pruebas de pruebas de tamizado para determinar la granulometría de las arenas



Notas: Instalaciones y equipo del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura UNAM.

Figura 32

Comparación curva granulométrica de la arena natural y de la arena reciclada



Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014

- **Arena natural**

Tabla 24

Datos prueba de tamizado arena natural

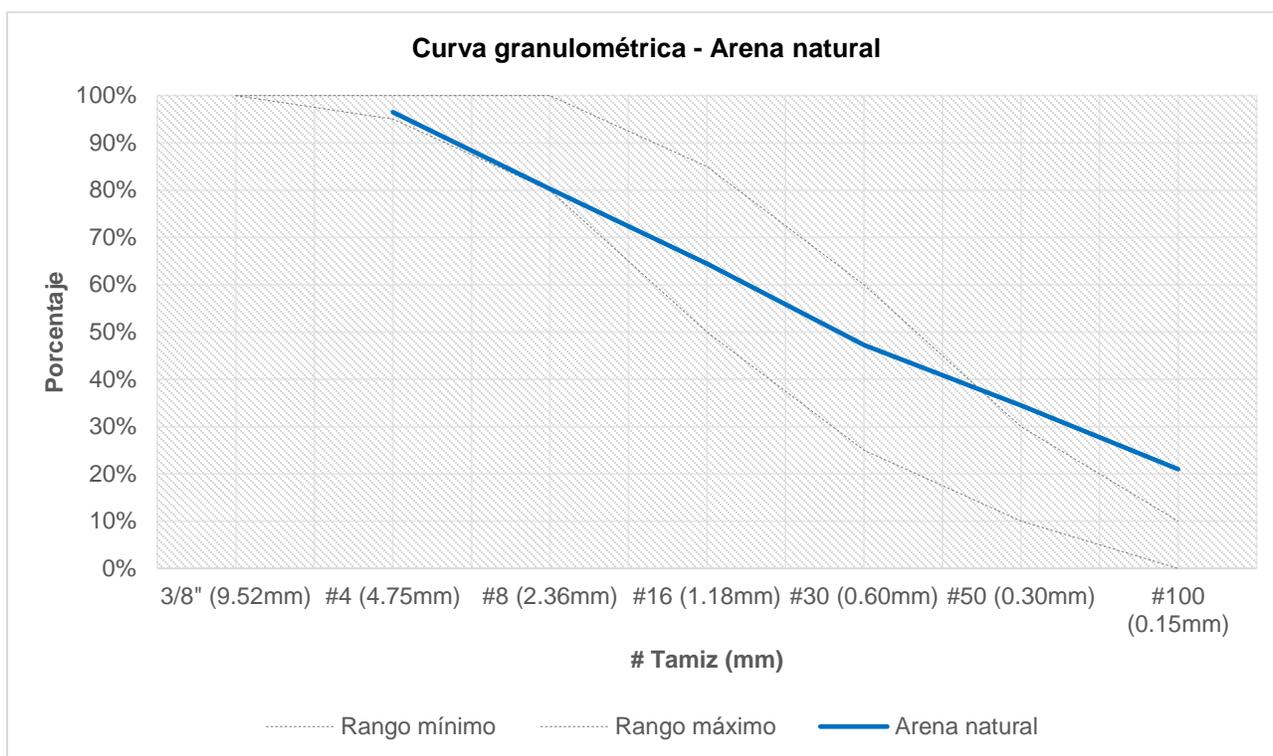
# malla (mm)	Peso retenido (gramos)	% Retenido	% Acumulado
#4 (4.75mm)	17.5	3.51	96.49
#8 (2.36mm)	81.0	16.24	80.25
#16 (1.18mm)	78.7	15.78	64.47
#30 (0.60mm)	85.8	17.20	47.27
#50 (0.30mm)	64.0	12.83	34.44
#100 (0.15mm)	67.1	13.45	20.99
Fondo	104.7	20.99	0.00
Total	498.8	100.00	3.439

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014

La curva granulométrica de la arena natural (Figura 33) cumple con la cantidad de partículas retenidas en los tamices #4, #8, #16 y #30, se observa que excede de los límites máximos de los tamices #50 y #100. Es decir que cuenta con un mayor porcentaje de finos, pero una adecuada cantidad de gruesos y medios. Su módulo de finura es de 3.43 (fuera de los parámetros MF 2.3 – 3.1) Tabla 24.

Figura 33

Curva granulométrica de la arena natural



Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014

- **Arena reciclada**

Tabla 25

Datos prueba de tamizado arena de concreto reciclado

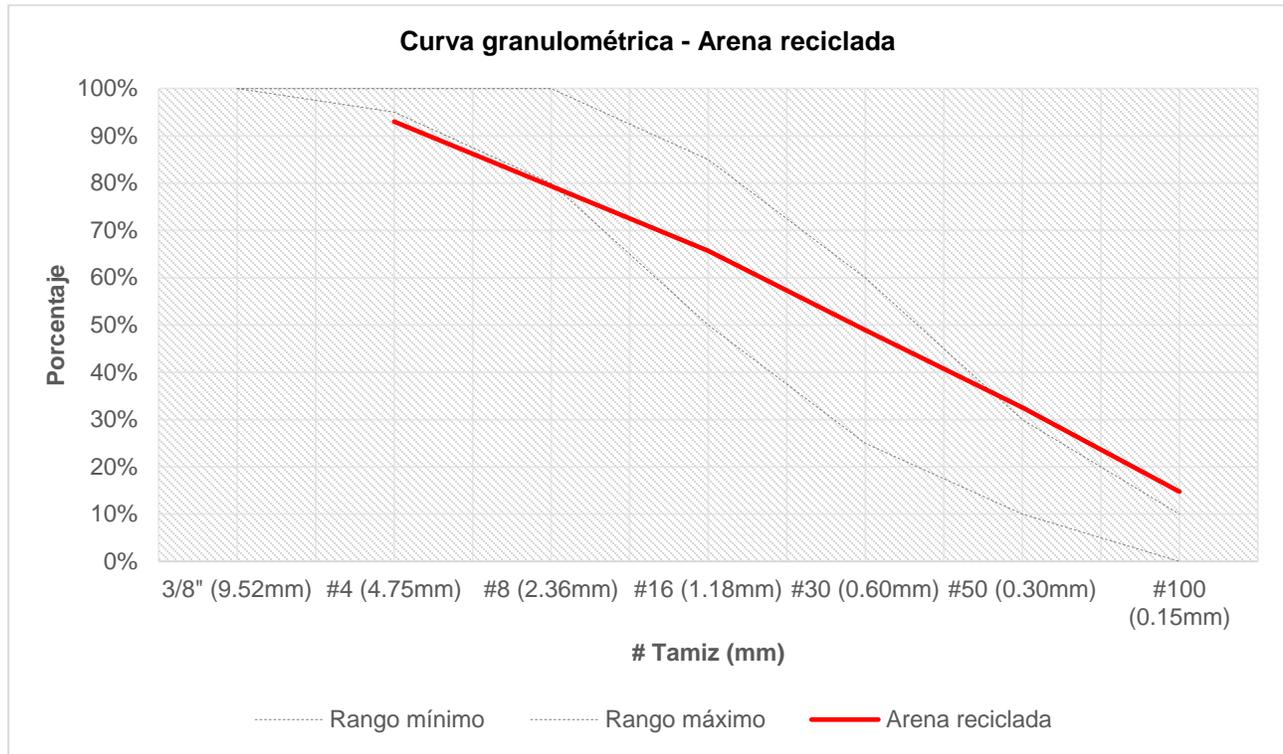
# malla (mm)	Peso retenido (gramos)	% Retenido	% Acumulado
#4 (4.75mm)	34.7	6.97	93.03
#8 (2.36mm)	68.0	13.65	79.38
#16 (1.18mm)	68.2	13.69	65.68
#30 (0.60mm)	83.3	16.73	48.96
#50 (0.30mm)	81.6	16.39	32.57
#100 (0.15mm)	88.7	17.81	14.76
Fondo	73.5	14.76	0.00
Total	498.0	100.00	3.344

Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014

La curva granulométrica de la arena de concreto reciclado (Figura 34) cumple con la cantidad de partículas retenidas en los tamices #8, #16 y #30, se observa que excede de los límites máximos de los tamices #50 y #100 y por debajo del rango mínimo en el tamiz #4. Es decir que cuenta con un mayor porcentaje de finos y no cuenta con la cantidad mínima de gruesos, pero una tiene una adecuada cantidad de medios. Su módulo de finura es de 3.34 (fuera de los parámetros MF 2.3 – 3.1) Tabla 25.

Figura 34

Curva granulométrica de la arena de concreto reciclado



Nota: Elaboración propia con datos de la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014

4.5. Propiedades obtenidas en diferentes porcentajes de sustitución de arena

Muestreo

Para el muestreo (Lote 1) se elaboró una mezcla de control y mezclas con diferentes porcentajes de agregados finos reciclados (50, 60, 70, 80, 90 y 100%) y un tiempo de fraguado de 28 días para llevar a cabo las pruebas de resistencia a compresión (Figura 35).

Figura 35

Elaboración de moldes y fabricación de probetas con diferentes diseños de mezcla



Nota: Fotografías propiedad del autor

- **Evaluación en concreto fresco**

A partir de un análisis cualitativo, se hizo una comparativa de las mezclas de concreto en estado fresco, tomando como punto de comparación el comportamiento de la mezcla de control con 100% de agregados naturales y a partir de los datos observados registrar los efectos en el comportamiento de las mezclas con un porcentaje de agregados reciclados ¿Qué evaluamos en la fabricación de probetas? (Tabla 26).

- Absorción de agua de los agregados
- Nivel de trabajabilidad
- La cohesión, (los materiales se mantienen unidos)
- Moldeado
- Merma

Tabla 26

Evaluación del comportamiento de las mezclas en estado fresco

Pavimento Tipo A	Proporción AN/AR	Absorción de agua	Nivel de trabajabilidad	Cohesión	Moldeado	Merma
Control	100% arena natural	Bajo	Bueno	Bueno	Bueno	Sin merma
50%	50% / 50%	Bajo	Bueno	Bueno	Bueno	Bajo %
60%	60% / 40%	Medio	Medio	Bueno	Bueno	Bajo %
70%	70% / 30%	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo %
80%	80% / 20%	Alto	Malo	Malo	Malo	Medio %
90%	90% / 10%	Alto	Malo	Malo	Malo	Medio %
100%	100% arena reciclada	Muy alto	Muy malo	Muy malo	Muy malo	Alto %

Nota: Elaboración propia

- **Evaluación en concreto endurecido**

A partir de un análisis cuantitativo y cualitativo, se hizo una comparativa de las mezclas de concreto en estado endurecido, tomando como punto de comparación las propiedades obtenidas de la mezcla de control y a partir de los datos observados registrar los resultados de las mezclas con un porcentaje de agregados reciclados ¿Qué evaluamos en el concreto endurecido? (Tabla 27).

- Resistencia a la compresión promedio (5 probetas por mezcla con 28 de fraguado)
- Densidad promedio (5 probetas por mezcla con 28 de fraguado)
- Porosidad
- Segregación del material
- Apariencia del acabado

Tabla 27

Evaluación del concreto endurecido

Pavimento Tipo A	Proporción AN/AR	f _c Promedio MPa/cm ²	Densidad kg/m ³	Porosidad	Segregación	Acabado
Control	100% arena natural	13.89	1781.60	Baja	Bajo	Bueno
50%	50% / 50%	11.80	1666.18	Baja	Bajo	Bueno
60%	60% / 40%	11.89	1660.24	Baja	Bajo	Bueno
70%	70% / 30%	12.80	1675.97	Media	Bajo	Bueno
80%	80% / 20%	12.11	1676.59	Media	Medio	Malo
90%	90% / 10%	11.81	1648.22	Alta	Medio	Malo
100%	100% arena reciclada	11.53	1640.79	Alta	Alto	Muy malo

Nota: Elaboración propia

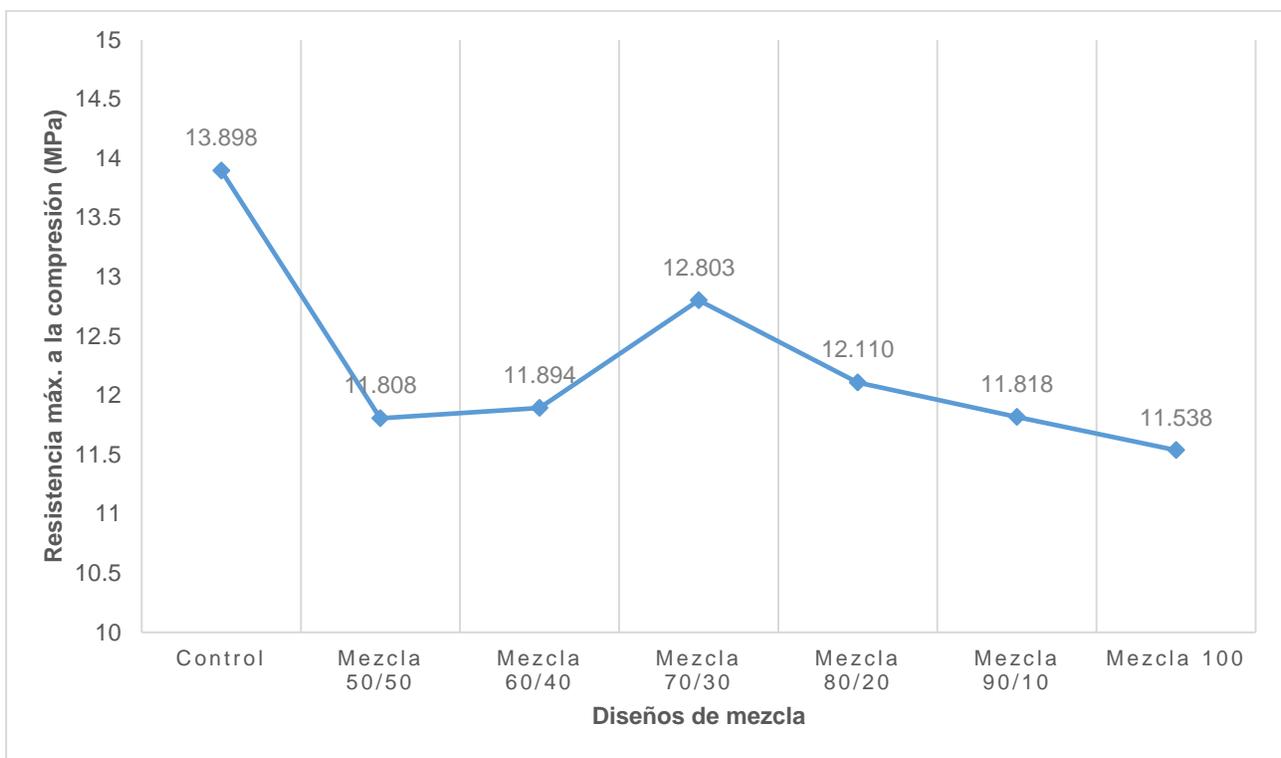
- La primera observación, es que no se obtuvo la resistencia planeada por el diseño de mezcla (Figura 36).

- En los resultados del muestreo observamos un incremento en el esfuerzo resistente a la compresión al incrementar el % de agregados reciclados hasta el 70%, a partir del 80% de sustitución de agregados reciclados se requiere ajustes en el diseño de la mezcla por absorción.
- Observamos el impacto de los RCD por sus propiedades de porosidad y absorción de agua, en la en una sustitución al 100% de agregados reciclados existe desprendimiento del material.

En el Lote 2 se hizo un ajuste de humedad, ya que en los resultados del muestreo observamos aumento en el esfuerzo resistente a la compresión al incrementar el porcentaje de agregados reciclados hasta el 70%, a partir del 80% de sustitución de agregados reciclados se requiere ajustes en el diseño de la mezcla por absorción de agua, para mantener la proporción agua/cemento y no repercuta en el esfuerzo a compresión.

Figura 36

Resultados de resistencia a la compresión en diferentes diseños de mezcla



Nota: Elaboración propia

Segunda etapa de evaluación

En este nivel de la investigación, las pruebas del diseño experimental que se han llevado a cabo corresponden a los ensayos de resistencia a la compresión y se hicieron las observaciones en el proceso de mezclado en el concreto fresco. Para la segunda etapa de evaluación se ha fabricado un Lote 2, con las mezclas que tuvieron resultados relevantes en la etapa de muestreo (Figura 37).

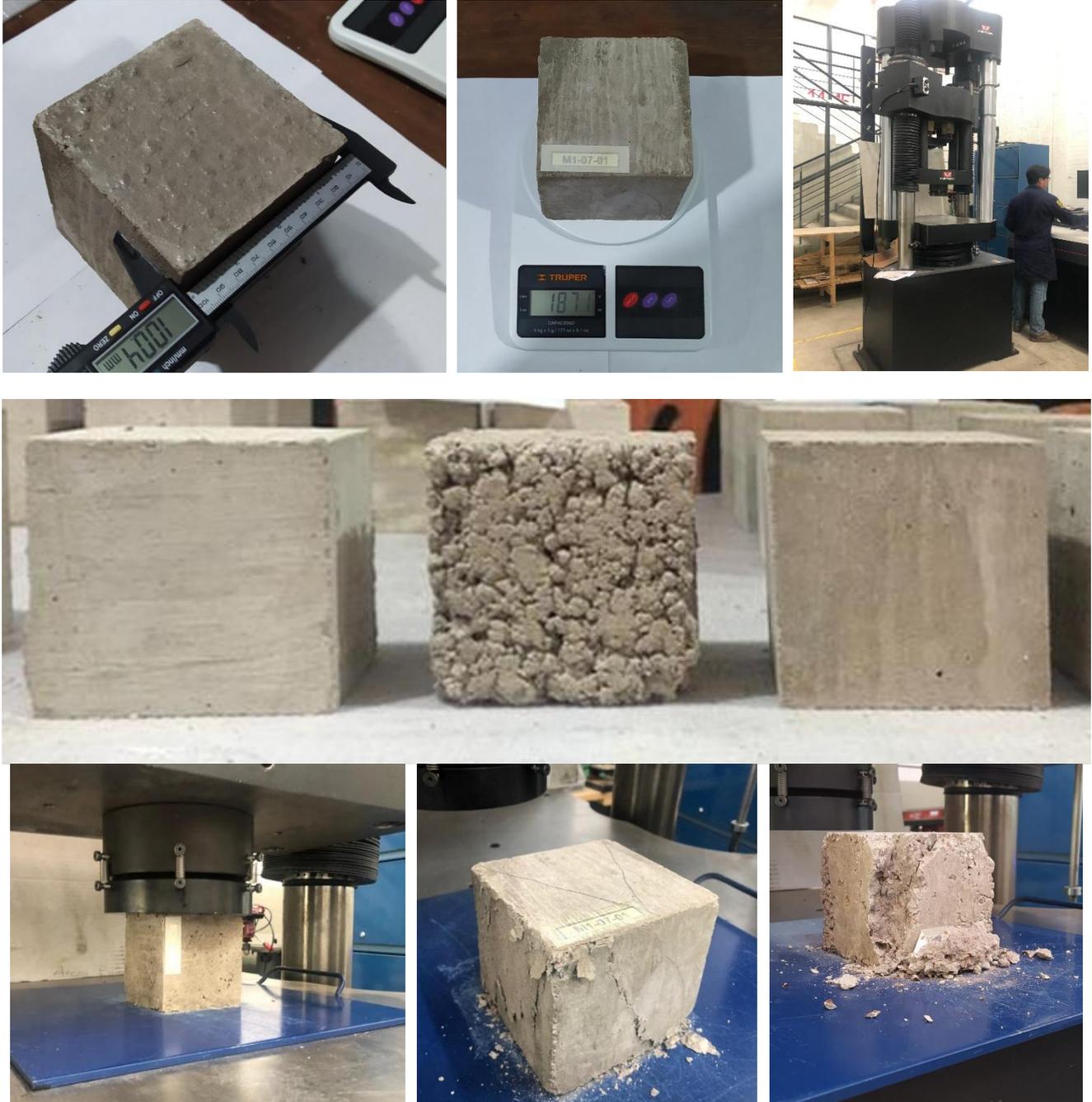
Para esta etapa se llevó el control de tres mezclas en tiempos de fraguado de 7, 14 y 28 días:

- Una mezcla con 100% de agregados finos reciclados.
- Una mezcla 70/30 determinada por el estado del arte y el muestreo de esta investigación,
- Una mezcla de control con agregados finos naturales (control).

Para los ensayos a la compresión, se tomó como referencia la Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013.

Figura 37

Fabricación y pruebas de resistencia a la compresión de probetas con control de fraguado a 7,14 y 28 días de maduración.



Nota: Fotografías propiedad del autor

Al momento se llevan elaborados dos lotes con diferentes mezclas y proporcionamientos (L1 y L2). En el Lote 2 se lleva el control de la evolución del material por días de maduración (Tabla 28 y Figura 38).

- **Evolución esfuerzo máx. a la compresión promedio muestral 7 ,14 y 28 días**

Tabla 28

Evolución esfuerzo máx. a la compresión promedio muestral

Pavimento Tipo A	Días de fraguado		
	7	14	28
Control	7.31 MPa	11.75 MPa	14.32 MPa
70%	7.89 MPa	13.71 MPa	14.70 MPa
100%	9.59 MPa	12.33 MPa	14.35 MPa

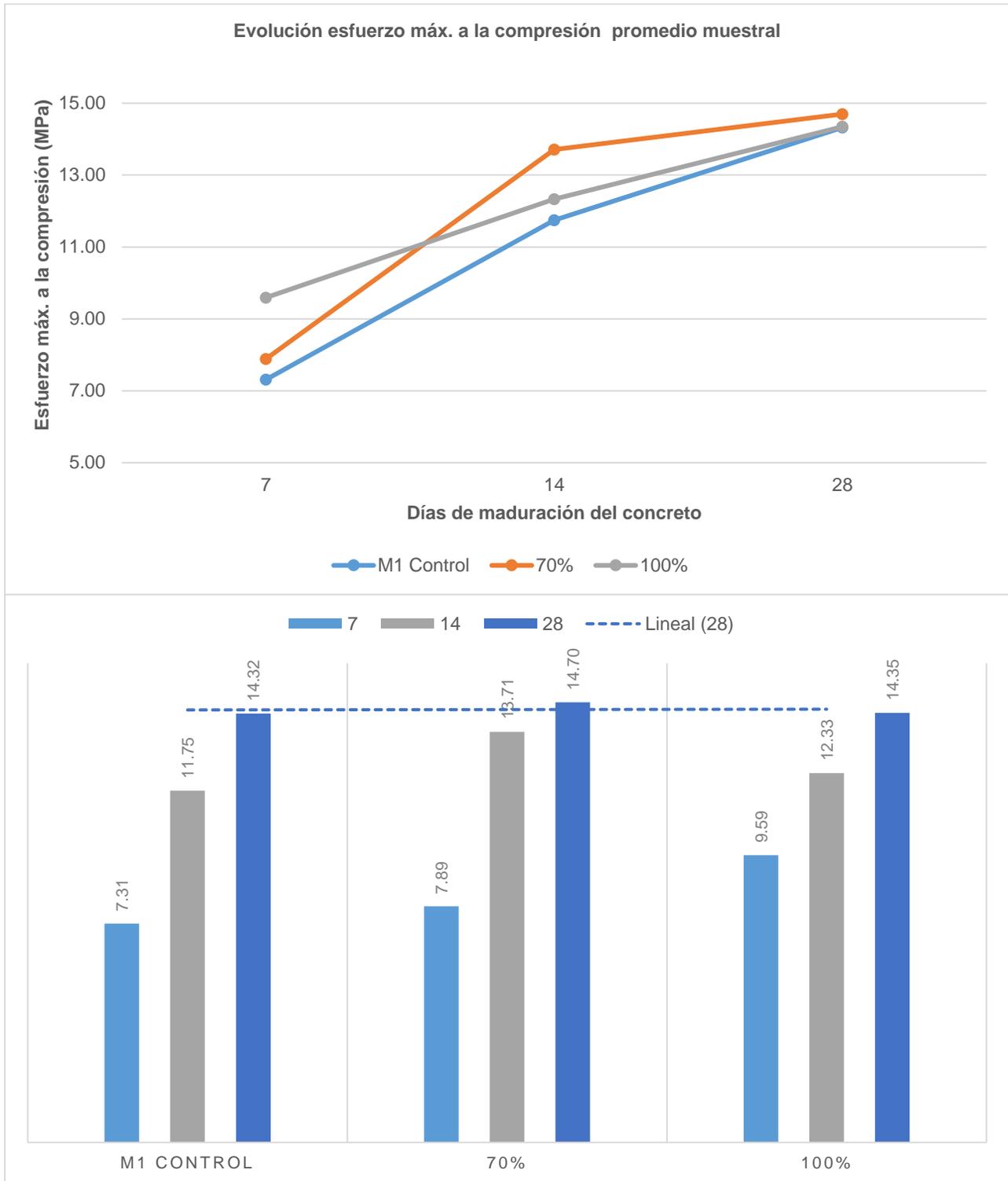
Nota: Elaboración propia

Observaciones

- Para mejorar la mezcla de concreto con 100% de agregados finos reciclados se hizo un balance por absorción de agua, y que los agregados no tomen del parte del agua necesario para la hidratación del cemento, además de mantener la proporción agua/cemento.
- La mezcla de control a los 7, 14 y 28 fue la que resultó con menor resistencia a la compresión, por el contrario, la mezcla con 100% de agregados finos de concreto reciclado tuvo mejores resultados a los 7 días y la mezcla con 70% de agregados reciclados a los 14 y 28 días presento fue la que obtuvo mayo resistencia a la compresión. Podríamos indagar diferentes causas, por ejemplo, a una mayor cantidad de cemento hidratado y no hidratado contenido en el RCD.
- En la mezcla con 100% de arena reciclada obtuvimos una mejor cohesión de los ingredientes en el proceso de mezclado, además de una mejor resistencia, pero aún no lo requerido por la normatividad.
- Son necesarios ajustes de la mezcla por los afectos que tiene la granulometría de la arena reciclada y el exceso de finos, como analizamos con anterioridad, la mala distribución de las partículas de la arena puede afectar las propiedades mecánicas del material.

Figura 38

Resultados de resistencia a la compresión (MPa) de probetas con control de fraguado a 7,14 y 28 días de maduración.



4.6. Análisis de los resultados

- El Impacto en las mezclas de iguales proporciones y en exactas condiciones de elaboración, oscilan en rangos generales de 1 a 2 MPa de resistencia a la compresión.
- Control. Mezcla con agregados naturales al 100%. En la mezcla de control obtuvimos una resistencia máx. a la compresión de 7.31 MPa a los 7 días de maduración, una resistencia máx. a la compresión de 11.75 MPa a los 14 días y una resistencia de 14.32 MPa completados los 28 días de maduración. La madurez en la resistencia de la tercera medición respecto a la primera es del 100%. Estas mediciones obtenidas serán el punto de comparación para nuestras siguientes mezclas.
- L1 - Mezcla con sustitución al 100% de los agregados finos naturales por reciclados. En una comparativa con nuestra mezcla de control, obtuvimos una reducción significativa en la resistencia muestral de 2.36 MPa a los 28 días. Pero con observaciones en la técnica de elaboración (estado húmedo), no obtuvimos trabajabilidad lo que impacto en la apariencia y el acabado. Y en las probetas (estado seco) tuvimos desprendimientos del material. Por lo cual se procedió a hacer un ajuste por absorción de humedad.
- L2 - Mezcla con sustitución al 100% de los agregados finos naturales por reciclados (ajuste de agua por absorción de humedad). En una comparativa con nuestra mezcla de control, obtuvimos un incremento en la resistencia muestral de 2.28 MPa a los 7 días y un promedio muestral de 14.35 MPa a los 28 días, tenemos una ganancia en la resistencia en comparación con el L1. La madurez en la resistencia de la segunda medición respecto a la primera es del 25%. Pero con observaciones en la técnica de elaboración (estado húmedo), obtuvimos buena trabajabilidad lo que impacto en la apariencia y en el buen acabado.
- Mezcla determinada por el estado del arte y el muestreo de diferentes porcentajes. En un porcentaje de sustitución de 70% agregados finos reciclados y 30% de agregados naturales observamos que no se necesita ajuste de agua por absorción de humedad. Los datos obtenidos a los 7 días en comparación con nuestra mezcla de control son similares al promedio muestral, con una diferencia de 0.5 MPa, el siguiente dato significativo fue la madurez de la mezcla al obtener un aumento del 75% en la resistencia del material.
- La mezcla con sustitución al 100% de los agregados finos y gruesos naturales por reciclados. La primera observación a partir del muestreo es que para elaborar esta mezcla se necesita un ajuste de agua por absorción de humedad de los agregados finos. A partir de la experiencia del muestreo se obtuvo buena trabajabilidad, buena apariencia y buen acabado. Si comparamos los promedios muestrales obtenidos de esta mezcla con nuestra muestra de control, tenemos una diferencia de 0.58MPa superior a la de control, en la maduración tenemos una ganancia del 25% en su resistencia a la compresión a los 14 días.
- Muestreo de mezclas con una variación del 50% al 100% de sustitución por agregados reciclados. Se hizo un muestreo con diferentes porcentajes de agregados finos reciclados y conocer el impacto dentro de la mezcla, se controlaron las proporciones de cada material y se observó que a partir del 80% de sustitución de agregados finos naturales por reciclados es necesario el ajuste de agua por absorción de humedad de los reciclados por sus condiciones de porosidad. De no ser así, a partir de este porcentaje no tenemos trabajabilidad en el proceso de mezclado.



CAPÍTULO 5

5. Prototipo de pavimento reciclado

Con la experiencia recabada, se hizo un diseño de mezcla optimizado para cubrir las características mínimas establecidas por la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014. El objetivo es generar un diseño de mezcla con agregados finos reciclados de concreto para la elaboración de un prototipo de adoquín para su uso en pavimentos, con resistencia mecánica a la compresión adecuada, según la norma (NMX-C-314-ONNCCE-2014) de uso peatonal (Figura 39).

Los umbrales del producto esperado para las propiedades del pavimento Tipo A de uso peatonal de acuerdo a la normatividad aplicable son:

- 60 mm espesor mínimo nominal.
- 250 kg/cm² de esfuerzo resistente máximo a la compresión.
- 11% de absorción de agua máxima individual.
- La reducción del espesor no debe ser mayor a 3 mm en la prueba de resistencia a la abrasión.

Figura 39

Prototipo de pavimento con agregados finos reciclados.



Nota: Fotografías propiedad del autor

5.1. Optimización del diseño de mezcla para uso en pavimentos

El procedimiento para lograr el diseño de mezcla es mediante el método de dosificación ACI (American Concrete Institute).

Se hizo el ajuste del agua debido a la absorción y humedad de los agregados reciclados. Se consideró la humedad de los agregados para realizar una dosificación real durante la elaboración de la mezcla ya que el agua de absorción no forma parte del agua de mezclado, por lo tanto, debe quedar excluida en el ajuste del agua adicional.

Procedimiento: Proporcionamiento por el método ACI (American Concrete Institute),

Materiales: Cemento, grava, arena reciclada de concreto y agua (Tabla 29).

Tabla 29

Datos del material

Datos	
Peso específico del cemento	3.15 g/cm ³
Módulo de finura de la arena	3.34
Peso específico de la arena	2,180 kg/m ³
Tamaño máximo de la grava	9.5 mm
Peso específico de la grava	2,620 kg/m ³
Peso volumétrico de la grava	1,610 kg/m ³
Peso específico del agua	1,000 kg/m ³
% de absorción de la arena	13.06 %
% de humedad de la arena	2.0%
% de absorción de la grava	1.1%
% de humedad de la grava	0.30%
Revenimiento	5 cm

1. Contenido de aire en la mezcla

Contenido de aire respecto al tamaño máximo nominal del agregado grueso 9.5 mm (3/8") (Tabla 30).

3% de aire en la mezcla

Nota: Tabla retomada del American Concrete Institute (LMSE -UNAM, 2022a).

Tabla 30

Contenido de aire de la mezcla

Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso	% de Aire en la mezcla
3/8"	3.0
1/2"	2.5
3/4"	2.0
1"	1.5
1 1/2"	1.0
2"	0.5
3"	0.3
4"	0.2

2. Contenido de agua

Contenido de agua respecto al revenimiento y tamaño máximo nominal del agregado grueso 9.5 mm (3/8") (Tabla 31).

207 L/m³ de agua

Tabla 31
Volumen Unitario de Agua

Requisitos aproximados de agua de mezclado para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.								
Revenimiento	9.5 (3/8")	12.5 (1/2")	19 (3/4")	25.4 (1")	38.1 (1.5")	50.8 (2")	76.2 (3")	15.24 (6")
Concreto sin aire incorporado								
25.4 (1") a 50.8 (2")	207	199	190	179	166	154	130	113
76.2 (3") a 10.16 (4")	228	216	205	193	181	169	145	124
15.24 (6") a 17.78 (7")	243	228	216	202	190	178	160
Concreto con aire incorporado								
25.4 (1") a 50.8 (2")	181	286	168	160	150	142	122	107
76.2 (3") a 10.16 (4")	202	193	184	175	165	157	133	119
15.24 (6") a 17.78 (7")	216	205	197	184	174	166	154

Nota: Tabla retomada del American Concrete Institute (LMSE -UNAM, 2022a).

3. Relación Agua/Cemento por resistencia

Relación Agua/Cemento de acuerdo a proyecto y a la resistencia a la compresión a los 28 días (Tabla 32).

Para f_c 350 kg/cm²,

La relación Agua/Cemento es 0.48

Tabla 32
Relación Agua/Cemento por resistencia

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm ²)	Relación Agua/Cemento en peso	
	Mezclas SIN aire incluido	Mezclas CON aire incluido
450	0.38	
420	0.41
400	0.43	
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
280	0.57	0.48
250	0.62	0.53
210	0.68	0.59
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71
140	0.82	0.74

Nota: Tabla retomada del American Concrete Institute (LMSE -UNAM, 2022a).

4. Contenido de cemento

Contenido de cemento obtenido respecto a la proporción Agua/Cemento.

Datos:

- Contenido de agua 207 L/m³ de agua
- Relación Agua/Cemento 0.48

$$A/C = 0.48 \text{ despejamos cemento}$$

$$C = A/0.48 = 207/0.48$$

$$\text{Cemento} = 431.25 \text{ kg/m}^3$$

5. Peso de la grava

Agregado grueso por unidad de volumen del concreto respecto tamaño máximo nominal del agregado y el módulo de finura de la arena.

Datos:

- Módulo de finura de la arena 3.34
- Tamaño máximo de la grava 9.5 mm (3/8")
- Peso volumétrico de la grava 1,610 kg/m³

$$\text{Peso de la grava} = \text{Valor obtenido Tabla 33} \times \text{Peso volumétrico de la grava}$$

$$\text{Peso de la grava} = 0.406 \text{ m}^3 \times 1,610 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso de la grava} = 653.66 \text{ kg}$$

Tabla 33

Agregado grueso por unidad de volumen del concreto

Tamaño Máximo Nominal del Agregado	Volumen del agregado grueso, seco y compactado por volumen de concreto para diferentes módulos de finura de la arena.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1 (1.5")	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
76.2 (3")	0.82	0.80	0.78	0.76
15.24 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Para un tamaño máx. nominal del agregado grueso de 9.5 mm (3/8") y un módulo de finura de la arena de 3.34 (Tabla 33)

(modulo calculado proporcional)

Valor 0.406

Nota: Tabla retomada del American Concrete Institute (LMSE -UNAM, 2022a).

6. Volumen absoluto de los materiales

Para obtener el volumen requerido de arena se debe obtener el volumen ocupado por el resto de los materiales ya cuantificados al momento (Tabla 34).

Datos:

- Resistencia de proyecto $f'c$ 350 kg/cm²
- Contenido de aire 3%
- Contenido de agua 207 L/m³
- Relación Agua/Cemento 0.48
- Contenido de cemento 431.25 kg
- Peso de la grava 653.66 kg
- Volumen de la arena ¿?

Tabla 34
Volumen absoluto de materiales

Volumen absoluto del cemento	Volumen absoluto del agua
$\text{Cemento} = \frac{\text{Cantidad de cemento} \times m^3}{P.E.Cemento \times 1000}$	$1 \text{ litro} = 1 \text{ kilo}$
$\text{Cemento} = \frac{431.25 \text{ kg}}{3.15 \text{ g/cm}^3 \times 1000}$	$\text{Agua} = \frac{\text{Cantidad de agua} \times m^3}{P.E.Agua}$
$\text{Cemento} = \frac{431.25 \text{ kg}}{3150 \text{ kg/m}^3}$	$\text{Agua} = \frac{207 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3}$
<p>Cemento = 0.137 m³</p>	<p>Agua = 0.207 m³</p>
Volumen absoluto de la grava	Contenido de arena
$\text{Grava} = \frac{\text{Cantidad de grava} \times m^3}{P.E.Grava}$	$\text{Arena} = \frac{\text{Cantidad de arena} \times m^3}{P.E.Arena}$
$\text{Grava} = \frac{653.66 \text{ kg}}{2620 \text{ kg/m}^3}$	$0.377 = \frac{x \text{ kg}}{2182 \text{ kg/m}^3}$
<p>Grava = 0.249 m³</p>	<p>Arena = 0.377 x 2182 kg/m³</p> <p>Arena = 822.61 kg</p>

Diseño de Mezcla / Volumen Absoluto

Resistencia de proyecto $f'c$ 350 kg/cm²

Volumen

- | | |
|-----------|----------------------------|
| • Cemento | 0.137 m ³ |
| • Agua | 0.207 m ³ |
| • Aire | 0.030 m ³ |
| • Grava | 0.249 m ³ |
| | 0.623 m³ |

Volumen de la arena es igual a 1 menos la suma del volumen de los materiales:

$$\text{Arena} = 1 - 0.623$$

$$\text{Arena} = 0.377$$

7. Proporcionamiento / Resumen Diseño de Mezcla

Cantidades teóricas en condiciones de saturado (Tabla 35).

Tabla 35

Diseño de mezcla de concreto con una resistencia $f'c$ 350 kg/cm².
Cantidades teóricas para un volumen de un metro cubico (1m³).

Material	Volumen	Cantidad
Cemento	0.137 m ³	431.25 kg
Agua	0.207 m ³	207 L
Aire	0.030 m ³	3%
Grava	0.249 m ³	653.66 kg
Arena reciclada	0.377 m ³	822.61 kg
Total	1.000 m³	2114.52 kg

8. Proporcionamiento ajustado / Resumen Diseño de Mezcla

Ajuste del agua debido a la absorción y humedad de los agregados

Se debe considerar la humedad de los agregados para realizar una dosificación real durante la elaboración de la mezcla. El agua de absorción No forma parte del agua de mezclado, por lo tanto, debe quedar excluida en el ajuste del agua adicional

Grava 1.1 % (absorción) - 0.30% (humedad) = + 0.8% x 653.66 = 5.22 L

Arena 13.06 % (absorción) - 1% (humedad) = + 12.06 % x 822.61 = 99.20 L

Grava = 653.66 - 5.22 = 648.44

Arena = 822.61 - 99.20 = 723.41

Por lo tanto, el requerimiento de agua de mezclado, será:

Agua corregida = 207 + 5.22 + 99.42 = **307.64 litros/m³**

Cantidades con corrección de agua por absorción (Tabla 36).

Tabla 36

Diseño de mezcla de concreto con una resistencia $f'c$ 350 kg/cm².
Cantidades teóricas para un volumen de un metro cubico (1m³).

Material	Cantidad
Cemento	431.25 kg
Agua	307.64 L
Aire	3%
Grava	648.44 kg
Arena reciclada	723.41 kg
Total	2110.74 kg

5.2. Descripción del producto de aportación

Los umbrales del producto esperado se determinarán de acuerdo a los establecidos por Norma.

Propiedades para pavimento Tipo A de uso peatonal:

- 60 mm Espesor mínimo nominal,
- 250 kg/cm² Esfuerzo resistente máximo a la compresión,
- 11% Absorción de agua máxima individual,
- La reducción del espesor no debe ser mayor que 3mm en la prueba de resistencia a la abrasión.

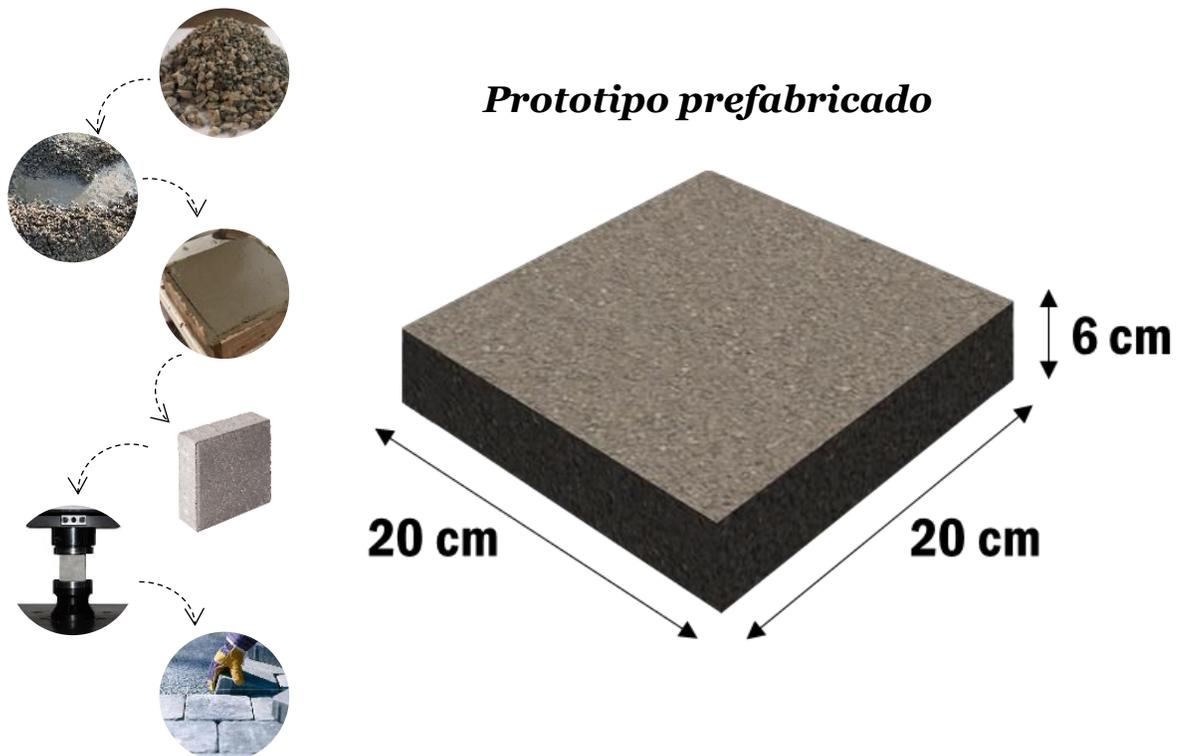
Usos y aplicaciones

Dependiendo de sus formas y espesores el adoquín de concreto ofrece un amplio espectro para sus posibles aplicaciones (Figura 40, 41 y 42):

- Banquetas
- Calles y avenidas
- Patios
- Camellones
- Estacionamientos
- Explanadas y plazas
- Jardines

Figura 40

Prototipo conceptual de adoquín, diseño y proceso para su obtención



Nota: Elaboración propia

Figura 41

Imagen prototipo de adoquín de concreto reciclado

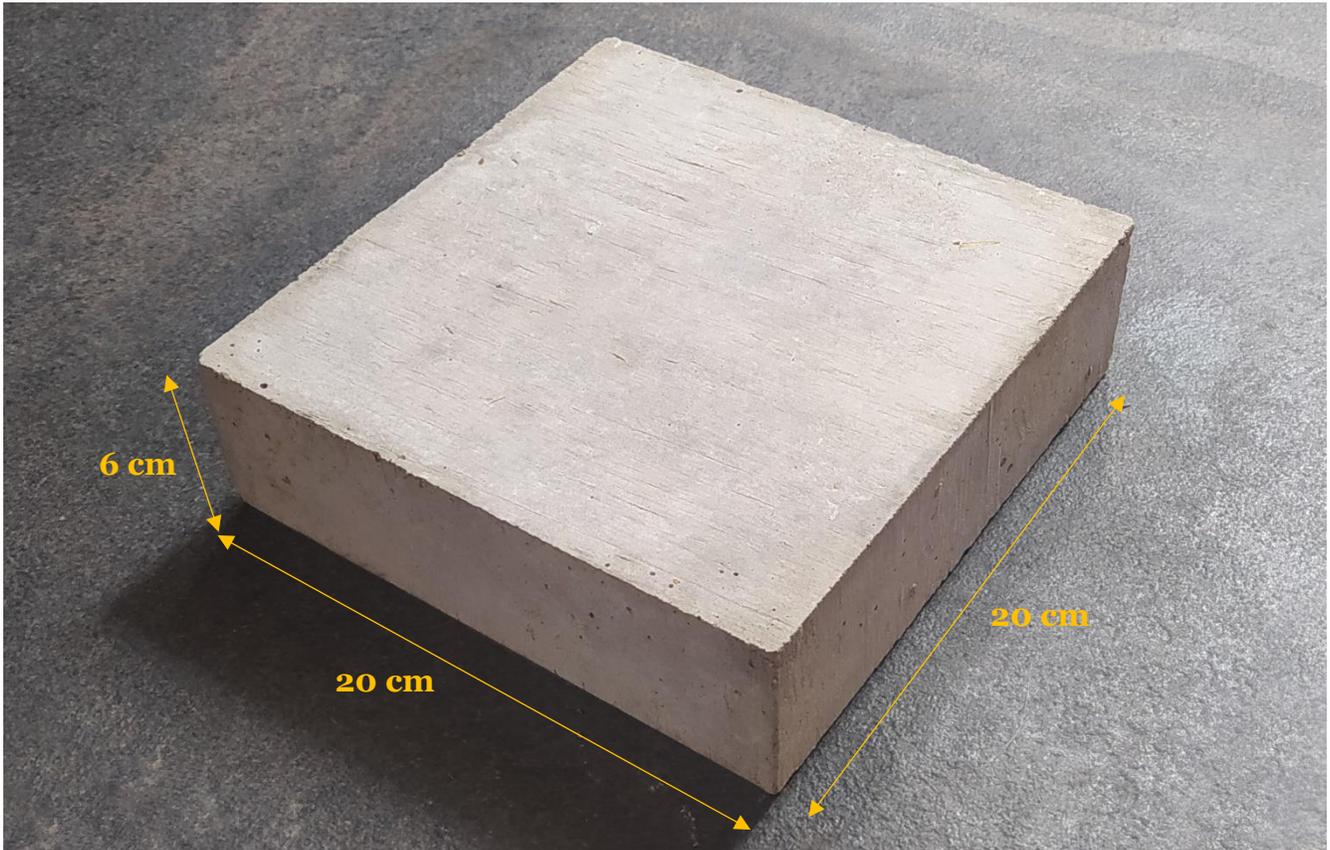


Figura 42

Imagen para el uso de adoquín de concreto reciclado



URBANO



ZONAS RURALES



PARQUES Y PLAZAS

Los pavimentos son un elemento básico en la industria de la construcción, el cambio consiste en la introducción pavimentos reciclados como nueva alternativa. El uso de estos pavimentos puede ir desde casa habitación, vía pública, plazas, jardines y vialidades donde la permeabilidad y recarga acuífera es importante. En caminos rurales, ya que es necesario el uso de pavimentos de bajo impacto ambiental.

Beneficios:

- Fácil colocación
- Fácil transporte
- Fácil mantenimiento

Ventajas ambientales:

- Permite la recarga acuífera
- Prevención de inundaciones
- Se puede reciclar nuevamente

Nota: Imágenes propiedad del autor

Costos directos

Se muestra una tabla comparativa de costos en los materiales empleados en un adoquín tradicional y el prototipo de adoquín con agregados reciclados (Tabla 37).

Precios materiales al mes de agosto 2022:

- Arena: Bulto de 40kg a \$60 MXN
- Arena reciclada: 40kg a \$4 MXN por 1m³ a \$80 MXN (*Concretos Sustentables Mexicanos S.A. de C.V.*, 2022)
- Gravilla (granzón): 50kg \$60 MXN
- Cemento: Bulto de 50 kg a \$250 MXN
- Agua: 15,000 litros a \$46.44 MXN (Gobierno de la Ciudad de México, 2022)

Nota: Precios comerciales obtenidos de la web (www.construrama.com, consulta agosto 2022), precios comparativos estimados.

Tabla 307

Tabla comparativa de costo unitario del producto

Material	Adoquín comercial con agregados convencionales		Prototipo adoquín con 100% de agregados finos reciclados	
	Cantidad	Costo	Cantidad	Costo
Cemento	1.03 kg	5.175	1.03 kg	5.175
Agua	0.65 L	0.002	0.73 L	0.002
Gravilla	1.55 kg	2.334	1.55 kg	2.334
Arena natural o reciclada	1.73 kg	2.604	1.73 kg	0.174
	Total	10.115	Total	7.685

Nota: Elaboración propia

En el prototipo obtenido con agregados finos reciclados de concreto se tiene una diferencia de **\$2.43**, inferior a la estimada para un adoquín con agregados convencionales. Este valor en mayor proporción podría representar un ahorro importante en el presupuesto de obra con una estimación del **24.02%**.

Pruebas mecánicas del prototipo

- **Fabricación de probetas**

Para los ensayos a pruebas mecánicas del prototipo se elaboraron moldes de madera con las siguientes dimensiones (Figura 43):

- Probetas 20 x 20 x 6 cm (Tamaño del prototipo)
- Probetas cúbicas 6 x 6 x 6 cm (determinado por el espesor del prototipo)

Figura 43

Elaboración de moldes y fabricación de probetas para los ensayos a pruebas mecánicas del prototipo



Nota: Fotografías propiedad del autor

- **Resistencia esfuerzo a la compresión**

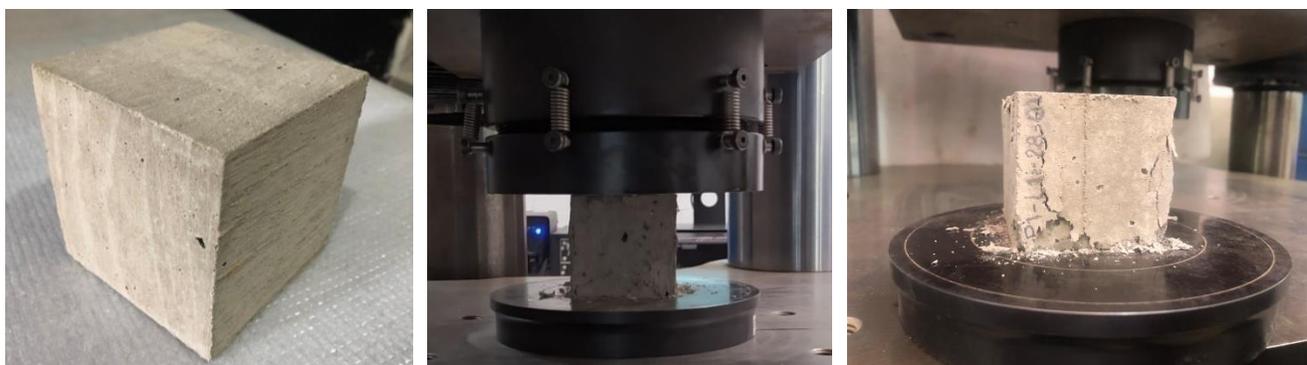
Para los ensayos a la compresión, se tomó como referencia la Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCCCE-2013. Los ensayos a compresión fueron elaborados en las instalaciones del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE).

- Probetas cúbicas 6 x 6 x 6 cm (determinado por el espesor del prototipo),
- Se hizo el ensayo de 5 probetas a los 28 días de fraguado.

Se elaboró una mezcla con 100% de agregados finos reciclados y corrección por absorción de agua de la arena de 12% y se previno la pérdida de resistencia a causa de la granulometría de la arena reciclada y el exceso de partículas finas (Figura 43).

Figura 44

Probetas para ensayos a compresión del prototipo



Nota: Fotografías propiedad del autor

- **Evaluación en concreto fresco**

¿Qué evaluamos en la fabricación de probetas? (Tabla 38)

- Absorción de agua de los agregados
- Nivel de trabajabilidad
- La cohesión, (los materiales se mantienen unidos)
- Moldeado
- Merma

Tabla 38

Evaluación del comportamiento de las mezclas en estado fresco

Pavimento	Proporción	Absorción de agua	Nivel de trabajabilidad	Cohesión	Moldeado	Merma
Prototipo	100% arena reciclada	Bajo	Bueno	Bueno	Bueno	Sin merma
Control	100% arena natural	Bajo	Bueno	Bueno	Bueno	Sin merma

Nota: Elaboración propia

- Las características de la mezcla de concreto del prototipo en estado fresco lograron alcanzar las características observadas de la mezcla de control con agregados naturales, lo que sin duda favoreció el proceso de integración de los materiales.

- **Evaluación en concreto endurecido**

¿Qué evaluamos en el concreto endurecido? (Tabla 39)

- Resistencia a la compresión promedio (5 probetas por mezcla con 28 de fraguado)
- Densidad promedio (5 probetas por mezcla con 28 de fraguado)
- Porosidad
- Segregación del material
- Apariencia del acabado

Tabla 319

Evaluación del comportamiento en el concreto endurecido

Pavimentos	Proporción	f _c Promedio MPa/cm ²	Densidad kg/m ³	Porosidad	Segregación	Acabado
Prototipo	100% arena reciclada	25.88	1797.77	Baja	Bajo	Bueno
Control	100% arena natural	13.89	1781.60	Baja	Bajo	Bueno

Nota: Elaboración propia

- La primera observación, es que se obtuvo la resistencia requerida por la norma para pavimentos Tipo A para uso en adoquines.
- Observamos que el ajuste por absorción de humedad de los RCD impacto en la elaboración de forma positiva, logrando un buen trabajo de moldeado, la buena cohesión de los materiales y endurecido el concreto se logró un buen acabado. Y no hubo merma en el proceso.

- **Resistencia esfuerzo a la abrasión**

Para determinar la resistencia a la abrasión, se tomará como referencia la Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014. Los ensayos de resistencia a la abrasión fueron elaborados en las instalaciones del Laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC). (Figura 44).

- Probetas 20 x 20 x 6 cm (Tamaño del prototipo)
- Se hizo el ensayo de 2 probetas.

Datos de ensaye:

- Tiempo de aplicación del chorro de arena por prueba: **1 minuto**
- Peso específico de la plastilina: **1.76**
- Área sometida a 1 disparo: **6.45 cm²**
- Área sometida a los 8 disparos: **51.6 cm²**
- Presión de aire con que se realizan los disparos de arena: **410 kPa ± 1 kPa**
- Flujo de arena: **600 g/min ± 25 g/min**
- Especificación de pérdida de volumen máxima: **15 cm³/50cm²**
- Especificación de reducción de espesor máximo: **3 mm**

Figura 45

Prueba de abrasión en adoquines



Notas: Fotografías 1 y 2.- Muestras 073/01 y 02 sometidos al ensayo de Abrasión. Fotografía 3.- Muestras 073/01 y 02 después del ensayo de Abrasión y de aplicar la plastilina para determinar el coeficiente de pérdida volumétrica por abrasión.

Tabla 320

Datos sobre la prueba de abrasión en laboratorio

Espécimen	Cantidad de plastilina para relleno de huecos (g)			Volumen de la plastilina cm ³	Reducción de espesor (mm)		Coeficiente de pérdida volumétrica por abrasión	
	Inicial	Final	Diferencia (Wa)		Total	Promedio	Total	Promedio
1	91.4	89.9	1.5	0.85	3.28	0.82	0.03	-
2	89.9	88.1	1.8	1.02	3.35	0.84	0.04	0.04

Nota: Datos obtenidos por el Laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).

Se obtuvo la resistencia a la abrasión dentro de lo especificado por la norma para pavimentos Tipo A para uso en adoquines (Tabla 40).

- **Absorción de agua**

Para determinar la absorción de agua, se tomará como referencia la Norma Mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2013. Los ensayos para calcular el porcentaje de absorción de agua se hicieron sin apoyo de instalaciones especializadas (Figura 45).

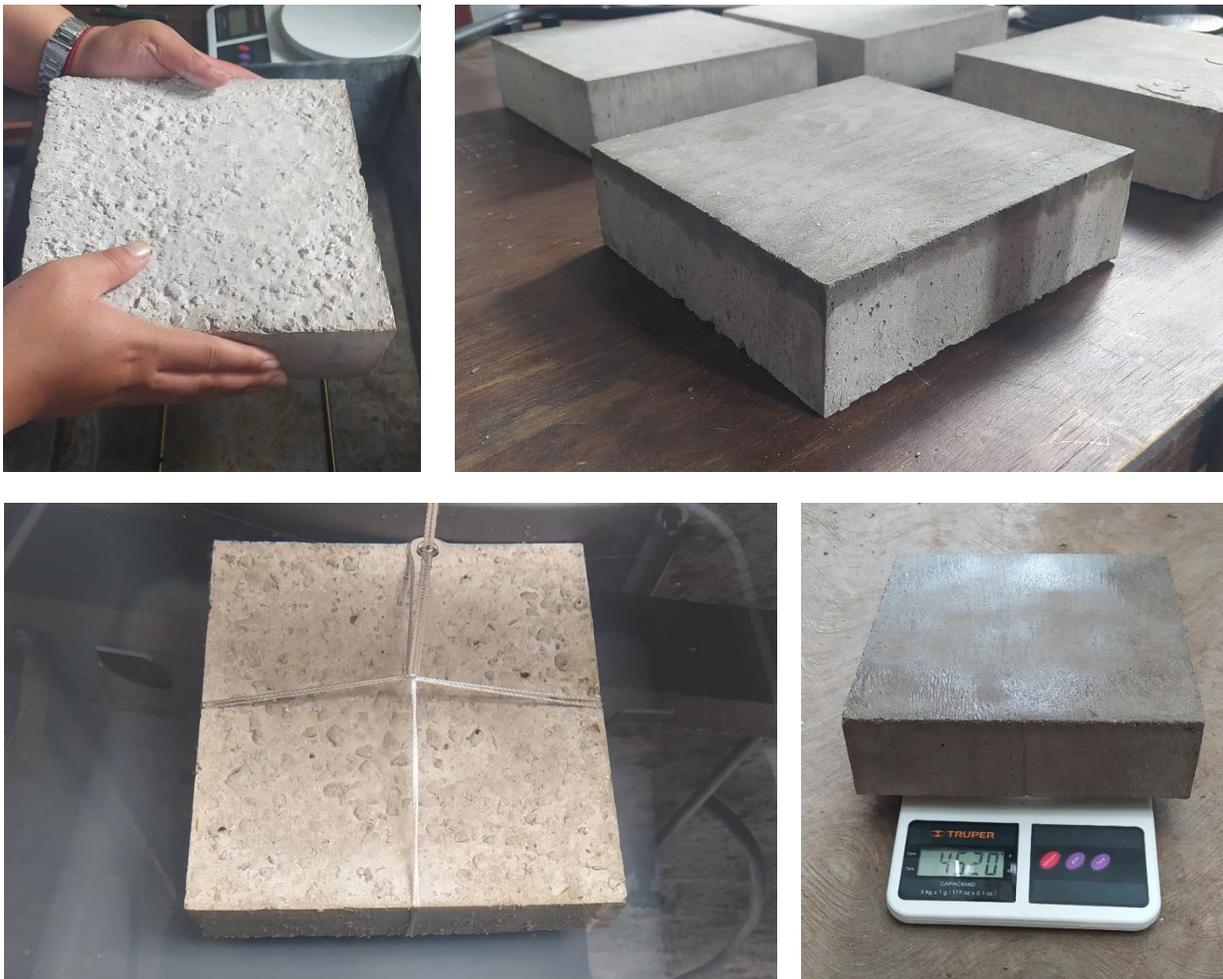
- Probetas 20 x 20 x 6 cm (Tamaño del prototipo)
- Se hizo el ensayo de 5 probetas.

Datos generados

- Ms Masa seca del espécimen (g)
- Ma Masa del espécimen sumergido en agua (g)
- M1 Masa húmeda (g) absorción inicial
- Cb Coeficiente de absorción inicial ($\text{g}/\text{cm}^2 \times \text{min}^{0,5}$)
- Msss Masa saturada y superficialmente seca (g)
- A1 Volumen de agua absorbido referido al volumen aparente del espécimen en dm^3/m^3
- **A Es la absorción en % (en masa)**

Figura 46

Prueba para determinar el porcentaje de absorción de agua



Notas: Fotografías 1 y 2.- Prueba de capilaridad 10 min. Fotografía 3 y 4.- Prueba de inmersión total por 24 horas.

Tabla 33

Datos sobre la prueba de absorción de agua

Datos	Especimen				
	1	2	3	4	5
Volumen m³	2349.633	2384.027	2369.365	2348.213	2352.133
Ms (g)	4215	4392	4141	4122	4240
Ms Prom (g)	4222.00				
Ma (g)	4520	4654	4404	4433	4468
Densidad kg/m³	1793.897	1842.261	1747.726	1755.377	1802.619
Den Prom kg/m³	1788.38				
M1 (g)	4228.000	4417.000	4155.000	4136.000	4254.000
M1 Prom (g)	4238.00				
Cb g/cm² x min^{0.5}	1.04	1.99	1.11	1.11	1.11
Cb Prom	1.27				
Msss (g)	4520.00	4654.00	4404.00	4433.00	4468.00
A (%)	7.2	6.0	6.4	7.5	5.4
A Prom (%)	6.49				

Nota: Datos obtenidos por el autor

Se obtuvo el porcentaje de absorción de agua máxima dentro de lo especificado por la norma para pavimentos Tipo A para uso en adoquines (Tabla 41).

Pruebas complementarias del prototipo

- **Pruebas de pH**

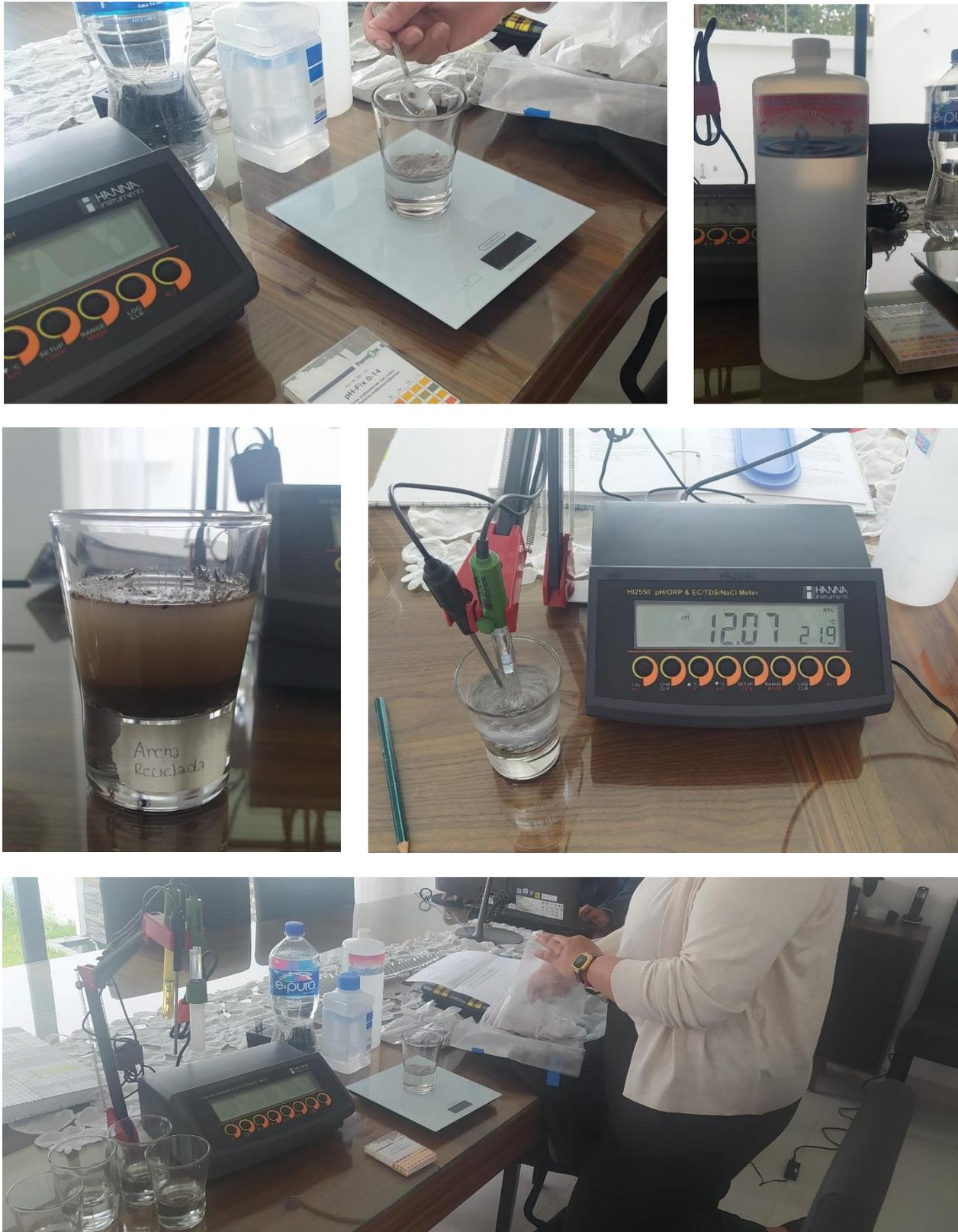
Para el análisis del pH de las arenas y de las mezclas de concreto, se tomó como referencia la norma ASTM D-4262 “Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces”, con apoyo de un medidor de sobremesa multiparamétrico HANNA Modelo HI 2550 PH/EC/TDS/NACL y de tiras reactivas de pH O a 14 marca Fermont.

- **Polvo:** Se utilizaron 10 g de material pulverizado de cada muestra homogenizada en 75 ml de agua destilada y se procedió a tomar las pruebas y registrar las lecturas arrojadas por el medidor de sobremesa multiparamétrico (Figura 46).
- **Muestra:** En secciones de concreto hidratado con agua destilada, se colocó directamente la tira reactiva de papel para medir el pH y proceder a hacer el registro (Figura 47).

El uso de tiras reactivas para medir el pH se usó como método cualitativo y como método cuantitativo para la confirmación de los datos se implementó la medición electroquímica con el medidor de sobremesa multiparamétrico.

Figura 47

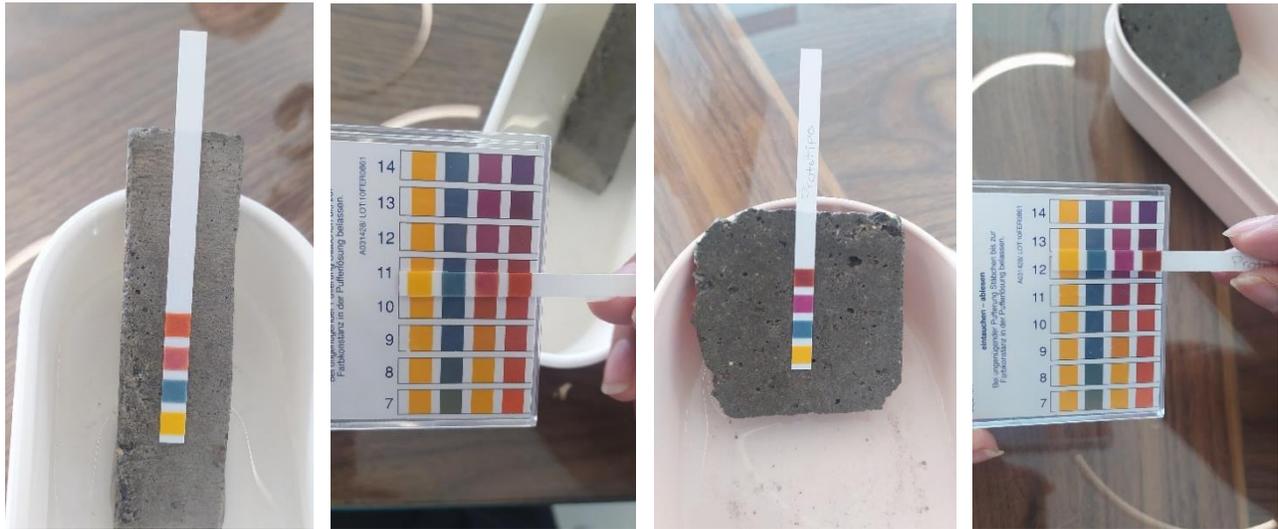
Elaboración de pruebas de pH, pruebas a arenas y concretos en polvo hidratado en agua destilada



Notas: Imágenes propiedad del autor. Medidor de sobremesa multiparamétrico, del Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Posgrado UNAM.

Figura 48

Elaboración de pruebas de pH, en concreto endurecido hidratado en agua destilada



Notas: Imágenes propiedad del autor.

Tabla 42

Datos sobre la prueba de pH

	Medidor de sobremesa multiparamétrico				Tiras reactivas	
	Arena natural	Arena reciclada	Concreto de control	Concreto prototipo	Concreto de control	Concreto prototipo
pH	8.57	8.38	11.90	12.07	11	12

Notas: Datos obtenidos con apoyo del Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Posgrado UNAM.

Figura 49

Escala de pH para el concreto



Notas: Imágenes tomada de la web <http://blog.abinco.com.mx/posts/carbonatacion-en-estructuras-de-concreto>

En un concreto sano su pH ronda entre 12-13 y una vez que comienza el proceso de carbonatación, éste (pH) se reduce por debajo de 11. Con esta premisa, encontramos que el concreto de nuestro prototipo tiene un pH óptimo al ser moderadamente alcalino (Tabla 42 y Figura 48).

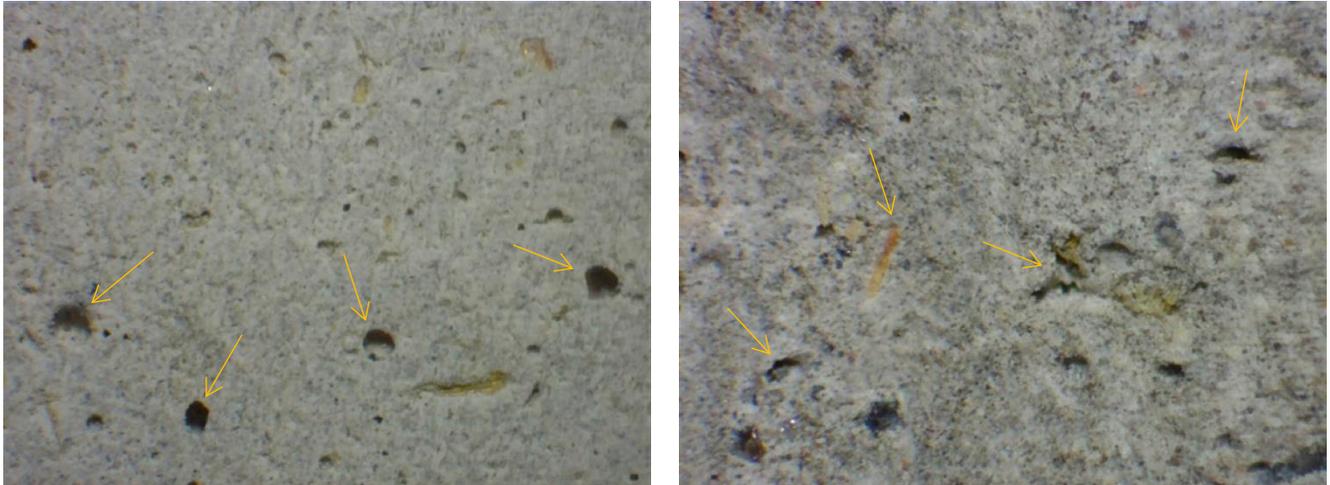
- **Pruebas de microscopía óptica**

El análisis visual nos sirve para analizar la integración de los componentes en la mezcla de concreto, en específico el de los agregados con la pasta de cemento. Con apoyo de un microscopio estereoscópico Motic modelo: SMZ-161.

- **Muestra:** Secciones de concreto de control y de concreto del prototipo (Figura 49).

Figura 50

Imágenes acercamiento 1x, concreto de control (izquierda) vs concreto prototipo (derecha)



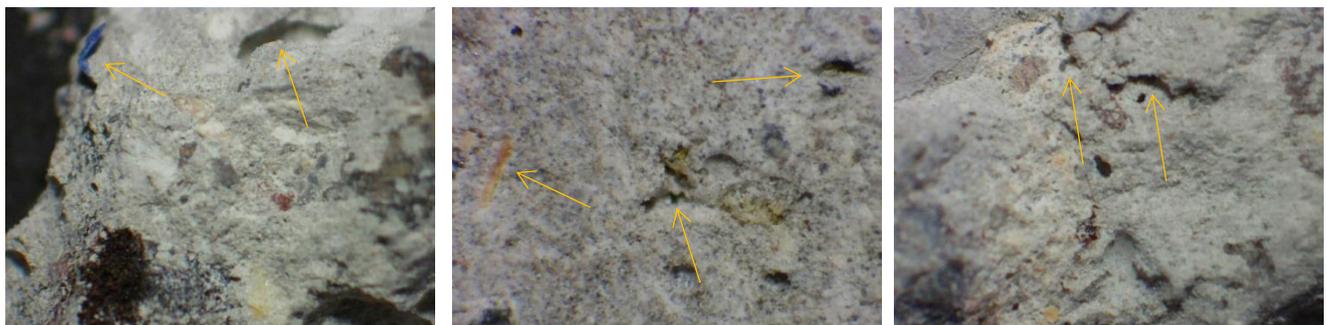
Notas: Imágenes obtenidas con microscopio estereoscópico Motic modelo: SMZ-161, del Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Posgrado UNAM.

En estas imágenes comparativas, podemos hacer las siguientes puntuaciones:

- La mezcla de control tiene mayor homogeneidad de sus componentes, la cantidad de aire atrapado es bajo lo cual denota en la porosidad de la superficie, tiene algunas partículas orgánicas.
- La mezcla de concreto del prototipo es homogénea, con algunas pocas uniones con aire atrapado en la interfase de los componentes. Muestra una superficie porosa y algunas partículas presentes con óxidos, se pueden observar también en la Figura 50.

Figura 51

Imágenes acercamiento 3x concreto prototipo



Notas: Observación de impurezas, grietas y aire atrapado en la mezcla de concreto

Tabla resumen de los resultados

En resumen, los datos obtenidos se encuentran dentro de las características mínimas establecidas por la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 (Tabla 43).

Tabla 34

Tabla comparativa de costo unitario del producto

Ensayos	Norma	Prototipo adoquín con 100% de agregados finos reciclados
	NMX-C-314-ONNCCE-2014	
	Valor	Valor
Resistencia esfuerzo a la compresión (f'c Promedio MPa/cm ²)	25 MPa /cm ²	25.88 MPa /cm ²
Resistencia esfuerzo a la abrasión (Reducción de espesor máximo en mm)	3 mm	3 mm
% de absorción de agua máxima individual	11% máximo	6.49 %
pH	12 – 13	pH 12.07 Medidor de sobremesa multiparamétrico pH 12 Tiras reactivas

Nota: Elaboración propia

Procedimiento de colocación del adoquín

Referencia: NMX-C-314-ONNCCE-2014. Para la colocación del adoquín se tomarán las recomendaciones generales y el procedimiento constructivo del pavimento de adoquín de la norma, que incluyen:

- Preparación del terreno y construcción de la base
- Colocación de la capa de arena
- Colocación de los adoquines y compactación
- Sellado de juntas
- Limpieza, uso y mantenimiento del pavimento

En la [Figura 51](#) se pueden observar los componentes del pavimento con adoquín que se describen a continuación:

Preparación del terreno y construcción de la base

- Limpieza del terreno y trazo del pavimento

La conformación y nivelación de la subrasante debe considerar las pendientes definitivas del pavimento, con objeto de no dar está pendiente con diferencias en los aspersiones de las capas de subbase, base y cámara de arena.

- Preparación subrasante que será el suelo sobre el cual se construye la estructura del pavimento

Los pasos consecutivos para preparar la subrasante, la subbase y los materiales de la base, son similares a aquellos que requieren los pavimentos flexibles.

La calidad de los materiales y la compactación adecuada de la estructura del pavimento es fundamental para su buen comportamiento y durabilidad.

Puede ser necesario hacer la estabilización del suelo mediante un tratamiento químico o mecánico para incrementar o mantener la estabilidad de una masa de suelo o mejorar sus propiedades de ingeniería, empleando cal, cenizas, humus de sílice o cemento son materiales químicos normalmente utilizados para estabilización.

- Construcción de la base

La base es un material de espesor dado colocado sobre la subbase o subrasante para soportar una superficie. Puede ser agregado compactado, agregado estabilizado con cemento o asfalto, o cemento hidráulico o asfáltico.

El agregado de la base debe tenderse y compactarse en capas uniformes que no excedan de 200 mm de espesor. La tolerancia recomendada para la planicidad de la superficie de la base debe ser de 10 mm sobre una regla de 3 m.

- Construcción de elementos de confinamiento

Estos elementos mantienen juntos y unidos a tope a los adoquines, permitiendo un autotrabaado firme y estable de las piezas en todo el pavimento, impiden el movimiento de las piezas por las fuerzas horizontales que genera el tráfico y los pequeños asentamientos. Se diseñan para permanecer inmóviles cuando reciben impactos ocasionales de llantas de vehículos.

Los elementos de confinamiento pueden ser prefabricados y después colocados en el sitio entre los que se incluyen al concreto precolado.

Capa de arena

Colocar una capa de material friccionante limpio. Puede ser natural o triturado, predominantemente retenido en la malla No. 4 (4.74 mm). El espesor de la capa es de 25mm a 40mm.

Colocación de los adoquines y compactación

- Instalación de los adoquines asentándolos sobre la cama de arena

Las piezas se colocan, manual o mecánicamente, sobre la cama de arena. Durante esta etapa del proceso no se debe caminar sobre los adoquines. La separación entre los adoquines debe ser en 3 a 5 milímetros.

Un arreglo eficiente de los adoquines es el conocido como “petatillo o parquet” que consta de un despiece donde dos o más piezas se colocan lado a lado y las adyacentes a 90° y alternados.

- Se realiza la compactación utilizando una placa vibro compactadora para enrasar la capa de adoquines por la parte superior de estos para corregir cualquier irregularidad en el espesor y en la colocación.

Usar una placa vibratoria de baja amplitud y alta frecuencia capaz de compactar a 22kN a una frecuencia de 75-100 Hz con suela de poliuretano para no dañar la superficie de las piezas. Dar mínimo dos pasadas de la placa, recorriendo toda el área en una dirección antes de recorrerla en la otra, teniendo el cuidado de traslapar cada recorrido con el anterior.

- Sustituir los adoquines fisurados.

Sellado de juntas

La arena de junteo debe cumplir con los requerimientos de graduación que se muestran en la [Tabla 44](#).

Tabla 4435

Requerimientos de graduación para arena de junteo

Tamaño de la malla	Arena natural % que pasa	Arena manufacturada % que pasa
No. 4 (4.75 mm)	100	100
No. 8 (2.36 mm)	95 a 100	95 a 100
No. 16 (1.18 mm)	70 a 100	70 a 100
No. 30 (0.600 mm)	40 a 75	40 a 75
No. 50 (0.300 mm)	10 a 35	20 a 40
No. 100 (0.150 mm)	2 a 15	10 a 25
No. 200 (0.075 mm)	0 a 5	0 a 10

Notas: Datos obtenidos de la Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014.

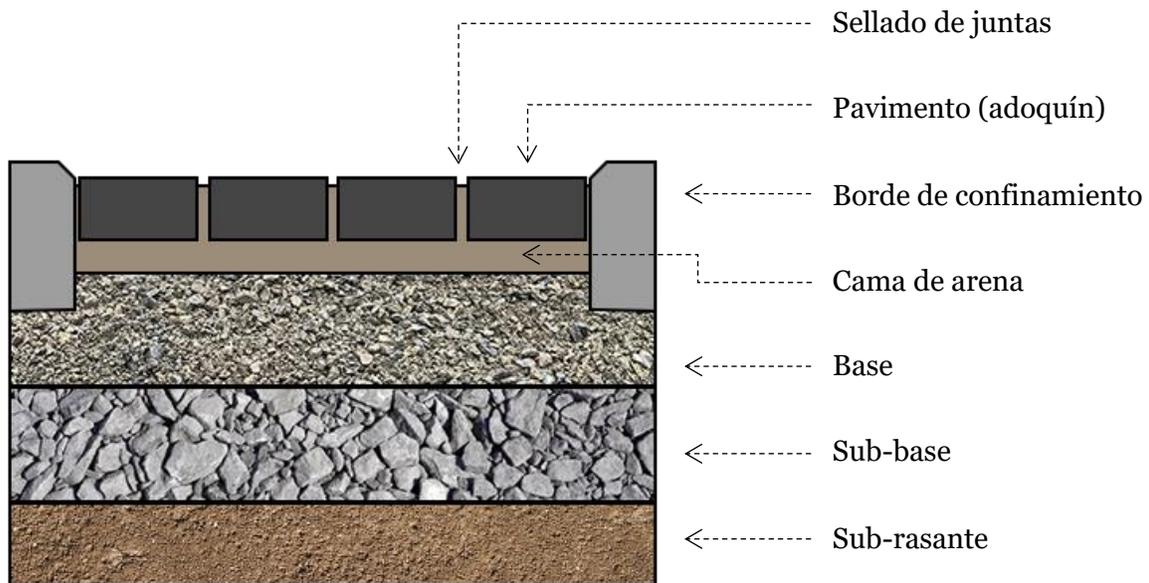
- La rena de sello se esparce sobre los adoquines con uso de escobas y en capas delgadas alternando el barrido con la compactación hasta conseguir el lleno total de la junta, sin que quede arena sobre el adoquín.
- Se dan al menos cuatro pasadas con placa vibro compactadora, en diferentes direcciones y traslapando cada recorrido con el anterior.

Limpieza, uso y mantenimiento del pavimento

- Terminado el sellado de la junta, se procede a recoger la arena de sello excedente y a humedecer el pavimento con un rocío de agua.
- El mantenimiento del pavimento consiste en identificar el daño y corregirlo, así como las causas que puedan llegar a dañar su funcionamiento.
- Si la junta ha perdido más de 1 cm de sello, se debe colocar nuevamente sello hasta que la junta quede totalmente llena.
- Corregir cuando se presenten ondulaciones o asentamientos.

Figura 52

Procedimiento constructivo de adoquín



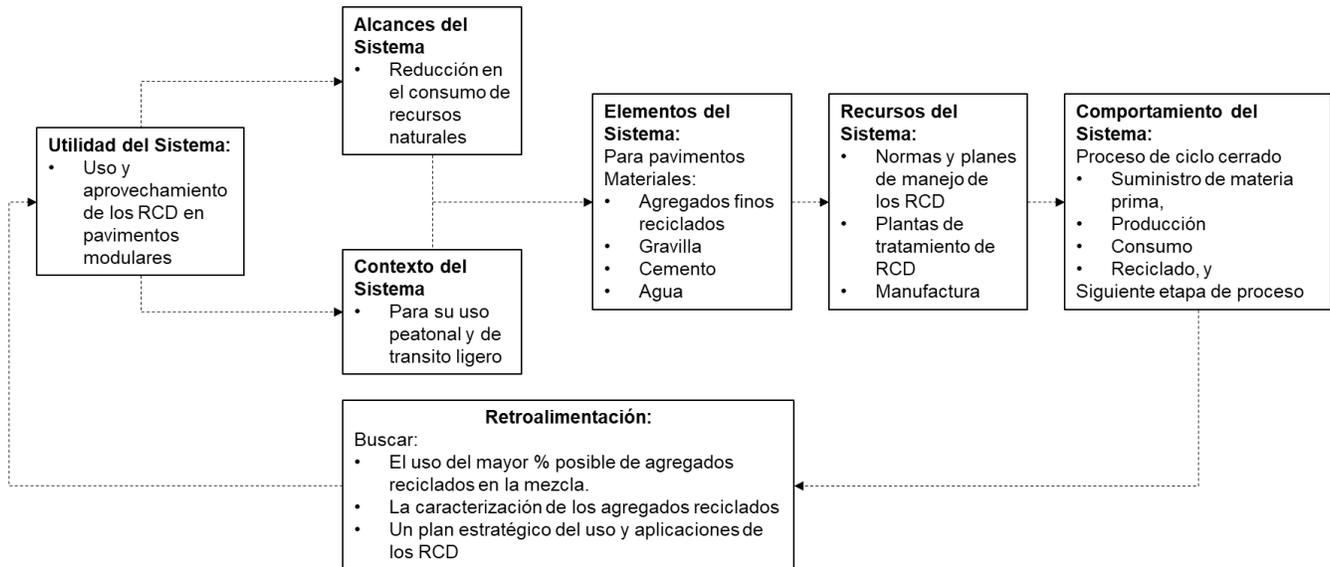
Nota: Elaboración propia

5.3. Sistema de la aportación del producto y sus componentes

El objetivo general del modelo sistemático es que permita identificar plenamente la estructura y funcionamiento del proceso para la obtención del prototipo. Dividido en siete pasos se elaboró el análisis de valores diferenciales de enfoque sistémico (Figura 52).

Figura 53

Análisis de Valores Diferenciales Enfoque Sistémico.



Fuente: Resumen del Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz del libro de Teoría General de Sistemas (Bertalanffy & Santisteban Fernández, 1979).

Componente 1 - Utilidad del Sistema:

Uso y aprovechamiento de los RCD en pavimentos modulares peatonales. Proponer, analizar y determinar mediante la aplicación de alternativas la propuesta más conveniente desde una perspectiva económica y ambiental para el reaprovechamiento de los residuos de demolición.

Componente 2 - Alcances del Sistema:

Reducción en el consumo de recursos naturales. Al usar los RCD como materia prima, reducir el impacto ambiental generado específicamente en la extracción de nuevos materiales.

Componente 3 - Elementos del Sistema:

Para pavimentos: Materiales: Agregados finos reciclados, Gravilla, Cemento y Agua.

Componente 4 - Contexto del Sistema:

Para objeto de la investigación se ha delimitado a su uso peatonal.

Componente 5 - Recursos del Sistema:

- Normas y planes de manejo de los RCD:
 - Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
 - Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
 - Reglamento de Construcción de la CDMX
 - Norma Ambiental de la Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019, Clasificación y

Especificaciones de manejo para Residuos de la Construcción y Demolición.

- NOM-161-SEMARNAT-2011, Criterios para Clasificar a los Residuos de Manejo Especial
 - Plan de manejo de Residuos de la Construcción y Demolición (CMIC)
 - Norma Mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Industria de la Construcción – Mampostería- Adoquines para uso en Pavimentos – Especificaciones y Métodos de Ensayo”
 - Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013 “Industria de la Construcción – Mampostería – Resistencia a la Compresión de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones y Adoquines – Método de Ensayo”
 - Norma Mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2013 “Industria de la construcción – Mampostería- Determinación de la Absorción Total y la Absorción Inicial de Agua en Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones - Métodos de Ensayo”.
 - Normas y planes internacionales
- Plantas de tratamiento de RCD
 - Manufactura con materiales reciclados

Componente 6 - Comportamiento del Sistema:

- Proceso de ciclo cerrado
 - Suministro de materia prima,
 - Producción
 - Consumo
 - Reciclado, y
 - Siguiente etapa de proceso

Componente 7 - Retroalimentación del Sistema:

Buscar:

- El uso del mayor % posible de agregados reciclados en la mezcla.
- La caracterización de los agregados reciclados
- Un plan estratégico del uso y aplicaciones de los RCD

La industria de la construcción puede desempeñar un papel importante en los procesos sostenibles, reducción del impacto ambiental y mejoras en la calidad de salud de la población.

Existe un nicho de oportunidad en los materiales alternativos adaptables a la demanda de la industria de la construcción en cuanto a disponibilidad, calidad en la elaboración y producción eficiente.

Otras ventajas del reciclaje, es que podemos colaborar con la creación de nuevos productos. Existe una amplia gama de materiales tradicionales, pero pocas son las opciones comerciales de materiales reciclados. Como respuesta al aprovechamiento de los RCD aplicados a la arquitectura, surge la propuesta de generar un material sostenible, funcional y estético. Que no solo ayude a la disminución de residuos sólidos en el país, si no también genere nuevas líneas de producción, con nuevos productos, con nuevas cualidades.

5.4. Descripción valores del producto de investigación

Valores diferenciales

Es una técnica creada por Edward De Bono, una herramienta de comunicación utilizada para facilitar la resolución o el análisis de problemas desde distintos puntos de vista o perspectivas. Se trata de un marco de referencia para el pensamiento que puede incorporar el pensamiento lateral. La idea de los 6 sombreros para pensar está enfocada en la división del pensamiento por colores para desarrollar el pensamiento lateral (De Bono, 1999).

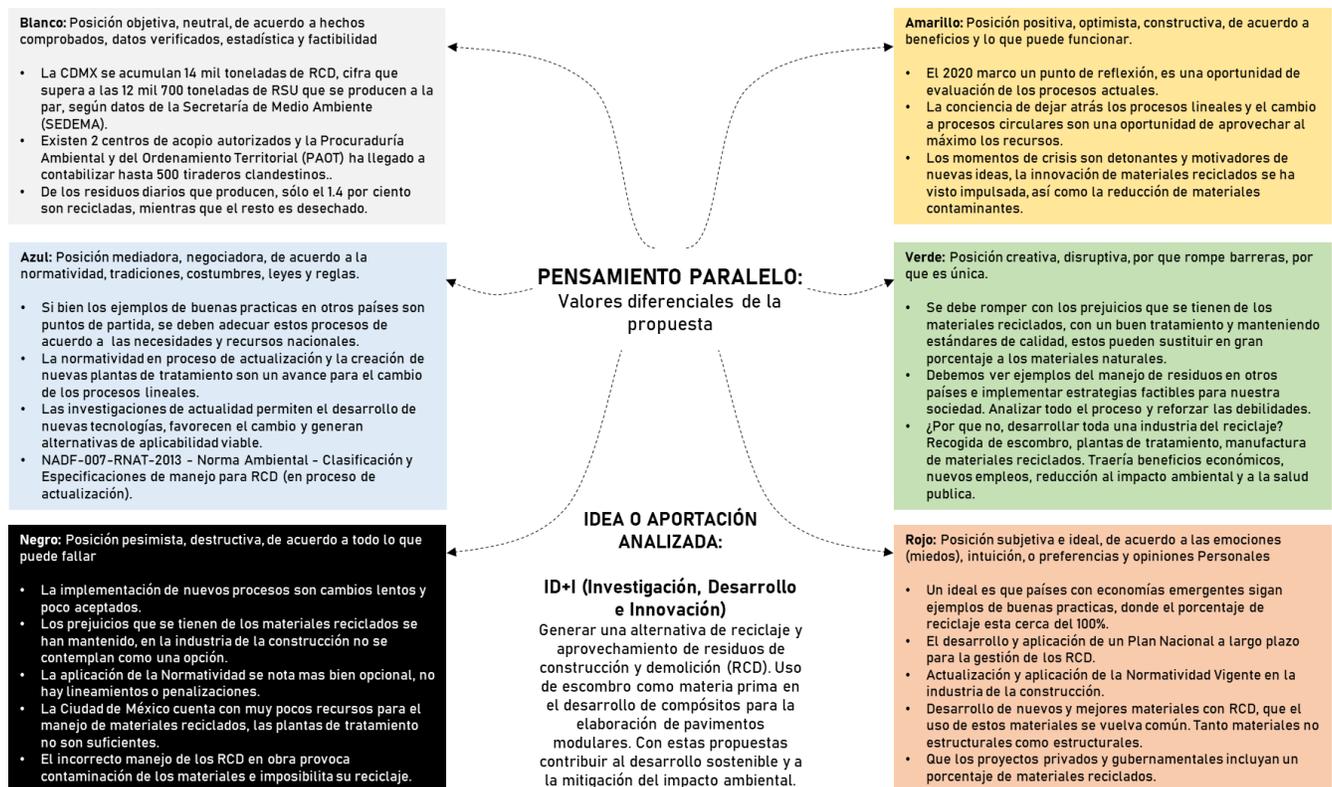
Se trata de un tipo de pensamiento muy útil para la resolución de problemas y la toma de decisiones. El concepto de pensamiento lateral surge en 1967 a partir del libro de Edward de Bono "El uso del pensamiento lateral". Este tipo de pensamiento busca encontrar soluciones a problemas siguiendo caminos poco lógicos o habituales. Esta manera de pensar trata de escapar de las ideas preconcebidas para encontrar una solución creativa a los problemas.

- **Mapa de Análisis de los Valores Diferenciales**

Gráficamente se elaboró una lluvia de ideas para el análisis de las diferentes perspectivas (Figura 53). Bono nos propone un método que nos permite pensar de manera más eficaz. Los seis sombreros representan seis maneras de pensar y deben ser considerados como direcciones de pensamiento más que como etiquetas para el pensamiento, es decir, que los sombreros se utilizan proactivamente y no reactivamente.

Figura 54

Análisis de Valores Diferenciales



Fuente: Elaboración propia a partir de (De Bono, 1999).

- **Análisis de los Valores Diferenciales de la Propuesta**

Para llevar a cabo esta técnica de los 6 tamices se hizo un trabajo por pares, para así no afectar o influir a los otros pares, primero se analizó el Blanco y el Rojo, después el Negro y Amarillo, para terminar con el Verde y Azul. Concluyendo con la Idea o Aportación Analizada.

- **BLANCO.** Posición objetiva, neutral, de acuerdo a hechos comprobados, datos verificados, estadística y factibilidad.
 - La CDMX se acumulan 14 mil toneladas de RCD, cifra que supera a las 12 mil 700 toneladas de RSU que se producen a la par, según datos de la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA).
 - Existen 2 centros de acopio autorizados y la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) ha llegado a contabilizar hasta 500 tiraderos clandestinos.
 - De los residuos diarios que producen, sólo el 1.4 por ciento son recicladas, mientras que el resto es desechado.
 - NACDMX-007-RNAT-2019- Norma Ambiental - Clasificación y Especificaciones de manejo para RCD (en proceso de actualización).
- **ROJO.** Posición subjetiva e ideal, de acuerdo a las emociones (miedos), intuición, o preferencias y opiniones Personales.
 - Un ideal es que países con economías emergentes sigan ejemplos de buenas prácticas, donde el porcentaje de reciclaje está cerca del 100%.
 - El desarrollo y aplicación de un Plan Nacional a largo plazo para la gestión de los RCD.
 - Actualización y aplicación de la Normatividad Vigente en la industria de la construcción.
 - Desarrollo de nuevos y mejores materiales con RCD, que el uso de estos materiales se vuelva común. Tanto materiales no estructurales como estructurales.
 - Que los proyectos privados y gubernamentales incluyan un porcentaje de materiales reciclados.
- **AMARILLO.** Posición positiva, optimista, constructiva, de acuerdo a beneficios y lo que puede funcionar.
 - El 2020 marco un punto de reflexión, es una oportunidad de evaluación de los procesos actuales.
 - La conciencia de dejar atrás los procesos lineales y el cambio a procesos circulares son una oportunidad de aprovechar al máximo los recursos.
 - Los momentos de crisis son detonantes y motivadores de nuevas ideas, la innovación de materiales reciclados se ha visto impulsada, así como la reducción de materiales contaminantes.
- **VERDE.** Posición creativa, disruptiva, porque rompe barreras, porque es única.
 - Se debe romper con los prejuicios que se tienen de los materiales reciclados, con un buen tratamiento y manteniendo estándares de calidad, estos pueden sustituir en gran porcentaje a los materiales naturales.
 - Debemos ver ejemplos del manejo de residuos en otros países e implementar estrategias factibles para nuestra sociedad. Analizar todo el proceso y reforzar las debilidades.
 - ¿Por qué no, desarrollar toda una industria del reciclaje? Recogida de escombros, plantas de tratamiento, manufactura de materiales reciclados. Traería beneficios económicos, nuevos empleos, reducción al impacto ambiental y a la salud pública.

- **AZUL.** Posición mediadora, negociadora, de acuerdo a la normatividad, tradiciones, costumbres, leyes y reglas.
 - Si bien los ejemplos de buenas prácticas en otros países son puntos de partida, se deben adecuar estos procesos de acuerdo a las necesidades y recursos nacionales.
 - La normatividad en proceso de actualización y la creación de nuevas plantas de tratamiento son un avance para el cambio de los procesos lineales.
 - Las investigaciones de actualidad permiten el desarrollo de nuevas tecnologías, favorecen el cambio y generan alternativas de aplicabilidad viable.
- **NEGRO.** Posición pesimista, destructiva, de acuerdo a todo lo que puede fallar.
 - La implementación de nuevos procesos son cambios lentos y poco aceptados.
 - Los prejuicios que se tienen de los materiales reciclados se han mantenido, en la industria de la construcción no se contemplan como una opción.
 - La aplicación de la Normatividad se nota más bien opcional, no hay lineamientos o penalizaciones.
 - La Ciudad de México cuenta con muy pocos recursos para el manejo de materiales reciclados, las plantas de tratamiento no son suficientes.
 - El incorrecto manejo de los RCD en obra provoca contaminación de los materiales e imposibilita su reciclaje.

5.5. Valores sostenibles del producto

Explicación del Método de 5P HOLCIM para el Desarrollo de Valores Sostenibles

El método 5P HOLCIM para es una explicación concisa del proyecto con “aspectos objetivo” se trata de una autoevaluación. Contempla 5 aspectos (HOLCIM, 2022):

- **El Progreso (Progress):** El proyecto debe demostrar innovación a la vanguardia de la construcción sostenible. Avances y los enfoques que marcan tendencia, independientemente de su escala, deben ser transferibles a una variedad de otras aplicaciones.
- **Personas (People):** El proyecto debe cumplir con los más altos estándares éticos y apoyar la equidad social en todas las fases de construcción, desde la planificación y la construcción de procesos de impacto a largo plazo en el tejido de esa comunidad. El proyecto tiene que dar una respuesta avanzada en términos de responsabilidad ética y social.
- **Planeta (Planet):** El proyecto debe presentar un uso racional y la gestión de los recursos naturales a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo la operación y mantenimiento, las preocupaciones ambientales a largo plazo, ya sea referente a los flujos de materiales o la energía, debe ser una parte integral de la estructura construida.
- **La Prosperidad (Prosperity):** El proyecto debe resultar económicamente viable e innovadora en cuanto a la distribución de los recursos financieros se refiere. La financiación debe promover una economía de medios y ser compatible con las exigencias y limitaciones encontradas en toda la vida útil de la construcción.
- **Competencia (Proficiency):** El proyecto debe transmitir un alto nivel de calidad arquitectónica en la forma en que aborda los factores culturales y físicas. Con el espacio y la forma de suma importancia, la construcción debe tener un impacto duradero estética en su entorno.

Análisis de los Valores Sostenibles de la Propuesta

Conforme al Método 5P para la Evaluación de Valores Sostenibles, se tratan a continuación cinco (5) aspectos objetivo con su autoevaluación. Se proporcionan primero dos objetivos de 1000 caracteres -12 líneas- máximo, y después tres objetivos de 500 caracteres -6 líneas-, cada uno con una explicación concisa de la aportación que cada aspecto del proyecto/prototipo cubre para cumplir con la visión de los "aspectos objetivo" y los criterios particulares de sostenibilidad. Incluye en cada punto, una autoevaluación ponderada en relación con cada uno de los "aspectos objetivo" analizados, calificando en orden descendente desde una escala de cinco estrellas (la más alta), a una estrella (la más baja), por su importancia en la apreciación y definición de las cualidades como las propiedades cuantificables y medibles, que hacen sostenible el proyecto/prototipo (Figura 54).

PLANET 1

* * * * *

Calidad del medio ambiente y la eficiencia de los recursos – “Planeta”

Dentro del ciclo de vida de los materiales de construcción existen diferentes fases, desde la extracción de los materiales, transporte y producción, hasta el manejo de los residuos, integrando en cada uno de ellos diferentes niveles de contaminación ambiental. Por esto es importante la búsqueda de alternativas que contrarresten dichos daños. Es importante hacer frente al agotamiento de los recursos naturales del planeta y alargar el ciclo de vida de un producto. “Crear productos más eficientes y sostenibles desde el principio ayudaría a reducir el consumo de energía y recursos, ya que se calcula que más del 80% del impacto ambiental de un producto se determina durante la fase de diseño” (*Economía circular*, 2023) . La reducción y reciclaje de los RCD conlleva un ahorro de la en materia prima, de consumo energético y emisión de gases de efecto invernadero.

Cuando reciclamos un producto, estamos evitando que estos se almacenen en grandes vertederos, algunos de ellos fuera de control y sobre saturados.

PEOPLE 2

* * * * *

Las normas éticas y la equidad social – “Personas”

La causa principal del aumento de la contaminación del suelo, el agua y el aire es la eliminación inadecuada de los desechos sólidos. Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la cantidad de residuos sólidos urbanos que provocan la degradación del suelo equivale al 0,3% del PIB.

Debido a las obras de construcción, demolición o por situaciones de emergencia y desastre como sismos, inundaciones etc., se generan residuos de la construcción y demolición, los cuales deben ser gestionados de manera adecuada para evitar su abandono en áreas naturales, o mala disposición. La mala gestión del escombro o residuos derivados de los trabajos de construcción, acarrea consecuencias que no solo impactan en el ambiente debido a la descomposición de los residuos, sino también afectan a la salud pública, lo que ha motivado la creación de normativas, que establecen pautas de comportamiento para lograr un manejo seguro (*SEDEMA, 2020*).

PROGRESS 3

* * *

La innovación y la transferencia – “El Progreso”

Otras ventajas del reciclaje, es que podemos colaborar con la creación de nuevos productos. Existe una amplia gama de materiales tradicionales, pero pocas son las opciones comerciales de materiales reciclados. Como respuesta al aprovechamiento de los RCD aplicados a la arquitectura, surge la propuesta de generar un material sostenible, funcional y estético. Que no solo ayude a la disminución de residuos sólidos en el país, si no también genere nuevas líneas de producción, con

nuevos productos, con nuevas cualidades.

PROSPERITY 4

**

El desempeño económico y compatibilidad – “La Prosperidad”

Los escombros convertidos en materia prima tienen importantes ventajas, acarrea beneficios económicos ya sea en la extracción de materiales naturales y gastos de transporte. La industria del reciclaje en desarrollo representa un impulso al crecimiento económico y la generación de nuevos empleos.

PROFICIENCY 5

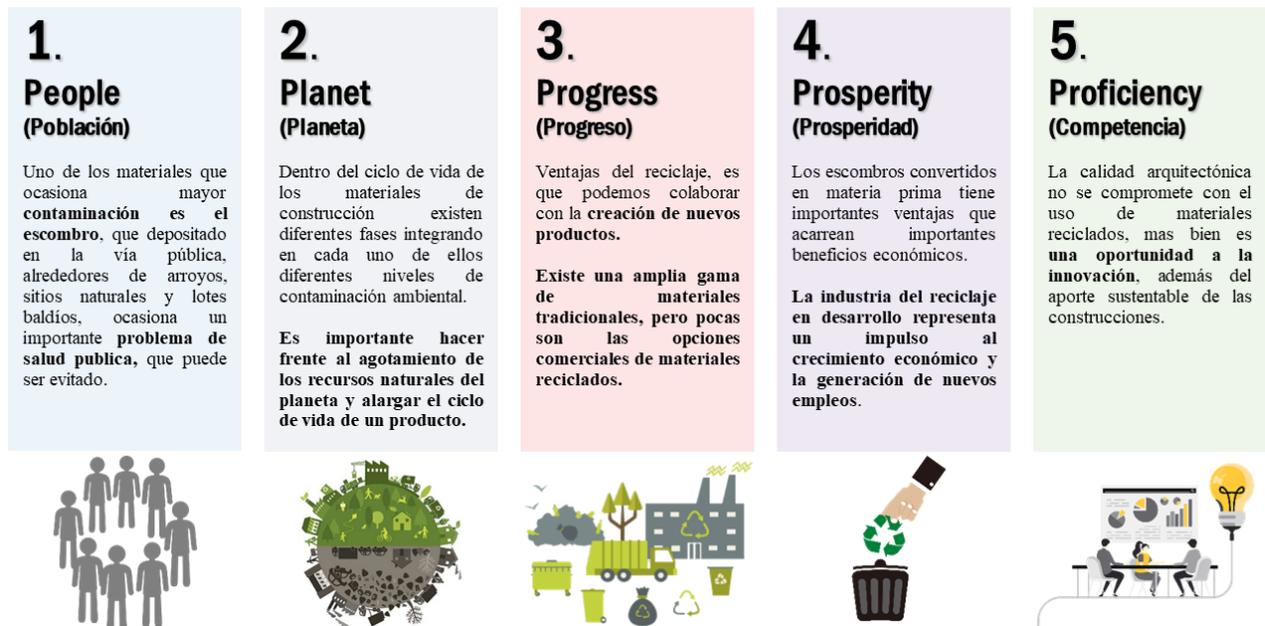
*

Impacto contextual y estético “Competencia”

La calidad arquitectónica no se compromete con el uso de materiales reciclados, más bien es una oportunidad a la innovación, además del aporte sostenible a las construcciones. Construir de una forma sostenible es una acción que abarca desde la elección de los materiales de construcción, el proceso constructivo, e incluso el entorno urbano, hasta la fase de demolición y la gestión de residuos. Conlleva un análisis del ciclo de vida desde el diseño arquitectónico del edificio y la obtención de las materias primas, hasta que éstas regresan al medio en forma de residuos.

Figura 55

Análisis de Valores Sostenibles



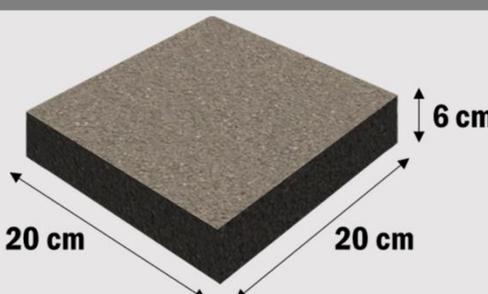
Fuente: Elaboración propia a partir del método de 5P HOLCIM para el Desarrollo de Valores Sostenibles (HOLCIM, 2022)

5.6. Hoja de producto

Figura 56
Descripción del prototipo

Hoja de producto

I&D+I de Materiales Emergentes y Sustentables para la Arquitectura



Prototipo Pavimento



URBANO



ZONAS RURALES



PARQUES Y PLAZAS

Los pavimentos son un elemento básico en la industria de la construcción, el cambio consiste en la introducción pavimentos reciclados como nueva alternativa. El uso de estos pavimentos puede ir desde casa habitación, vía pública, plazas, jardines y veredas donde la permeabilidad y recarga acuífera es importante. En caminos rurales, ya que es necesario el uso de pavimentos de bajo impacto ambiental.

Beneficios:

- Fácil colocación
- Fácil transporte
- Fácil mantenimiento

Ventajas ambientales:

- Permite la recarga acuífera
- Prevención de inundaciones
- Se puede reciclar nuevamente

DATOS GENERALES	
Autor(es):	Rosario Mabel Bucio Toledo
Origen:	UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura Campo de Conocimiento de Tecnologías
Tesis:	<i>Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición: Influencia de los agregados reciclados en la elaboración de adoquines para su uso en pavimentos</i>
Proyecto:	Adoquín con agregados finos reciclados
Lapso de Desarrollo:	2020 – 2022
Status:	Prototipo Funcional en Operación
Nivel de Desarrollo:	TRL 4 (Technology Readiness Level)
DATOS TÉCNICOS	
Dimensiones 1:	20 x 20 x 6 cm
Área de superficie:	400 cm ²
Volúmen:	2400 cm ³
Composición:	<ul style="list-style-type: none"> Cemento Arena reciclada de concreto Gravilla Agua
CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS	
Peso Volumétrico:	115 g.
Resistencia compresión:	250 kg/cm ² (f'c).
Resistencia Abrasión:	Reducción del espesor máximo 3mm Perdida de vol. Max. 15cm ³ /50 cm ²
Densidad:	1797.77 kg/m ³
Porcentaje de absorción max.	6.49%
pH	12

Pavimento Tipo A / Adoquín con agregados de RCD



Vista perspectiva



Vista grupal



Descripción del Producto

- El Pavimento / Adoquín, tiene una incorporación de 100% de agregados finos reciclados, es útil para uso peatonal, cubre las especificaciones establecidas por la normatividad. Puede utilizarse en banquetas, calles y avenidas, patios, camellones, estacionamientos, explanadas y plazas, jardines.

Fundamento

- La industria de la construcción puede desempeñar un papel importante en los procesos sostenibles, los instrumentos regulatorios han marcado pautas, pero es una labor que se debe abordar de manera conjunta entre población, industria, investigadores y gobierno.

Beneficio e Impacto

- Se ha comprobado que, con la gestión y procesamiento adecuados, los materiales recuperados y reciclados pueden reemplazar a los que se extraerían de los bancos de materiales pétreos, convirtiéndose en materia prima secundaria para la producción de nuevos elementos constructivos e incentivar la economía circular con la finalidad de mantener su valor a lo largo de su ciclo de vida, minimizar la generación de residuos y reducir los impactos provocados por su inadecuada disposición y extracción de materias primas.

Conclusiones y recomendaciones

Dado que en México existe una abundante oferta de materias primas, hace unos años no se habría considerado una prioridad el uso de los residuos de la construcción como fuente de agregados. Sin embargo, numerosos estudios realizados en todo el mundo han demostrado que los materiales reciclados pueden sustituir con éxito a los naturales, re direccionado a la industria de la construcción por un camino "sostenible" (Castaño et al., 2013, p. 123).

Los datos de la CMIC muestran que cerca del 87% del total de los RCD resultantes son susceptibles para su recuperación y revalorización. Y que, por el contrario, actualmente sólo el 4% de los RCD que se generan, son aprovechados (3% reciclaje y 1% reúso). Por esto es indispensable el análisis de los protocolos y herramientas disponibles para en lo posible aumentar el uso de agregados reciclados y la recuperación de materiales. En esta investigación en cada capítulo fundamenta e invita a eliminar la idea de deshacernos de los residuos, ya que estos son materia prima potencial que si se maneja de manera adecuada se pueden obtener productos de calidad.

Como cierre de esta investigación se concluye lo siguiente:

Comprobación de la hipótesis

Al incorporar agregados finos reciclados de concreto como materia prima en un diseño de mezcla para la elaboración de adoquines, es posible obtener una resistencia a la compresión adecuada según la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014, comprobando la hipótesis de investigación. En general el producto obtenido cumplió con las propiedades del pavimento Tipo A de uso peatonal.

- Con 60 mm espesor mínimo nominal en el diseño,
- Se obtuvo 250 kg/cm² de esfuerzo resistente máximo a la compresión,
- 6.49 de absorción de agua máxima individual dentro del límite de 11% y
- La reducción del espesor no fue mayor que 3 mm en la prueba de resistencia a la abrasión.

Objetivos alcanzados

Esta investigación describe el proceso de elaboración y maduración del concreto en mezclas con agregados finos reciclados de concreto y como resultado se alcanzaron los objetivos iniciales de la investigación:

- Se generó un diseño de mezcla con agregados finos reciclados de concreto para la elaboración de un prototipo de adoquín para su uso en pavimentos, con resistencia mecánica a la compresión adecuada.
- Se efectuó la caracterización granulométrica de los agregados finos de concreto reciclado.
- Se obtuvieron datos del impacto en la resistencia a compresión de los agregados finos reciclados de concreto dentro de las mezclas de concreto.
- Se estableció una comparativa entre los agregados finos reciclados y las arenas naturales en la fabricación de adoquines para determinar su influencia dentro de la mezcla variando los porcentajes de sustitución.
- Finalmente, se llevaron a cabo los ensayos de laboratorio para conocer las propiedades mecánicas del prototipo de pavimento (adoquín) y la verificación con el cumplimiento de las propiedades mínimas requeridas por norma.

Puntualizando lo siguiente:

Tanto los agregados reciclados como los naturales cuentan con partículas fuera de los rangos establecidos por la normatividad, con mayor porcentaje de finos en los dos tipos de arenas. El módulo de finura de ambas arenas se encuentra fuera de los parámetros (MF de 2.3 - 3.1), la arena natural con 3.43 y la arena reciclada con 3.34.

Al no cortar con un estándar de calidad de los agregados reciclados por su procedencia, es necesario trabajar con datos en rangos no específicos (Centeno et al., 2014).

Se ha verificado el impacto de los agregados reciclados en los resultados del esfuerzo máximo a la compresión, observando que los agregados finos reciclados tienen un comportamiento similar al de las arenas naturales dentro de una mezcla de concreto cuando se sustituye hasta un 70%.

Los diferentes muestreos demostraron que a partir del 80% de sustitución de agregados finos naturales por reciclados es necesario un ajuste de agua por absorción de humedad.

Se elaboró una mezcla con 100% de agregados finos reciclados. Se hizo el ajuste del agua debido a la absorción y humedad de los agregados reciclados, se consideró la humedad de los agregados para realizar una dosificación real durante la elaboración de la mezcla ya que el agua de absorción no forma parte del agua de mezclado. Se obtuvo un buen comportamiento en el esfuerzo a compresión, buena trabajabilidad y buen acabado en el concreto endurecido. Por lo cual se hacen las siguientes recomendaciones:

- Es necesario conocer el comportamiento del prototipo por tiempos prolongados, su interacción con el medio ambiente, con otros materiales y dentro de un sistema (Armenta et al., 2018).
- Seguir generando investigación con diferentes aplicaciones de los agregados reciclados para diferentes fines dentro de la arquitectura, conocer su comportamiento reducirá la incertidumbre hacia estos materiales (Kaarthik y Maruthachalam, 2021).
- La creación de nuevos productos con especificaciones técnicas que satisfagan a la industria y evaluar económicamente las ventajas al utilizar un diseño de mezcla con materiales reciclados, que corresponda a los elementos constructivos en los que se aplica (Vieira et al., 2016)
- Se recomienda un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) específico para especificar las ventajas y desventajas de su uso, su impacto ambiental y posibles mejoras para su reintegración a un ciclo cerrado (Ortiz et al., 2009)
- Partiendo de la limitada experiencia con que México cuenta para el manejo de los RCD tanto en su normatividad como en su aplicación en campo convendría realizar un estudio comparativo del manejo de los RCD y aplicaciones de las normas internacionales, implementar procesos para una adecuada gestión de los recursos con lo que se pretende obtener mejoras tanto en el proceso de tratamiento de residuos como la obtención de agregados reciclados de calidad e incrementar el porcentaje de reciclaje y recuperación de los materiales de construcción (ODS 11, 2015).

El uso de agregados reciclados está en tendencia y con un cambio de paradigma se convertiría en una práctica común, la difusión de sus aplicaciones y de los impactos en los materiales de construcción, podría llevar a los diferentes integrantes de la industria de la construcción sustituir porcentajes de material natural por reciclado, aunado a los avances tecnológicos con el tiempo lograr mayores impactos.

Propuesta escenarios futuros y líneas de investigación

La visión prospectiva es un método de planeación estratégica que nos permite vislumbrar los diferentes escenarios (Figura 56) en este caso en particular, el aprovechamiento de Residuos de Demolición y Construcción (RCD) en búsqueda de la aportación, aplicados en lo que refiere a campos como la construcción y medio ambiente, así como otras áreas que se encuentran de alguna manera involucradas para dar soluciones de manera integral y reaprovechar los RCD.

Figura 57

Infografía de escenarios posibles de aportación



Fuente: Elaboración propia

Escenarios futuros de la Aportación

A continuación, se hará un análisis sobre los diferentes escenarios involucrando el aprovechamiento de RCD, tratando de brindar una visión objetiva sobre las posibles ventajas y beneficios que pueden representar en cuanto a la reutilización de los materiales de construcción:

- Pavimentos modulares con 100% de agregados reciclados. Las investigaciones más recientes reflejan es sus pruebas obtenidas una sustitución de un alto porcentaje de agregados reciclados, pero sin llegar a su totalidad, El objetivo principal es lograr que los agregados finos y gruesos de los pavimentos se cubran al 100% con agregados reciclados. Para lograr esto, los agregados reciclados deben cumplir con estándares de buena calidad para su uso, que los materiales reciclados lleven un proceso apegado a normas y especificaciones de producto. Esto inicia desde obra, con la correcta separación de los materiales, evitar su contaminación y después en las plantas de tratamiento.
- Pavimentos reciclados con propiedades y beneficios activos. En la actualidad los pavimentos han dejado de ser elementos simples y su uso va más allá de brindar un soporte, pues el desarrollo de tecnologías y materiales son un punto de partida para la obtención de beneficios activos. La elaboración de estos pavimentos reciclados sumado a beneficios adicionales como generadores de energía o descontaminantes del aire son pavimentos innovadores que en un futuro se vislumbran como una necesidad.
- Elementos estructurales integrando materiales reciclados. El uso de materiales reciclados ha

estado presente en la elaboración de carreteras y pavimentos por mucho tiempo, pero estos casi siempre como rellenos, bases o subbases principalmente como elementos no estructurales. Si la calidad de los agregados reciclados es óptima su uso puede extenderse de forma pertinente en la elaboración de elementos estructurales. Como elementos de mampostería, por ejemplo. Por esto, la caracterización de las propiedades de los RCD es de gran importancia porque proporcionaría herramientas que apoyarían su uso.

- Estudio y caracterización de las propiedades de los RCD. La buena calidad de los RCD amplía las posibilidades de aumentar sus aplicaciones, Si se conocen las propiedades mecánicas y características morfológicas sus usos y aplicaciones como materiales de construcción se pueden ampliar o limitar. Elimina especulaciones y evita que estos materiales simplemente sean descartados por ser percibidos de mala calidad. Uno de los principales desafíos a escala mundial, es conseguir el desarrollo sustentable. Para llevar a cabo estos objetivos es conveniente y necesario, entre otros planteamientos, realizar una adecuada gestión de los residuos generando los mínimos posibles y que los que se generen tengan el máximo aprovechamiento a través de la reutilización, reciclado y valorización.

Análisis de buenas prácticas, hacia la economía circular de la Arquitectura. Partiendo de la limitada experiencia con que México cuenta para el manejo de los RCD tanto en su normatividad como en su aplicación en campo es que convendría un estudio comparativo del manejo de los RCD y aplicaciones de las normas internacionales, implementar procesos para una adecuada gestión de los recursos con lo que se pretende obtener mejoras tanto en el proceso de tratamiento de residuos como la obtención de agregados reciclados de calidad. De ahí viene que conviene cambiar la visión de lo que hasta hoy conocemos como residuo, dejar de ver estos como “basura” y verlos como “productos” de calidad. Productos que pueden ser utilizados y reincorporados en la industria de la construcción de manera segura y eficiente, apoyando así a la construcción sustentable. Tomar como referencia la experiencia que han desarrollado algunos países al reusó del RCD donde el reciclaje es casi total, con una nueva visión incrementar el porcentaje de reciclaje en países con economías emergentes tomando estos ejemplos, hacer una evaluación de la normatividad vigente, así como el análisis integral del proceso de producción.

Referencias

- Adam, M. N. (2000). *Tecnología del Concreto* (1. ed). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto : Arquine Ediciones.
- ASTM. (2022). *American Society for Testing and Materials—ASTM International*. <https://www.astm.org/>
- Bart van, H., & Medina Aristazábal, A. (2022). *Herramientas de la Economía Circular—Universidad de los Andes* [Cursos]. Coursera. <https://www.coursera.org/learn/herramientas-de-la-economia-circular/home/welcome>
- Bertalanffy, L. von, & Santisteban Fernández, A. (1979). *Perspectivas en la teoría general de sistemas: Estudios científicos-filosóficos*. Alianza Editorial. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=174557>
- Boletín Sustentabilidad. (2012). *Análisis de Ciclo de Vida (ACV)*. Deloitte. [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/risk/Sustentabilidad/mx\(es-mx\)Boletin_Sustentabilidad_Nov12.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/risk/Sustentabilidad/mx(es-mx)Boletin_Sustentabilidad_Nov12.pdf)
- Bucio-Toledo, R. M., & Flores-Sandoval, D. A. (2022). Agregados finos de concreto reciclado y su influencia en concreto no estructural. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 10*(Especial7), Article Especial7. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial7.9851>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2015a). *Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente*. Diario Oficial de la Federación. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2015b). *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos*. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131748/23._LEY_GENERAL_PARA_LA_PREVENCION_Y_GESTION_INTEGRAL_DE_LOS_RESIDUOS.pdf
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2014). *Plan de manejo de residuos de la construcción y demolición*. <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>
- Castaño, J. O., Misle Rodríguez, R., Lasso, L. A., Gómez Cabrera, A., & Ocampo, M. S. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: Perspectivas y limitantes. *Revista Tecnura, 17*(38), 121. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.4.a09>
- CMIC. (2014a). *Gestión de residuos de construcción y demolición en Alemania*. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/Alemania_BP.pdf
- CMIC. (2014b). *Gestión de residuos de construcción y demolición en Brasil*. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/Brasil_ficha.pdf
- CMIC. (2014c). *Gestión de residuos de construcción y demolición en Chile*. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.

https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/chile_bp.pdf

CMIC. (2014d). *Gestión de residuos de construcción y demolición en Colombia*. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/Colombia_Ficha.pdf

CMIC. (2014e). *Gestión de residuos de construcción y demolición en España*. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/Espana_BP.pdf

CMIC. (2014f). *Gestión de residuos de construcción y demolición en los EEUU*. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/eu_bp.pdf

CMIC. (2014g). *Buenos Manejos de Residuos de la Construcción*. https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/fichas_tecnicas.htm

CMIC. (2022). *Cámara Mexicana de la industria de la Construcción*. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. <https://www.cmic.org/>

CMNUCC. (2016). *El Acuerdo de París* | CMNUCC. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>

Comisión Europea. (2016). *Protocolo de Gestión de RCD en la UE*.

CONAMA. (2018). *Economía Circular en el sector de la construcción*. http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs%202018/6_final.pdf

Concretos Sustentables Mexicanos S.A. de C.V. (2022). CSMX. <https://csmx.mx/proyecto-1>

De Bono, E. (1999). *Six thinking hats* (1st Back Bay pbk. ed., rev.updated). Back Bay Books.

Economía circular: Definición, importancia y beneficios | Noticias | Parlamento Europeo. (2023, mayo 24). <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy Vol. 1: An economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation. <https://emf.thirdlight.com/link/x8ay372a3r11-k6775n/@/preview/1?o>

Ellen MacArthur Foundation. (2022). [Org]. Ellen MacArthur Foundation. <https://ellenmacarthurfoundation.org/>

Fundación ENT. (2016). *Metodología para la gestión ambiental de RCD en ciudades de América Latina*. https://ent.cat/wp-content/uploads/2016/02/lilibret-Bogota_baixa.pdf. <https://www.ategrus.org/noticias/presentada-la-metodologia-para-la-gestion-ambiental-de-rcd-en-ciudades-de-america-latina/>

- García Beltrán, M. (2017). *Estudio de durabilidad y de comportamiento mecánico en hormigones y materiales tratados con cemento, aplicando residuos industriales y áridos reciclados* [Dissertation/Thesis, Universidad de Córdoba, UCOPress.]. TDX. <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edstdx&AN=edstdx.10396.14891&lang=es&site=eds-live>
- Gobierno de la Ciudad de México. (s. f.). *Tarifas_Agua_Art_172_2022.pdf*. Recuperado 25 de enero de 2023, de https://www.sacmex.cdmx.gob.mx/storage/app/media/tarifas/Tarifas_Agua_Art_172_2021_Pweb.pdf
- Gobierno del Distrito Federal. (2021). *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*. Gaceta Oficial del Distrito Federal. https://paot.org.mx/centro/reglamentos/df/pdf/2021/RGTO_CONSTRUCCIONES_19_04_2021.pdf
- Hafez, H., Kurda, R., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mustafa, R., & Ali, B. (2020). A Critical Review on the Influence of Fine Recycled Aggregates on Technical Performance, Environmental Impact and Cost of Concrete. *Applied Sciences*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/app10031018>
- HOLCIM. (2022). *Desarrollo Sostenible*. Holcim Mexico. So the world builds better. <https://www.holcim.com.mx/desarrollo-sostenible>
- Home | Construrama. (s. f.). Recuperado 6 de julio de 2023, de https://www.construrama.com/?utm_source=DMMX_DIST_SEM&utm_medium=MIGHTY_HIVE_GOOGLE&utm_campaign=AON_BRAND_GENERAL&utm_content=CONSTRURAM_A_BRAND&utm_term=construrama&gclid=EAIaIQobChMIyfq84-P6_wIVOSnUAR1VfQaoEAAAYASAAEgIhofD_BwE
- IMCYC. (2006, julio). *Los aditivos para concreto en seis pasos*. Construcción y Tecnología en Concreto. <http://www.imcyc.com/revistact06/julio06/TECNOLOGIA.pdf>
- IMCYC. (2022a). El cemento. *INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO A.C.* <http://www.imcyc.com/cemento/>
- IMCYC. (2022b). *Laboratorio IMCYC - Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.* <http://imcyc.com/app/?services=laboratorio>
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 131, 721-740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>
- Laboratorios - UNAM. (2022). *Laboratorios*. UNAM | Facultad de Arquitectura. <https://arquitectura.unam.mx/laboratorios.html>
- Ley de Residuos Sólidos del DF 2019.pdf*. (s. f.).
- LMSE -UNAM. (2022a). *Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México*. http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/05/180515_Practica9_W_LMSE.pdf
- LMSE -UNAM. (2022b). *LMSE*. UNAM | Facultad de Arquitectura. <https://arquitectura.unam.mx/lmse.html>
- Martel Vargas, G. J., & Gutiérrez Palacios, C. (2008). *Caracterización de residuos de la construcción y*

demolición de edificaciones para su aprovechamiento (Facultad de Ingeniería. Posgrado 001-01177-M1-2009). TESIUNAM.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cato2029a&AN=tes.TES01000638506&lang=es&site=eds-live>

Martínez Daniel, I., & Muriá Vila, D. (2013). *Residuos de construcción y demolición (RCD) situación actual y correcta gestión para el proceso de reciclaje en la industria mexicana*. (Facultad de Arquitectura. Posgrado). TESIUNAM.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cato2029a&AN=tes.TES01000696879&lang=es&site=eds-live>

Martín-Morales, M. (2013). *El residuo de construcción y demolición (RCD) como árido en la elaboración de prefabricados no estructurales* [Dissertation/Thesis, Universidad de Granada.]. TDX.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edstdx&AN=edstdx.10803.634372&lang=es&site=eds-live>

McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things* (1st ed). North Point Press.

Montiel Miguel, J. L., & Cottier Caviedes, J. L. (2017). *Uso de agregados reciclados para la fabricación de adoquines que se puedan utilizar en la pavimentación de calles, avenidas y pasos peatonales*.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cato2029a&AN=tes.TES01000759889&lang=es&site=eds-live>

Muñoz Socha, M. M. (2016). *Evaluación financiera de pequeñas plantas móviles de reciclaje de residuos de construcción y demolición en México* [Programa de Posgrado de Ingeniería].
https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000752420

NMX-C-314-ONNCCE-2014.pdf. (s. f.).

ODS. (s. f.). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. *Desarrollo Sostenible*. Recuperado 25 de junio de 2023, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>

ODS. (2015). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>

ODS 9, M. (2015). Objetivo 9: Agua, industria, innovación e infraestructura | ONU-ODS. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>

ODS 11. (2015). Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles | ONU-ODS. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

ODS 12. (2015). Objetivo 12: Producción y consumo responsables | ONU-ODS. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>

ONNCCE. (2022). *ONNCCE*. <https://www.onncce.org.mx/es/>

ONU. (2022). *Conferencias | Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible | Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/conferences/environment>

Organización de las Naciones Unidas. (1987). *Nuestro futuro común*. Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo. <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm#I>

- Organización de las Naciones Unidas, M. J. (2015). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- PAOT. (2010). *Estudio de zonas impactadas por tiraderos clandestinos de residuos de la construcción en el Distrito Federal.pdf*. PAOT; EOT-02-2010. www.paot.org.mx
- RAE. (2022). <https://www.rae.es/>. Real Academia Española. <https://www.rae.es/inicio>
- Sáiz Martínez, P. (2015). *Utilización de arenas procedentes de Residuos de Construcción y Demolición, RCD, en la fabricación de morteros de albañilería* [Phd, E.T.S. de Edificación (UPM)]. <https://oa.upm.es/39585/>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). MacGraw-Hill/Interamericana.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *NOM-161-SEMARNAT-2011*. Diario Oficial de la Federación. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6633/1/nom-161-semarnat-2011.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente. (2019). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México*. Gobierno de la Ciudad de México. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/InventarioDeResiduosSolidosDeLaCiudadDeMexico_2019.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente. (2020). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México*. Gobierno de la Ciudad de México. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/IRS_2020_vf_anexos.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente. (2021). *NACDMX-007-RNAT-2019*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NACDMX_007_RNAT_2019.pdf
- SEDEMA. (2022). *Secretaría del Medio Ambiente*. Secretaría del Medio Ambiente. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx>
- Sistemas de Ingeniería y Control Ambiental, S.A. de C.V. (2011). *Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generada por las actividades de construcción en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CDO00933.pdf>
- Spinola Paniagua, L. (2015). *Desarrollo de una guía de manejo para el reciclaje, reusó y reutilización de residuos sólidos de la construcción y demolición en la Cd. De Pachuca, Hgo.* [Tesis de Maestría]. TESIUNAM. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000726029
- Streaming IINGEN (Director). (2021, octubre 15). *1er Encuentro Latinoamericano de Residuos de la Construcción y Demolición*. <https://www.youtube.com/watch?v=aCQNry7mMxQ>
- Urrutia Segura, M. I., & Ávalos Rendón, T. L. (2019). *Residuos de construcción y demolición mixtos modificados físicamente para su uso como materiales de sustitución parcial de cemento*

portland en nuevos cementos sustentables para la construcción. TESIUNAM.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cato2029a&AN=tes.TES01000787573&lang=es&site=eds-live>

Vefago, L. H. M. (2012). *El concepto de reciclabilidad aplicado a los materiales de construcción y a los edificios: Propuesta de índices para evaluar la reciclabilidad de los sistemas constructivos.* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)].
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=94746>

Vieira, D. R., Calmon, J. L., & Coelho, F. Z. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 124, 656-666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>

Glosario

Adoquín. Unidad prefabricada de concreto o de otros materiales, con forma prismática, cuyo diseño geométrico del área expuesta permite la colocación autotrabada de piezas en forma continua para formar pavimentos.

Aprovechamiento sustentable. La utilización de los recursos naturales en forma que se respete la integridad funcional y las capacidades de carga de los ecosistemas de los que forman parte dichos recursos, por periodos indefinidos.

Árido reciclado. Árido procedente de residuos de la construcción y demolición resultantes de un proceso de reciclaje.

Contaminación. La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

Contaminante. Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural;

Desarrollo Sustentable. El proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.

Impacto ambiental. Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza

Manejo integral. Las actividades de reducción en la fuente, separación, recolección, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, incluyendo los requisitos de manejo ambiental, su gestión administrativa y su forma de verificación por parte de la Secretaría del Medio Ambiente.

Material peligroso. Elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico, represente un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológicoinfecciosas.

Materiales reciclados. Aquellos materiales producto de los residuos de la construcción y demolición, que han sido transformados mediante un proceso de reciclaje, selección, molienda, cribado, almacenamiento y que por sus características pueden ser reincorporados en los ciclos económicos.

Minimización. El conjunto de medidas tendientes a evitar la generación de los residuos y aprovechar su valor tanto como sea posible, de aquellos cuya generación no sea posible evitar.

Plan de manejo. El Instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de

subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno.

Planta de Reciclaje de Residuos de la Construcción y de la Demolición (PR-RCD).

Instalación cuyo objetivo es transformar los residuos de la construcción, demolición y excavación en agregados reciclados y subproductos para reincorporarlos a un ciclo de vida, a fin de evitar que se desperdicien estos residuos potencialmente útiles, reducir el consumo de materiales naturales, así como el uso de energía

Reciclaje. Transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, sin generar perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos.

Recurso natural. El elemento natural susceptible de ser aprovechado en beneficio del hombre.

Residuo. Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó.

Residuo de la Construcción y Demolición (RCD). Sustancia u objeto que se considera residuo y que se genera durante el desarrollo de una actividad de construcción, de la realización de obras civiles, de demolición o de actividades conexas complementarias o análogas. Las tierras no se consideran residuo de la construcción cuando se destinan a reutilización en la propia obra o en otras.

Residuos peligrosos. Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y la norma NOM-052-SEMARNAT-1993

Residuos urbanos. Los generados en casa habitación, unidad habitacional o similares que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques, los provenientes de cualquier otra actividad que genere residuos sólidos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y áreas comunes, siempre que no estén considerados como residuos de manejo especial.

Reutilización. Cualquier operación por la cual un producto o sus componentes que no son residuos se vuelven a utilizar para el mismo propósito para el que fueron concebidos.

Uso peatonal. Es aquel destinado para la circulación de personas.

Uso tránsito ligero. Es aquel que tiene un número de vehículos acumulados equivalente a ejes sencillos de 8,2t, menor de 5x105 durante la edad de diseño del pavimento. No pudiendo circular camiones y vehículos pesados.

Valorización. El conjunto de acciones cuyo objetivo es mantener a los materiales que los constituyen en los ciclos económicos o comerciales, mediante su reutilización, remanufactura, rediseño, reprocesamiento, reciclaje, tratamiento, co-procesamiento y recuperación de materiales secundarios.

Anexos

Tabla 36

Normatividad Internacional vigente, obligatoria y pertinente en el Proyecto / Prototipo.

Norma	Organización	Descripción
Reglamento de Construcción del DF	Gobierno de la CDMX Federal y Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX (PAOT)	Las obras de construcción, instalación, modificación, ampliación, reparación y demolición, así como el uso de las edificaciones y los usos, destinos y reservas de los predios del territorio del Distrito Federal, deben sujetarse a las disposiciones de la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal y su Reglamento.
Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	Gobierno de la CDMX	La ley establece los presupuestos mínimos para la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	Gobierno de la CDMX	Máxima ley en el territorio de México en materia de gestión de residuos, esta ley abarca la gestión tanto de residuos no peligrosos sólidos urbanos como la gestión de los residuos peligrosos,
Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal	Gobierno de la CDMX	Tiene por objeto regular la gestión integral de los residuos sólidos considerados como no peligrosos, así como la prestación del servicio público de limpia.
NACDMX-007-RNAT-2019	Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA)	Norma ambiental, Clasificación y Especificaciones de Manejo para RCD
NOM-161-SEMARNAT-2011	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	Norma Oficial Mexicana, Criterios para Clasificar a los Residuos de Manejo Especial
Plan de manejo de Residuos de la Construcción y Demolición	Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC)	Tiene como uno de sus principales objetivos, el facilitar la construcción sustentable, minimizando la generación de Residuos de la Construcción y la Demolición (RCD) y maximizando su aprovechamiento, bajo el concepto de corresponsabilidad entre los tres órdenes de gobierno y los diferentes actores que participan en la cadena de valor de la industria de la construcción.
Protocolo de gestión de RCD en la UE, 2016.	European Commission	El Protocolo se enmarca en la Estrategia Construcción 2020, así como en la Comunicación para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción. También forma parte de un paquete sobre la economía circular más novedoso.
Metodología para la gestión ambiental de RCD en ciudades de América Latina, 2016.	Fundación ENT, Alcaldía Mayor de Bogotá, Agencia de Residuos de Catalunya, Gestora de Runes de la Construcción S.A.	Tiene como objetivo repetir la experiencia de Bogotá en otras grandes ciudades de América Latina, a través de un conjunto de 10 acciones.
NMX-C-314-ONNCCE-2014	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE)	Norma Mexicana “Industria de la Construcción – Mampostería- Adoquines para uso en Pavimentos – Especificaciones y Métodos de Ensayo”

NMX-C-036-ONNCCE-2013	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE)	Norma Mexicana “Industria de la Construcción – Mampostería – Resistencia a la Compresión de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones y Adoquines – Método de Ensayo”
NMX-C-037-ONNCCE-2013	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE)	Norma Mexicana “Industria de la construcción – Mampostería- Determinación de la Absorción Total y la Absorción Inicial de Agua en Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones - Métodos de Ensayo”.
NMX-C-111-ONNCCE	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE)	Norma Mexicana “Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo”
NMX-C-414-ONNCCE.	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE)	Norma Mexicana “Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo”
ASTM C109	American Society of Testing Materials (ASTM)	Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens



**Instituto Mexicano del
Cemento y del Concreto, A.C.**

Insurgentes Sur No. 1846 Col. Florida Del. Álvaro Obregón C.P. 01030, Ciudad de México Tels. (0155) 5322-5740 Fax (0155) 5322-5742 imcyc@mail.imcyc.com	Constitución No. 50 Col. Escandón Del. Miguel Hidalgo C.P. 11800, Ciudad de México Tels. (0155) 5276-7200 Fax (0155) 5276-7210 www.imcyc.com
--	---

INFORME DE PRUEBAS DE LABORATORIO

Nombre del cliente: **FACULTAD DE ARQUITECTURA UNAM**

Datos del cliente: **Arq. Mabel Bucio**
mabbel@gmail.com

Dirección: **CIUDAD UNIVERSITARIA
COYOACÁN, CIUDAD DE MÉXICO
C.P. 04510**

Orden de Trabajo N°: **329**

Informe Técnico N°: **073**

Fecha recepción: **2022-03-23**

Fecha ensaye: **2022-04-04**

Descripción de muestras: **Adoquin de material reciclado 20,0 x 20,0 x 6,0 cm (Proyecto de Tesis)**

Pruebas realizadas: **Ensayo de abrasión a 2 adoquines**

Resultados: **Ver hojas anexas**

Referencias: **NMX-C-314-ONNCCE-2014**

Condiciones Ambientales: **Temperatura - °C**
Humedad Relativa - %

Procedimientos Utilizados: **PO-GTLC0-044**

Laboratorio de Ensayo acreditado por ema, a.c. con acreditación No. C-053-039/11, vigente a partir de 2011-03-24

Realizó (Nombre y Cargo): Ernesto Ramírez Martínez Técnico(s) Laboratorio de Concreto	Revisó y autorizó (Nombre, Firma y Cargo): Ing. Mario Alberto Hernández Hernández Gerente Técnico	Fecha de emisión: 2022-04-04 Hoja N° 1 de 3
---	--	---



Instituto Mexicano del
Cemento y del Concreto, A.C.

Insurgentes Sur No. 1846 Col. Florida
Del. Álvaro Obregón
C.P. 01030, Ciudad de México
Tels. (0155) 5322-5740
Fax (0155) 5322-5742
imcyc@mail.imcyc.com

Constitución No. 50 Col. Escandón
Del. Miguel Hidalgo
C.P. 11800, Ciudad de México
Tels. (0155) 5276-7200
Fax (0155) 5276-7210
www.imcyc.com

PRUEBA DE ABRASIÓN EN ADOQUINES		
Orden de Trabajo No. 329	Informe Técnico No. 073	Hoja No. 3 de 3
Cliente: FACULTAD DE ARQUITECTURA UNAM		
Muestra No. 073	Abrasión de: Adoquín de material reciclado 20,0 x 20,0 x 6,0 cm (Proyecto de Tesis)	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p style="text-align: center;">Fotografías 1 y 2.- Muestras 073/01 y 02 sometidos al ensayo de Abrasión.</p> <div style="text-align: center;">  <p style="text-align: center;">Fotografía 3.- Muestras 073/01 y 02 después del ensayo de Abrasión y de aplicar la plastilina para determinar el coeficiente de pérdida volumétrica por abrasión.</p> </div>		
Observaciones EL MUESTREO Y PROCEDENCIA DE LOS ESPECÍMENES NO FUE RESPONSABILIDAD DEL LABORATORIO DEL IMCYC		
Referencias NMX-C-314-ONNCCE-2014		
Equipo LCO-011-15; LCO-016; LCO-028-XX; LCO-032-XX; LCO-051-02; LCO-092-01		
Realizó E.R.M.	Revisó: Ing. Mario A. Hernández H.	Fecha 2022-04-04