



**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Área Académica de Ingeniería y
Arquitectura**

Título del Trabajo:

“Evaluación del desempeño de concreto permeable y retención de agua en suelos modificados con residuos de construcción y demolición”

Nombre de la autora: Sonia Guadalupe Vite Rodríguez

Director: Dr. Luis Daimir López León

Codirectora: Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

**Fecha:
Enero 2025**



Mineral de la Reforma, Hgo., a 6 de enero de 2025

Número de control: ICBI-D/011/2025
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado a la Egresada de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Sonia Guadalupe Vite Rodríguez**, quien presenta el trabajo de titulación "**Evaluación del desempeño de concreto permeable y retención de agua en suelos modificados con residuos de construcción y demolición**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Secretario: Dr. Francisco Javier Olguín Coca

Vocal: Dr. Luis Daimir López León

Suplente: Dr. Iván Erick Castañeda Robles

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

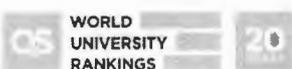
Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento. Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx,
vergarar@uaeh.edu.mx



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y hermanas, sin su apoyo no habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi mayor gratitud y admiración a mis padres Fabricio y Guadalupe, por todo el amor y apoyo incondicional para que yo pudiera concluir mi educación universitaria. Agradezco por su paciencia, tiempo y dedicación para mi formación como persona y profesionista.

A mis hermanas Celia y Alejandra por ser mis amigas y sustento en los momentos más complicados, por aconsejarme y representar un modelo en mi vida.

Karen, Samara, Alexis y Sandro, jamás olvidaré su amistad, apoyo y todos los momentos que vivimos.

A todas mis amistades, familiares y maestros que confiaron en mi capacidad.

Agradezco especialmente al Dr. Luis Daimir por su colaboración y apoyo incondicional que recibí durante mi carrera Universitaria, por ser un amigo y compartir sus conocimientos conmigo.

A la Dra. Liliana Guadalupe por toda la colaboración, compromiso y apoyo académico durante este trabajo.

Todo lo que he aprendido y el largo viaje que emprendí cuando elegí esta carrera, todo lo que soy ahora y la persona en la que quiero convertirme, todas las oportunidades y lecciones que recibí.

Gracias.

RESUMEN

Este trabajo de investigación se centra en la evaluación del desempeño de sistemas de concreto permeable y la retención de agua en suelos modificados con residuos de construcción y demolición (RCD), abordando la integración de prácticas sostenibles en la construcción urbana para gestionar la escorrentía pluvial y mitigar problemas como inundaciones y la sobrecarga de sistemas de drenaje.

El estudio se enfoca en dos líneas principales: la fabricación de concreto permeable utilizando RCD de origen pétreo y la modificación de suelos con RCD cerámico para mejorar la retención de agua. Se realizaron pruebas para evaluar la resistencia a la compresión y la permeabilidad, variando la dosificación de RCD. Los resultados mostraron que la inclusión de hasta un 30% de RCD generó una reducción de la resistencia a la compresión del 15%, mientras que la permeabilidad aumentó en un 25%, lo que favorece la infiltración de agua y la recarga de acuíferos.

En cuanto a los suelos modificados con RCD cerámico, se evaluaron la porosidad y la capacidad de absorción de agua. La adición de RCD cerámico incrementó la porosidad en un 10% y mejoró la retención de agua en un 15%, lo cual es beneficioso para aplicaciones que requieren un sustrato adecuado para la infiltración y el crecimiento de vegetación en entornos urbanos.

En conclusión, el uso de RCD en la fabricación de concreto permeable y la modificación de suelos representa una estrategia técnicamente viable, promoviendo la sostenibilidad mediante la reducción de materiales vírgenes y mejorando la eficiencia de los sistemas de drenaje urbano, consolidándose como una alternativa innovadora para el desarrollo de infraestructuras verdes.

Palabras clave: sostenibilidad en la construcción, gestión de escorrentía urbana, reciclaje de materiales de demolición, infraestructura ecológica, tecnologías de bajo impacto.

ABSTRACT

This research focuses on evaluating the performance of permeable concrete systems and water retention in soils modified with construction and demolition waste (CDW), addressing the integration of sustainable practices in urban construction to manage stormwater runoff and mitigate issues such as flooding and overloading of drainage systems.

The study focuses on two main lines: the production of permeable concrete using CDW of petrous origin and the modification of soils with ceramic CDW to improve water retention. Tests were conducted to evaluate compressive strength and permeability, varying the CDW dosage. The results showed that the inclusion of up to 30% CDW led to a 15% reduction in compressive strength, while permeability increased by 25%, enhancing water infiltration and groundwater recharge.

Regarding soils modified with ceramic CDW, porosity and water absorption capacity were assessed. The addition of ceramic CDW increased porosity by 10% and improved water retention by 15%, which is beneficial for applications requiring a suitable substrate for infiltration and vegetation growth in urban environments.

In conclusion, the use of CDW in the production of permeable concrete and soil modification represents a technically viable strategy, promoting sustainability by reducing virgin material consumption and improving the efficiency of urban drainage systems, establishing itself as an innovative alternative for the development of green infrastructure.

Keywords: Sustainability in construction, urban runoff management, demolition materials recycling, ecological infrastructure, low-impact development techniques.

ÍNDICE

Capítulo 1.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. ANTECEDENTES.....	5
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	6
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.4. OBJETIVO GENERAL.....	8
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.6. HIPÓTESIS.....	9
1.6.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	10
2.2 CONCRETO.....	11
2.2.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO.....	11
2.2.2 TIPOS DE CONCRETO.....	12
2.3 CEMENTO.....	14
TIPOS DE CEMENTO EN MÉXICO.....	15
2.4 AGUA.....	17
2.5 AGREGADOS.....	17
2.6 ADITIVOS.....	18
2.7 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).....	18
2.7.1 TIPOS DE RCD.....	18
2.7.2 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN MÉXICO.....	19
2.7.3 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN EL SUELO.....	20
2.7.4 CONCRETO PERMEABLE CON RCD.....	21
3 CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	24
3.1 RECOLECCIÓN DE RCD.....	24
3.2 PREPARACIÓN DEL RCD.....	24
3.3 SUELO CON RCD (CERÁMICO).....	27
3.4 CONCRETO PERMEABLE CON RCD.....	30
3.4.1 Diseño de mezcla:.....	30
3.4.2 Procedimiento de elaboración de especímenes de concreto permeable.....	31

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1 Pavimento Permeable.....	35
4.1.1 Resistencia a la compresión	35
4.1.2 Permeabilidad.....	36
4.2 Suelo con RCD cerámico.	38
4.2.1 Porosidad	38
4.2.2 Absorción	38
4.2.3 Relación entre porosidad y absorción	39
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXOS	50

Índice de tablas

Tabla 3.1 Diseño de mezcla	28
Tabla 3.2 Dosificación Concreto Permeable	28
Tabla 4.1. Porcentaje de porosidad y absorción del suelo con RCD cerámico.	34
Tabla 4.2. Resistencias a la compresión para un diseño de mezcla de concreto permeable $f'c = \text{Kg/cm}^2$.	36
Tabla 4.3 Permeabilidad de los distintos sistemas en estudio.	37

Índice de figuras

Figura 3.1 Banco de RCD utilizado.	22
Figura 3.2. Proceso de triuración de agregados.	23
Figura 3.3. Selección de agregados.	23
Figura 3.4. Limpieza de agregados.	24
Figura 3.5. Secado de agregados.	24
Figura 3.6. Prueba de absorción de agua.	27
Figura 4.1 Curva granulométrica para agregado fino.	35
Figura 4.2 Curva Granulométrica para Agregado Grueso.	35

Capítulo 1.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy, los alcances de la ingeniería son una de las razones más fuertes de la degradación del medio ambiente, ya que sus procedimientos son invasivos para la biosfera. El entorno ambiental se altera negativamente generando residuos y contaminación (Gordillo y Elizalde, 2018).

La contaminación producida por la construcción se resume en: Contaminación por ruido, contaminación atmosférica, desechos sólidos y líquidos, contaminación del agua, gases dañinos y polvo (Enshassi, 2014). Que, a su vez, dichos tipos de contaminación vienen acompañados de la explotación de recursos naturales tales como la extracción de materiales gruesos y finos para la creación de concretos y morteros, los cuales requieren altas cantidades de agua.

Ante los problemas actuales relacionados con el medio ambiente, es necesario promover la flexibilidad en la planeación de los espacios urbanos. Considerando que los procesos de regeneración de algunos recursos son sumamente tardíos y en otros casos nos enfrentamos a la escasez de recursos no renovables, por ejemplo; Existen suelos que poseen la capacidad de regeneración (Hierro, 2003), el agua se puede tratar por distintos medios y algunas especies de flora y fauna puedan reubicarse en espacios correspondientes a su propio ecosistema; la ingeniería de la construcción tiene un papel fundamental en abastecer y atender todas las necesidades de la población (Pérez, 1988), provocando desequilibrios ambientales fuertes que mientras avanza el tiempo; representan riesgos inevitables para los seres vivos. Dicho lo anterior, es imprescindible integrar técnicas innovadoras amigables con el medio ambiente; principalmente la incorporación de materiales reciclados en sustitución de materiales naturales.

El empleo de residuos de construcción y demolición (RCD) se perfila como una alternativa sostenible para la sustitución parcial de agregados naturales, contribuyendo significativamente a mitigar la explotación de minas y bancos de materiales. Estudios previos han evidenciado que incorporar RCD en proporciones del 20% puede reducir hasta 200 kg de materiales vírgenes por cada metro cúbico de concreto producido. Este enfoque no solo favorece la conservación de los recursos naturales, sino que también promueve prácticas constructivas más responsables (Pacheco y Ding, 2013; Tam y Tam, 2007). RCD es una terminología para describir y agrupar los residuos de construcción y demolición clasificados según la conformación del material: Áridos de concreto, áridos cerámicos y áridos de asfalto (Jurado y Ortiz, 2021). Los cuales son desechados en calles, terrenos (Espacios urbanos o rurales) y en casos extraordinarios en plantas de reciclaje, siendo un foco grande de contaminación del suelo y el agua.

El RCD representa una ventana de oportunidad en cuestiones de reciclaje e investigación, ya que sus características físicas, geométricas y térmicas son versátiles con relación a la procedencia de dichos residuos (Jurado y Ortiz, 2021).

Asimismo, la experimentación con RCD promueve el reciclaje de distintas formas. Especialmente en mobiliario urbano, arte, mobiliario sanitario, mobiliario doméstico, principalmente reciclaje y reutilización de agregados pétreos en distintas cantidades (provenientes de concretos y morteros) y agregados cerámicos (provenientes de materiales antes horneados), transformándose en áridos gruesos y áridos finos (Gómez, 2020).

La reutilización de los residuos de construcción y demolición podría sustituir materiales procedentes de la explotación de minas y bancos de materiales (Comúnmente elementos importantes para la producción de concretos y morteros) preservando la morfología original de áreas importantes para el transporte natural de agua. Siendo necesario dirigir a la población (en general) a buscar alternativas menos invasivas para obtener recursos.

Dentro de la misma situación (explotación de recursos para procedimientos constructivos). Un ejemplo claro es la escasez del agua en varias regiones de México, como resultado de la sobrepoblación y las exigencias que la sociedad genera diariamente.

Favorablemente el creciente desarrollo tecnológico en cuestión de tratamiento de agua y métodos sumamente sencillos para contrarrestar los efectos producidos por la escasez de recurso hídrico (plantas y diferentes tipos de tratamiento, captación de agua pluvial, etc.). Sin embargo, existen metodologías utilizadas por la ingeniería que afectan directamente al agua, ya sea contaminándola, explotándola o generando situaciones que provoquen el crecimiento de dicho problema, por ejemplo: Inundaciones, impedimento de la recarga de mantos acuíferos y el constante cambio, desvío o alteración de las corrientes principales provocando que no tengan un tránsito natural. Lo anterior en respuesta a la deficiente planeación de los espacios urbanos para evacuar el agua al subsuelo y logre el cumplimiento de su propio ciclo.

La disponibilidad de agua en México presenta una situación desigual y preocupante. De acuerdo con estadísticas de la CONAGUA (2021); actualmente las zonas del sureste de México cuentan con un 68% de agua renovable, mientras que en las regiones del norte, centro y noroeste solo cuentan con un 32% de recurso renovable. Del mismo modo las estadísticas futuristas de CONAGUA (2021) indican que para 2030 algunas regiones del país presentarán escasez absoluta con un grado de presión alto de fuentes renovables del agua (estadísticas proveídas por los Atlas anuales de CONAGUA antes del cambio de gobierno del 2018). Las estadísticas actuales señalan que el grado de presión de recurso hídrico en 2022 en centro y norte del país es de 56.2% (Conagua, 2020).

Algunos estudios recientes han abordado la vulnerabilidad hídrica en México, ofreciendo diagnósticos específicos sobre el estado crítico en que se encuentran diversas regiones del país. En particular, se destacan investigaciones que señalan la situación de la Ciudad de México, donde la sobreexplotación de los acuíferos y la creciente demanda de agua ponen en riesgo la sostenibilidad del suministro (Escolero et al., 2016). En el norte del país, las investigaciones indican que la disponibilidad de agua se ve limitada por la baja recarga de acuíferos y la alta variabilidad climática, mientras que en ciertas regiones, la contaminación de los mantos acuíferos por actividades industriales y agrícolas ha agravado la escasez (Pérez et al., 2008). Estos estudios presentan indicadores alarmantes sobre la disponibilidad del recurso, las tasas de extracción y los niveles de contaminación, sugiriendo que México podría estar encaminado hacia una crisis hídrica si no se toman medidas urgentes (Ávila, 2008).

Es importante priorizar que es impostergable realizar modificaciones en los espacios urbanos para permitir el paso libre del agua; ya sea la construcción y adaptación de obras de drenaje o la invención de infraestructura urbana funcional y capaz de infiltrar el agua evitando la contaminación pluvial y enviándola al subsuelo.

Existen alternativas para la administración sostenible de las escorrentías urbanas llamadas SUDS; dichas alternativas son conocidas como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible también llamados "Infraestructura Verde". Estos funcionan captando, reteniendo e infiltrando el agua, que, a su vez, trabajan en conjunto con otros sistemas de drenaje sostenible convencionales (obras de drenaje urbano) permitiendo la infiltración del agua de precipitación y evitando que se contamine rápidamente por un transporte tardío (Santos, 2018).

Los SUDS son una opción muy eficaz; principalmente porque existen varios tipos, según Melgarejo (2020) los SUDS se dividen en: Cubiertas vegetales, superficies permeables, jardines de lluvia, franjas filtrantes, pozos de infiltración, drenes filtrantes, cunetas verdes, depósitos de detención, estanques de retención, parques inundables, zanjas de infiltración, etc.

Algunos de estos sistemas se realizan bajo ciertos procesos constructivos convencionales que usan concreto o agregado natural, cuya funcionalidad depende de dichos materiales.

Actualmente, y a la luz de los avances recientes en investigación, se ha demostrado que se pueden implementar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) utilizando materiales reciclados. En este contexto, el uso de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en distintas proporciones se perfila como una alternativa viable y eficiente para sustituir materiales naturales. El objetivo de este proyecto es evaluar la factibilidad técnica del empleo de RCD, de origen pétreo y cerámico, en la fabricación de concreto y suelo para integrarlos en la construcción de SUDS.

1.1. ANTECEDENTES

En las últimas décadas, el crecimiento de las áreas urbanas ha generado un aumento en la demanda de materiales de construcción, lo que a su vez ha incrementado la producción de residuos de construcción y demolición (RCD). Estos residuos representan un desafío significativo para la gestión de desechos sólidos, especialmente en contextos donde los recursos para su manejo son limitados (Pacheco-Torgal y Ding, 2013). Además, la expansión de superficies impermeables, como carreteras, estacionamientos y edificaciones, ha exacerbado los problemas de escorrentía superficial y la reducción de la capacidad de infiltración de agua en el suelo, afectando negativamente el ciclo hidrológico y contribuyendo a la urbanización insostenible (Thomas et al., 2013).

El concreto permeable ha surgido como una solución viable para mitigar los efectos negativos de la impermeabilización del suelo en entornos urbanos. Este tipo de concreto permite la infiltración de agua a través de su estructura, lo que ayuda a reducir la escorrentía superficial, recargar acuíferos y minimizar el riesgo de inundaciones (Zhu y Sun, 2018). Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos relacionados con la durabilidad, resistencia mecánica y capacidad de retención de agua, aspectos que son fundamentales para su desempeño a largo plazo en aplicaciones prácticas (Zaetang et al., 2016).

La integración de RCD en la producción de concreto permeable es una estrategia prometedora para abordar simultáneamente los desafíos de gestión de residuos y mejorar la sostenibilidad en la construcción (Li y Zhuge, 2018). Diversos estudios han explorado el uso de agregados reciclados en la mezcla de concreto, con resultados que indican una reducción en la resistencia mecánica en comparación con el concreto convencional, pero con mejoras en la permeabilidad y, en algunos casos, en la retención de agua (Matos y Sousa-Coutinho, 2016; Shi y Li, 2020).

El RCD cerámico y el RCD de concreto son dos tipos de residuos que han demostrado potencial para ser utilizados en la fabricación de concreto permeable. El RCD cerámico, derivado de materiales como ladrillos y azulejos, posee características que pueden contribuir a la mejora de la retención de agua en suelos, favoreciendo el crecimiento de la vegetación en áreas urbanas (Etxeberria et al., 2007). Por otro lado, el RCD de concreto, compuesto principalmente por fragmentos de concreto endurecido, puede ser utilizado para desarrollar concretos permeables con propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones estructurales ligeras, como pavimentos peatonales y jardines de lluvia (Tam y Tam, 2007).

A pesar de los avances en la investigación sobre el uso de RCD en concreto, todavía existen brechas en el conocimiento relacionadas con la optimización de las mezclas, la evaluación de su comportamiento a largo plazo y el impacto ambiental de su uso en diferentes contextos. Este trabajo de tesis busca contribuir al cuerpo de conocimiento existente mediante la evaluación del desempeño del concreto permeable modificado con RCD, centrándose en su capacidad para mejorar la infiltración de agua en suelos y promover la sostenibilidad ambiental en entornos urbanos.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La utilización de residuos de construcción y demolición (RCD) aborda dos aspectos cruciales para la sostenibilidad ambiental. En primer lugar, contribuye a la reducción de la demanda de recursos naturales, lo que disminuye el consumo energético asociado a su extracción y la consiguiente reducción de emisiones atmosféricas y contaminación visual. En segundo lugar, facilita la disminución del volumen de residuos enviados a rellenos sanitarios y escombreras, lo que alivia su capacidad de almacenamiento y prolonga su vida útil.

En las plantas de tratamiento de RCD, se pueden procesar muchos residuos, incluyendo concretos, cerámicos, y mixtos, para reciclarlos para usarlos en la construcción. Para asegurar que estos materiales reciclados sean viables en aplicaciones constructivas, es fundamental analizar sus propiedades y características físicas, garantizando que cumplan con los estándares de rendimiento requeridos.

Este proyecto propone la reutilización de dos tipos de RCD con enfoques específicos: los residuos cerámicos se emplearán para mejorar la retención de agua en el sustrato, favoreciendo el crecimiento de flora, mientras que los residuos de concreto se integrarán en la fabricación de concreto permeable. La combinación de estos materiales permitirá aprovechar sus características individuales, promoviendo así prácticas de construcción más sostenibles y eficientes.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El fenómeno de la urbanización masiva ha llevado a un estado de "vulnerabilidad" global, especialmente en países densamente poblados como México. Actualmente, el 34.52% del territorio mexicano enfrenta sequías, según la más reciente publicación de la CONAGUA (2023). Paralelamente, el aumento de las inundaciones en el país agrega otra capa a esta vulnerabilidad.

La relación intrínseca entre sequías e inundaciones se vincula directamente con la disponibilidad de agua en México y en el mundo. La urbanización, si bien puede tener impactos sociales positivos a corto plazo, desencadena consecuencias negativas, especialmente inundaciones, al interrumpir el ciclo hidrológico en extensas zonas urbanas, también conocidas como "ciudades de concreto" (Duran, 2016).

A pesar de las ventajas del concreto, considerado un material insustituible en la construcción (Arana, 2016), su uso extensivo, especialmente el de altas resistencias en entornos urbanos, contribuye a las inundaciones urbanas al inhibir la infiltración del agua. La falta de una planificación integral en espacios urbanos agrava la situación, ya que la infraestructura de concreto y otros elementos debería trabajar de la mano con sistemas de captación y drenaje, lo cual suele implementarse de manera selectiva o en lugares de alta inversión económica.

El uso continuado del concreto ha generado un efecto "ocupacional e impermeabilizante" sobre extensas áreas urbanas, alterando significativamente el

equilibrio hídrico a lo largo del tiempo (Ortega, 2014). Este efecto se traduce en condiciones hidrológicas deterioradas en cuerpos de agua, disminución anual de las lluvias, aumento de la temperatura global, sequías pronunciadas y pronósticos alarmantes de eventos hidrometeorológicos en zonas urbanas y rurales (Sánchez et al., 2011), afectando de manera permanente a la sociedad.

La explotación de recursos naturales, además del agua, incluye la extracción constante de materiales pétreos para la producción de concreto y la construcción de proyectos de gran envergadura como carreteras y obras civiles, que demandan considerables volúmenes de relleno, como grava, arena y diversas rocas. La extracción de áridos tiene impactos significativos, clasificados como "significativos y no significativos", según un informe de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2000). Este documento destaca la maquinaria utilizada, los impactos ambientales y las medidas de mitigación, concluyendo con las consecuencias asociadas a la alteración del ciclo hidrológico.

Publicaciones de esta índole, aunque con más de una década de antigüedad, reflejan cómo a lo largo del tiempo, los diferentes gobiernos han tomado medidas para difundir, implementar y mitigar estrategias frente a la explotación de recursos naturales. Sin embargo, las instituciones gubernamentales responsables de la supervisión en obras civiles han ignorado estas advertencias debido a consideraciones económicas y sociales. La falta de acción ha perpetuado los impactos negativos en el entorno, evidenciando la necesidad urgente de replantear las políticas y prácticas en el ámbito de la construcción y la explotación de recursos naturales.

Actualmente en México únicamente existe la norma oficial NOM-083-SEMARNAT-2003 (Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.) Y la norma estatal NTEA-011-SeMAGEM-RS-2022 (Establece los requisitos para el manejo de los residuos de la construcción y demolición y su trazabilidad para el Estado de México). Así como la Ley General para Prevención y Gestión Integral de Residuos y su respectivo "Reglamento de la LGPGIR". Del mismo modo, desde el 7 de agosto de 2021, el Gobierno de México presentó un comunicado en el que se enuncia la implementación de plantas de tratamiento de RCD, describiendo los trabajos actuales en el Centro Integral de Reciclaje (CIREC-MH) y en el pasado 2023 la apertura de la Planta de Selección de Residuos Gustavo A. Madero.

Es crucial destacar que muchos de los reglamentos y normativas enfocadas en prácticas sostenibles no han sido incorporados o validados en los actuales reglamentos de construcción en México. Esto subraya la necesidad imperante de intervención por parte de organismos competentes para su revisión y modificación. Además, se requiere la implementación de tecnologías innovadoras que contribuyan a mejorar y mantener los procesos constructivos vigentes

Esta situación refleja la responsabilidad ineludible de instituciones educativas y gubernamentales para innovar, adquirir conocimientos y fomentar la aplicación de prácticas sostenibles. Esto abarca desde la reutilización de materiales hasta la implementación de plantas de tratamiento de agua y residuos, así como el diseño de obras de drenaje sostenibles en entornos urbanos y mezclas de construcción respetuosas con el medio ambiente. Además, se hace necesario investigar y actualizar datos relacionados con corrientes, cuencas y cuerpos de agua, fundamentales en el diseño de infraestructura.

Asimismo, es imperativo llevar a cabo estudios sobre la calidad del agua y explorar alternativas constructivas que se alineen con los procesos naturales. Esto implica la reducción de riesgos y la adopción de medidas esenciales para gestionar adecuadamente los recursos naturales. La colaboración entre entidades educativas, gubernamentales y la sociedad en general es esencial para enfrentar estos desafíos de manera integral y sostenible.

1.4. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la eficacia del sistema integral de concreto permeable-sustrato, incorporando diferentes tipos de residuos de construcción y demolición (RCD), como concreto y cerámicos, con el propósito de facilitar la infiltración de escorrentía en espacios urbanos.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la resistencia a la compresión del concreto permeable al sustituir parcialmente sus componentes por residuos de construcción y demolición, específicamente residuos de concreto.
- Medir la permeabilidad del concreto permeable desarrollado con residuos de concreto y comparar los resultados obtenidos con un concreto permeable convencional, sin la inclusión de RCD.
- Analizar la retención de agua en el suelo mediante la incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) de tipo cerámico y comparar estos resultados con un suelo no alterado.

Estos objetivos se diseñan para abordar la evaluación del sistema propuesto, considerando aspectos clave como la resistencia estructural, la capacidad de permeabilidad y la influencia en las propiedades del suelo, agregando diferentes tipos de RCD. Los resultados de estos objetivos proporcionarán información valiosa para el diseño y la implementación efectiva de sistemas de drenaje sostenible en entornos urbanos.

1.6. HIPÓTESIS

La integración de residuos de construcción y demolición (RCD) en sistemas de concreto permeable permitirá el desarrollo de un material sostenible que mantenga las propiedades mecánicas y funcionales requeridas, como la resistencia a la compresión y la permeabilidad, además de mejorar la retención de agua en el suelo, para favorecer el crecimiento de vegetación en infraestructuras urbanas.

1.6.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- ***Resistencia a la compresión:***

La sustitución parcial de componentes del concreto permeable por residuos de concreto no comprometerá significativamente su resistencia a la compresión, permitiendo su aplicación efectiva en infraestructuras urbanas.

- ***Permeabilidad del concreto:***

La inclusión de residuos de concreto en la mezcla del concreto permeable no afectará negativamente su permeabilidad en comparación con el concreto permeable convencional.

- ***Retención de agua en el Suelo:***

La incorporación de RCD cerámicos en el sustrato resultará en una retención de agua en el suelo que propicie condiciones adecuadas para el crecimiento de flora.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

En la búsqueda de soluciones sostenibles para la industria de la construcción, se propone un sistema integral que utiliza concreto permeable elaborado con residuos de construcción y demolición (RCD), así como suelos mejorados con RCD cerámico. Este enfoque no solo contribuye a la reducción de desechos, sino que también presenta ventajas técnicas significativas para la gestión de aguas pluviales y mejora la capacidad de absorción de agua en el suelo.

Los conceptos básicos que sustentan esta innovación se centran en la comprensión de las propiedades del concreto permeable, los tipos de RCD que se pueden utilizar, y los métodos de integración de RCD cerámico en suelos. Este apartado explora estos conceptos, proporcionando un fundamento sólido para la evaluación y desarrollo de tecnologías de construcción sostenibles.

El concreto permeable, también conocido como concreto poroso, es un material de construcción diseñado para permitir el paso del agua a través de su estructura, facilitando la infiltración de agua de lluvia y reduciendo el escurrimiento superficial. Este tipo de concreto se compone de cemento, agregados gruesos y una mínima cantidad de agregados finos, lo que crea una matriz con un nivel de porosidad generalmente entre el 15% y el 25%, considerado suficiente para permitir una alta permeabilidad y garantizar una adecuada infiltración de agua (Yang et al., 2024).

Los residuos de construcción y demolición representan una proporción significativa de los desechos sólidos generados a nivel mundial. Estos residuos, que incluyen fragmentos de concreto, ladrillos, cerámica, madera y metales, pueden ser reciclados y reutilizados en diversas aplicaciones de construcción (Oliveira et al., 2023). La incorporación de RCD en la elaboración de concreto permeable y en la mejora de suelos ofrece una vía efectiva para la gestión sostenible de estos materiales.

El suelo mejorado con RCD cerámico se refiere a la mezcla de suelo natural con fragmentos de residuos cerámicos triturados. Esta práctica ha sido empleada en varios estudios de caso, como en proyectos de estabilización de suelos y pavimentación en Europa y Asia, donde el uso de cerámica triturada de granulometría entre 2 mm y 10 mm ha mostrado mejoras significativas en las propiedades mecánicas y la permeabilidad del suelo (Bisengimana et al., 2022). Las proporciones utilizadas varían según la aplicación, pero típicamente oscilan entre un 10% y un 30% en peso del suelo, logrando un equilibrio entre la mejora de la estabilidad y la capacidad de drenaje del material.

2.2 CONCRETO

El concreto es de los materiales más utilizados en la construcción por sus propiedades mecánicas y versatilidad. Su composición básica incluye cemento, agua, agregados finos y gruesos, y en ocasiones, aditivos que mejoran sus características específicas (Mehta y Monteiro, 2014). En el contexto de un sistema integral que incorpora concreto permeable elaborado con residuos de construcción y demolición (RCD), es fundamental entender tanto las propiedades del concreto tradicional como las adaptaciones necesarias para aprovechar estos residuos de manera eficiente (Poon et al., 2004).

2.2.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO

Propiedades del concreto

Las propiedades del concreto se pueden clasificar en dos categorías principales: en estado fresco y en estado endurecido.

Estado fresco

1. **Trabajabilidad:** Facilidad con la que el concreto puede ser mezclado, transportado y colocado en moldes. Se evalúa mediante pruebas como el ensayo de asentamiento (slump test). La trabajabilidad depende de la relación a/c, la forma y textura de los agregados y el uso de aditivos plastificantes (Neville, 2011).
2. **Tiempo de fraguado:** Tiempo que tarda el concreto en pasar de un estado plástico a un estado rígido. Depende de la composición del cemento, la relación a/c y la temperatura ambiental. Un fraguado adecuado es esencial para garantizar una buena adherencia y resistencia (Kosmatka et al., 2011)

Estado endurecido

Resistencia a la compresión: La capacidad del concreto para soportar cargas de compresión. Es la propiedad más importante y se evalúa mediante ensayos estándar a los 28 días. La resistencia a la compresión está influenciada por la calidad y proporción de los componentes, así como por el proceso de curado (Neville, 2011).

1. **Durabilidad:** La capacidad del concreto para resistir la acción del clima, ataques químicos y abrasión durante su vida útil. Depende de la calidad de los materiales y la relación a/c. Un concreto de baja permeabilidad es más durable, ya que reduce la penetración de agentes agresivos (Mehta y Monteiro, 2014).

-
2. **Permeabilidad:** La capacidad del concreto para permitir el paso de agua y otros fluidos. Un concreto menos permeable es más duradero y resistente a los ataques químicos (Bentz et al., 1999).
 3. **Módulo de elasticidad:** La relación entre el esfuerzo y la deformación en el rango elástico del concreto. Influye en la deformación bajo cargas. El módulo de elasticidad depende de la rigidez de los agregados y la matriz de pasta de cemento (Neville, 2011).
 4. **Resistencia a la tracción:** La capacidad del concreto para resistir cargas de tracción. Es generalmente baja en comparación con la resistencia a la compresión y se mejora con el uso de refuerzos como barras de acero o fibras (Mindess et al., 2002).

Factores que influyen en las propiedades del concreto

1. **Proporciones de la mezcla:** Las proporciones relativas de cemento, agua, agregados y aditivos determinan las propiedades del concreto fresco y endurecido. Una mezcla bien proporcionada asegura una buena trabajabilidad y resistencia (ACI Committee 211, 1991).
2. **Tipo y calidad de materiales:** La calidad del cemento, agua y agregados, así como la eficacia de los aditivos, son cruciales. Materiales de alta calidad producen un concreto más resistente y duradero (Kosmatka et al., 2011).
3. **Condiciones de curado:** La temperatura y humedad durante el proceso de curado afectan la resistencia y durabilidad del concreto. Un curado adecuado asegura una hidratación completa del cemento, reduciendo la permeabilidad y mejorando la resistencia (Bentz et al., 1999).
4. **Métodos de colocación y compactación:** La forma en que se coloca y compacta el concreto afecta su densidad y uniformidad, influenciando directamente su resistencia y durabilidad. Una buena compactación elimina las bolsas de aire y asegura una mejor adhesión entre los componentes (Neville, 2011).

2.2.2 TIPOS DE CONCRETO

En la construcción moderna, existen diversas variantes de concreto, cada una diseñada para cumplir con requisitos específicos en términos de resistencia, durabilidad, trabajabilidad y funcionalidad. A continuación, se describen los tipos más comunes de concreto, destacando sus características y aplicaciones en el ámbito de la ingeniería civil.

2.2.2.1 Concreto convencional

El concreto convencional es el tipo de concreto más utilizado en la construcción. Se compone de cemento, agua, agregados finos y gruesos, y ocasionalmente, aditivos. Este concreto se valora por su capacidad de adaptarse a muchas aplicaciones, desde la construcción de viviendas hasta grandes infraestructuras como puentes y carreteras. Las propiedades del concreto convencional, como la resistencia a la compresión y la durabilidad, se han optimizado bien y se han controlado con el paso de los años la relación agua-cemento y la calidad de los agregados (Neville, 2011).

2.2.2.2 Concreto de alta resistencia

El concreto de alta resistencia es una variante que se formula para alcanzar resistencias a la compresión significativamente superiores a las del concreto convencional. Se caracteriza por una baja relación agua-cemento, el uso de aditivos superplastificantes, y agregados de alta calidad. Este tipo de concreto es ideal para aplicaciones en estructuras que requieren soportar grandes cargas o condiciones extremas, como rascacielos, puentes y plantas industriales. Con resistencias a la compresión que superan los 50 MPa, el concreto de alta resistencia es fundamental en la construcción moderna de alto rendimiento (ACI Committee 211, 1991).

2.2.2.3 Concreto de alta resistencia temprana

El concreto de alta resistencia temprana se diseñó para desarrollar resistencia rápida, generalmente en los primeros tres a siete días tras el colado. Este concreto es utilizado en proyectos donde el tiempo es un factor crítico, como en la construcción de prefabricados, pavimentos de carreteras o reparaciones de emergencia. La rápida ganancia de resistencia se logra mediante la optimización de la mezcla y el uso de cementos especiales, como el cemento Portland de alta resistencia temprana (CAR), y aditivos acelerantes de fraguado (Kosmatka et al., 2011).

2.2.2.4 Concreto permeable

El concreto permeable, conocido como concreto poroso, permite el paso del agua por su estructura, facilitando la infiltración de agua de lluvia y reduciendo el escurrimiento superficial. Este concreto se compone de cemento, agregados gruesos, y una mínima cantidad de agregados finos, lo que crea una matriz con suficiente porosidad para permitir la permeabilidad. Se usa en la construcción de pavimentos, estacionamientos y zonas peatonales, donde la gestión de aguas pluviales es importante. Además, es una solución clave en el desarrollo de infraestructuras urbanas sostenibles (Yang et al., 2024).

2.2.2.5 Concreto reforzado con fibras

El concreto reforzado con fibras es una mezcla de concreto convencional que incorpora fibras de acero, vidrio, polipropileno u otros materiales. Las fibras distribuidas uniformemente dentro del concreto mejoran significativamente sus propiedades de resistencia a la tracción, flexión y fisuración. Este concreto es útil

en aplicaciones que requieren resistencia adicional a cargas dinámicas, como pavimentos, túneles y revestimientos de túneles. Las fibras también pueden mejorar la durabilidad del concreto al reducir la permeabilidad y la propagación de grietas (Mindess et al., 2002).

2.2.2.6 Concreto autocompactante

El concreto autocompactante (SCC, por sus siglas en inglés) es un tipo de concreto que se compacta bajo su propio peso, sin necesidad de vibración mecánica. Esto se logra mediante el uso de aditivos superplastificantes y modificaciones en la mezcla que mejoran su fluidez y capacidad de llenado. El concreto autocompactante es ideal para aplicaciones en estructuras complejas o con alta densidad de refuerzo, donde la compactación tradicional sería difícil. Este concreto no solo mejora la calidad de las construcciones, sino que también reduce el tiempo y los costos de mano de obra asociados con el proceso de compactación (Mehta y Monteiro, 2014).

2.2.2.7 Concreto Ligero

El concreto ligero se caracteriza por su menor densidad en comparación con el concreto convencional, lograda mediante el uso de agregados ligeros como la piedra pómez, la arcilla expandida o cenizas volantes. Este tipo de concreto se utiliza en aplicaciones donde la reducción de peso es crucial, como en elementos prefabricados, paneles de fachada, y estructuras flotantes. A pesar de su menor densidad, el concreto ligero mantiene una resistencia suficiente para aplicaciones estructurales, y su uso puede contribuir a una mayor eficiencia energética en edificios debido a sus propiedades de aislamiento térmico (Neville, 2011).

2.2.2.8 Concreto reforzado con RCD

El concreto reforzado con residuos de construcción y demolición (RCD) es una innovación reciente que integra fragmentos reciclados de concreto, ladrillos y cerámica en la mezcla del concreto. Este tipo de concreto no solo contribuye a la sostenibilidad mediante la reducción de desechos, sino que también puede mantener propiedades mecánicas adecuadas para muchas aplicaciones estructurales. Su uso es relevante en proyectos que buscan certificaciones de construcción sostenible o desarrollados en contextos de economía circular (Oliveira et al., 2023).

2.3 CEMENTO

El cemento es el componente aglutinante del concreto, responsable de la unión de los otros materiales a través del proceso de hidratación. El cemento Portland es el tipo más comúnmente utilizado y está compuesto principalmente por compuestos como el silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico (C3A) y ferrito aluminato tetracálcico. Estos compuestos reaccionan con el agua para formar productos de hidratación que confieren al concreto su resistencia y durabilidad (Mehta y Monteiro, 2014).

1. Tipos de Cemento Portland (Neville, 2011):

-
- **Tipo I:** Uso general en construcciones donde no se requieren propiedades especiales.
 - **Tipo II:** Moderada resistencia a los sulfatos, usado en ambientes con exposición moderada a sulfatos.
 - **Tipo III:** Alta resistencia temprana, adecuado para construcciones rápidas.
 - **Tipo IV:** Bajo calor de hidratación, utilizado en grandes estructuras donde es crucial controlar el calor generado.
 - **Tipo V:** Alta resistencia a los sulfatos, apropiado para ambientes altamente sulfatados.

2. **Cementos mezclados** (Kosmatka et., 2011):

- **Cementos con escoria granulada de alto horno:** Mejoran la resistencia a los ataques químicos y la durabilidad.
- **Cementos con cenizas volantes:** Aumentan la trabajabilidad y reducen el calor de hidratación.
- **Cementos con humo de sílice:** Incrementan la resistencia y reducen la permeabilidad del concreto.

TIPOS DE CEMENTO EN MÉXICO

1. Cemento Portland compuesto (CPC)

El Cemento Portland Compuesto es uno de los más utilizados en México y se caracteriza por incluir materiales puzolánicos, escoria de alto horno o ambos, además del clinker de cemento Portland y yeso. Este cemento ofrece ventajas en durabilidad y sostenibilidad. Cita

- **CPC 30R:** Cemento Portland Compuesto con resistencia mínima a la compresión de 30 MPa a 28 días. Utilizado en construcciones que requieren una resistencia estándar.
- **CPC 40:** Cemento Portland Compuesto con resistencia mínima a la compresión de 40 MPa a 28 días. Adecuado para obras que requieren una resistencia mayor.

2. Cemento Portland ordinario (CPO)

El Cemento Portland Ordinario es un cemento tradicional sin adiciones de otros materiales. Este tipo de cemento se utiliza en aplicaciones generales de construcción donde no se requieren características especiales.

- **CPO 30R:** Cemento Portland Ordinario con resistencia mínima a la compresión de 30 MPa a 28 días.
- **CPO 40:** Cemento Portland Ordinario con resistencia mínima a la compresión de 40 MPa a 28 días.

3. Cemento Portland puzolánico (CPP)

El Cemento Portland Puzolánico contiene adiciones de materiales puzolánicos, que mejoran la resistencia a ciertos ataques químicos y reducen la permeabilidad del concreto, aumentando así su durabilidad.

- **CPP 30R:** Cemento Portland Puzolánico con resistencia mínima a la compresión de 30 MPa a 28 días.
- **CPP 40:** Cemento Portland Puzolánico con resistencia mínima a la compresión de 40 MPa a 28 días.

4. Cemento Portland con escoria (CPE)

El Cemento Portland con Escoria incluye escoria de alto horno en su composición, lo que mejora la durabilidad del concreto y reduce el impacto ambiental de la producción de cemento.

- **CPE 30R:** Cemento Portland con Escoria con resistencia mínima a la compresión de 30 MPa a 28 días.
- **CPE 40:** Cemento Portland con Escoria con resistencia mínima a la compresión de 40 MPa a 28 días.

5. Cemento Portland de alta resistencia temprana (CAR)

Este tipo de cemento es ideal para construcciones que requieren un rápido desarrollo de la resistencia, lo cual es crucial en condiciones de baja temperatura o para acelerar los tiempos de construcción.

- **CAR 30:** Cemento de Alta Resistencia Temprana con resistencia mínima a la compresión de 30 MPa en edades tempranas (3-7 días).

Normativa y Especificaciones

La Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE especifica los requisitos que deben cumplir estos tipos de cemento en composición química, propiedades físicas y mecánicas, y metodologías para los ensayos correspondientes. Algunos de los aspectos clave regulados por esta norma incluyen:

-
- **Composición química:** Contenido de óxidos como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO y SO_3 .
 - **Resistencia a la compresión:** Medida a 3, 7 y 28 días, dependiendo del tipo de cemento.
 - **Tiempo de fraguado:** Tiempos inicial y final de fraguado, que determinan la trabajabilidad y el tiempo de manipulación del concreto.
 - **Finura:** Medida mediante el área específica del cemento, que influye en la velocidad de hidratación y desarrollo de resistencia.
 - **Expansión:** Ensayos para asegurar la estabilidad volumétrica del cemento y prevenir la formación de fisuras.

Aplicaciones Comunes

- **CPC 30R y CPC 40:** Usados en la construcción de viviendas, edificios comerciales, puentes y carreteras.
- **CPO 30R y CPO 40:** Utilizados en proyectos donde se requiere un cemento sin adiciones especiales.
- **CPP 30R y CPP 40:** Empleados en estructuras expuestas a ambientes agresivos, como plantas de tratamiento de aguas residuales y estructuras marítimas.
- **CPE 30R y CPE 40:** Indicados para construcciones que requieren alta durabilidad y resistencia a sulfatos.
- **CAR 30:** Ideal para prefabricados y proyectos que necesitan una rápida desmoldabilidad y puesta en servicio.

2.4 AGUA

El agua es esencial tanto para la hidratación del cemento como para la trabajabilidad de la mezcla. La relación agua-cemento (a/c) es un factor determinante que influye en las propiedades del concreto:

1. **Relación agua-cemento baja:** Mejora la resistencia y durabilidad, pero puede dificultar la trabajabilidad. Típicamente, una relación a/c baja (alrededor de 0.4) produce concreto de alta resistencia (Neville, 2011).
2. **Relación agua-cemento alta:** Mejora la trabajabilidad, pero puede reducir la resistencia y durabilidad. Una relación a/c alta (mayor a 0.6) tiende a producir concreto más poroso y menos durable (Mehta y Monteiro, 2014).

2.5 AGREGADOS

Los agregados constituyen el mayor volumen del concreto y son esenciales para su estabilidad y resistencia. Se dividen en dos categorías:

-
1. **Agregados finos:** Arena natural o triturada con partículas que pasan por un tamiz de 4.75 mm. Contribuyen a la trabajabilidad y cohesión de la mezcla. La calidad y granulometría de los agregados finos afectan la resistencia y la textura del concreto (Neville, 2011).
 2. **Agregados gruesos:** Grava o piedra triturada con partículas retenidas en un tamiz de 4.75 mm. Proporcionan resistencia y volumen al concreto. Los agregados gruesos deben ser duros, limpios y tener una granulometría adecuada para asegurar un buen desempeño del concreto (Kosmatka et al., 2011).

2.6 ADITIVOS

Los aditivos son sustancias añadidas en pequeñas cantidades al concreto para modificar sus propiedades y adaptarlo a condiciones específicas. Algunos aditivos comunes incluyen:

1. **Plastificantes y superplastificantes:** Mejoran la trabajabilidad sin aumentar la cantidad de agua, permitiendo una mejor colocación y consolidación del concreto (ACI Committee 212, 2010).
2. **Acelerantes de fraguado:** Reducen el tiempo de fraguado y aceleran el desarrollo de resistencia, esenciales en condiciones de baja temperatura (Neville, 2011).
3. **Retardantes de fraguado:** Prolongan el tiempo de fraguado para condiciones de trabajo prolongadas o altas temperaturas, asegurando una adecuada colocación (Kosmatka et al., 2011).
4. **Incorporadores de aire:** Introducen burbujas de aire en la mezcla, mejorando la durabilidad frente a ciclos de congelación y descongelación, y reduciendo la segregación (Mindess et al., 2002)

2.7 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) representan un desafío significativo en términos de gestión y sostenibilidad en la industria de la construcción. Estos residuos, generados por actividades de construcción, renovación y demolición de edificaciones y obras civiles, comprenden una variedad de materiales que, si no se gestionan adecuadamente, pueden causar graves problemas ambientales. Este apartado desarrolla en detalle los tipos de RCD, su situación en México y su aplicación en suelos.

2.7.1 TIPOS DE RCD

Los RCD se pueden clasificar en varias categorías según su origen y composición. A continuación, se presentan los tipos más comunes:

1. **Concreto:** Incluye fragmentos de concreto provenientes de estructuras demolidas, pavimentos y elementos prefabricados. Este tipo de residuo es

voluminoso y pesado, y puede ser reciclado como agregado para nuevas mezclas de concreto (Frías et al., 2024)

2. **Ladrillos y bloques cerámicos:** Residuos de construcciones de mampostería. Estos materiales pueden ser triturados y reutilizados en la producción de nuevos ladrillos o como agregados en mezclas de concreto (Gyawali, 2020).
3. **Madera:** Proveniente de encofrados, estructuras temporales y elementos de carpintería. La madera puede ser reciclada o reutilizada para diversas aplicaciones en la construcción (Yazdani et al., 2017).
4. **Metales:** Incluyen acero, aluminio y otros metales usados en refuerzos y estructuras. Los metales son altamente reciclables y pueden fundirse para producir nuevos productos metálicos (Scorza et al., 2021).
5. **Vidrio:** Proveniente de ventanas, puertas y fachadas. El vidrio puede ser reciclado y utilizado en la fabricación de nuevos productos de vidrio o en la industria del cemento (Yazdani et al., 2017).
6. **Plásticos:** Incluyen tuberías, recubrimientos y otros componentes plásticos. Los plásticos pueden ser reciclados y transformados en nuevos productos plásticos (Gyawali, 2020).
7. **Yeso:** Proviene de tabiques y revestimientos. El yeso puede ser reciclado y reutilizado en la fabricación de paneles de yeso (Yazdani et al., 2017).
8. **Aislantes y otros materiales compuestos:** Incluyen espumas, lana mineral y otros materiales compuestos usados en aislamiento térmico y acústico. Estos materiales requieren tratamientos específicos para su reciclaje o disposición final (Gyawali, 2020).

2.7.2 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN MÉXICO

En México, la generación de RCD ha aumentado significativamente debido al crecimiento urbano y el desarrollo de infraestructura. La gestión de estos residuos está regulada por diversas normativas y políticas que buscan promover la reducción, reutilización y reciclaje de los RCD.

1. Regulación y Políticas:

- **NOM-161-SEMARNAT-2011:** Norma Oficial Mexicana que establece los criterios para la clasificación y gestión de los RCD, incluyendo su almacenamiento, recolección, transporte y disposición final (Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT, 2013)
- **Política nacional de gestión de residuos:** Incluye estrategias para la gestión integral de los RCD, promoviendo la economía circular y la sostenibilidad en la construcción (Bock, 2020).

2. Iniciativas y Proyectos:

- **Programas de reciclaje de RCD:** Varias ciudades en México han implementado programas de reciclaje para gestionar los RCD de manera más eficiente, reduciendo su impacto ambiental (Bock, 2020).
- **Investigación y desarrollo:** Instituciones académicas y centros de investigación trabajan en el desarrollo de nuevas tecnologías y métodos para el reciclaje y reutilización de RCD, enfocándose en su aplicación en nuevos materiales de construcción (Ayala, 2015).

3. Desafíos y Oportunidades:

- **Infraestructura insuficiente:** La falta de infraestructura adecuada para la gestión de RCD es un desafío importante. Se necesita inversión en plantas de reciclaje y sistemas de recolección eficientes (Bock, 2020).
- **Conciencia y educación:** Aumentar la conciencia y educación sobre la importancia de la gestión adecuada de RCD es crucial para fomentar prácticas sostenibles en la construcción (Ayala, 2015).
- **Innovación tecnológica:** El desarrollo de nuevas tecnologías y técnicas para la reutilización de RCD ofrece oportunidades para mejorar la sostenibilidad de la industria de la construcción (Ayala, 2015).

2.7.3 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN EL SUELO

El uso de RCD en el suelo presenta una solución sostenible para su gestión, aportando beneficios ambientales y económicos. A continuación, se describen las aplicaciones y consideraciones de los RCD en el suelo:

1. Aplicaciones en suelos:

- **Mejoramiento de suelos:** Los RCD, especialmente los provenientes de concreto y cerámicos, pueden ser triturados y utilizados como material de relleno y estabilización de suelos. Esto mejora las propiedades mecánicas del suelo, como su capacidad de soporte y resistencia al corte (Villaquirán et al., 2021).
- **Subbases y bases de pavimentos:** Los agregados reciclados de RCD pueden usarse en la construcción de subbases y bases para carreteras y pavimentos, proporcionando una alternativa económica y sostenible a los agregados naturales (Feng, 2024).
- **Material de relleno:** Los RCD pueden servir como material de relleno en la construcción de terraplenes y otras estructuras de ingeniería civil,

reduciendo la necesidad de extracción de materiales vírgenes (Yazdani et al., 2017).

2. Consideraciones Técnicas:

- **Propiedades físicas y mecánicas:** Es fundamental evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los RCD para asegurar su idoneidad en aplicaciones de suelo. Esto incluye pruebas de granulometría, densidad, absorción de agua y resistencia a la compresión (Gyawali, 2020).
- **Contaminación y seguridad:** Los RCD deben estar libres de contaminantes peligrosos que puedan afectar la salud humana y el medio ambiente. Se deben implementar medidas de control de calidad y seguridad para garantizar que los RCD sean seguros para su uso en suelos (Ayala, 2015).

3. Beneficios Ambientales:

- **Reducción de residuos en vertederos:** El uso de RCD en suelos reduce la cantidad de residuos que terminan en vertederos, mitigando su impacto ambiental (Bock, 2020).
- **Conservación de recursos naturales:** Al utilizar RCD en lugar de materiales vírgenes, se conservan los recursos naturales y se reduce la huella ecológica de la construcción (Ayala, 2015).
- **Reducción de emisiones de CO₂:** La producción y transporte de materiales de construcción vírgenes generan emisiones significativas de CO₂. El reciclaje y reutilización de RCD contribuyen a la reducción de estas emisiones (Villaquirán et al., 2021).

2.7.4 CONCRETO PERMEABLE CON RCD

El concreto permeable es un material innovador en la industria de la construcción, diseñado para permitir el paso del agua a través de su estructura, contribuyendo así a la gestión sostenible de aguas pluviales y a la reducción de la escorrentía superficial. La incorporación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en la producción de concreto permeable no solo mejora las propiedades sostenibles del material, sino que también promueve la economía circular y la reutilización de recursos.

2.7.4.1 COMPOSICIÓN DEL CONCRETO PERMEABLE CON RCD

El concreto permeable es de cemento, agregados gruesos y agua, con una proporción significativamente reducida o nula de agregados finos, lo que genera una

estructura porosa. Al incorporar RCD, los materiales reciclados sustituyen parcial o totalmente a los agregados naturales, logrando así una serie de beneficios ambientales y técnicos. Los componentes típicos incluyen:

1. **Cemento:** Actúa como el aglutinante que mantiene unidos los agregados. En algunos casos, se puede utilizar cemento Portland compuesto con adiciones de escoria de alto horno o puzolanas, mejorando la durabilidad y sostenibilidad del concreto (Villaquirán et al., 2021).
2. **Agregados gruesos:** Se utilizan agregados reciclados obtenidos de la trituración de residuos de concreto, ladrillos y bloques cerámicos. Estos agregados proporcionan la estructura porosa necesaria para la permeabilidad del concreto (Bock, 2020).
3. **Agua:** Es necesaria para la hidratación del cemento y la activación de las reacciones químicas que forman la matriz del concreto.
4. **Aditivos:** En algunos casos, se pueden agregar aditivos químicos para mejorar las propiedades de trabajabilidad, resistencia y durabilidad del concreto permeable con RCD (Gyawali, 2020).

2.7.4.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO PERMEABLE CON RCD

El uso de RCD en concreto permeable impacta diversas propiedades del material, tanto en términos de desempeño mecánico como de comportamiento hidráulico y durabilidad.

1. **Permeabilidad:** La principal característica del concreto permeable es su alta capacidad para permitir el paso del agua. Los agregados reciclados contribuyen a mantener una estructura porosa adecuada, facilitando la infiltración del agua y reduciendo la escorrentía superficial (Yazdani et al., 2017).
2. Aunque la resistencia a la compresión del concreto permeable es inferior a la convencional, el uso de agregados reciclados se ajusta mediante la selección y tratamiento adecuados de los RCD para alcanzar los niveles de resistencia requeridos para aplicaciones específicas (Feng, 2024).
3. **Durabilidad:** La durabilidad del concreto permeable con RCD depende de la calidad y tratamiento de los residuos utilizados. La presencia de materiales cerámicos y de concreto reciclado puede mejorar la resistencia del material a ciclos de congelación y deshielo, así como a ataques químicos (Hüsken et al., 2008).
4. **Eficiencia hidráulica:** La incorporación de RCD en el concreto permeable no compromete su eficiencia hidráulica, siempre y cuando se mantenga una adecuada gradación y distribución de los agregados para preservar la porosidad del material (Feng, 2024).

-
5. **Impacto ambiental:** La utilización de RCD en la producción de concreto permeable contribuye significativamente a la reducción de residuos en vertederos, la conservación de recursos naturales y la disminución de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción y transporte de agregados naturales ((Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT, 2013).

2.7.4.3 APLICACIONES DEL CONCRETO PERMEABLE CON RCD

El concreto permeable con RCD es particularmente adecuado para una variedad de aplicaciones urbanas y de infraestructura, donde la gestión del agua y la sostenibilidad son prioridades:

1. **Pavimentos permeables:** Utilizados en estacionamientos, caminos peatonales, carriles para bicicletas y áreas recreativas, donde la gestión eficiente del agua de lluvia es crucial (Feng, 2024).
2. **Sistemas de drenaje urbano:** El concreto permeable puede integrarse en sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) para reducir la escorrentía superficial y mejorar la recarga de acuíferos (Yazdani et al., 2017).
3. **Jardines y paisajismo:** Se emplea en proyectos de jardinería y paisajismo para crear superficies permeables que permiten la infiltración del agua y contribuyen a la salud del suelo y las plantas (Hüsken et al., 2008).
4. **Obras de infraestructura verde:** En la construcción de infraestructuras verdes como parques urbanos, techos verdes y paredes vivas, el concreto permeable con RCD ofrece una solución ecológica y eficiente para la gestión del agua ((Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT, 2013).

3 CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Las muestras y pruebas necesarias para el proyecto se generaron en las instalaciones del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, en los laboratorios designados para la Licenciatura en Ingeniería Civil, en el Área Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Según el diseño experimental para esta investigación, se realizaron 5 pruebas para averiguar las características mecánicas y granulométricas de los productos. Así mismo, esas pruebas se basan en los requerimientos y especificaciones de las normas mexicanas vigentes para la industria de la construcción.

Para satisfacer los objetivos descritos, se caracterizaron tres tipos de agregados (RCD cerámico, RCD pétreo, agregado grueso y suelo). Se realizó el proceso de recolección, trituración (RCD), selección, limpieza y secado; para después iniciar las pruebas necesarias para la ejecución del sistema propuesto en este trabajo.

3.1 RECOLECCIÓN DE RCD

La recolección de residuos de construcción y demolición (RCD) se llevó a cabo en diferentes fuentes. El agregado grueso se obtuvo de bancos de materiales ubicados en el municipio de Zempoala, Hidalgo (Figura 3.1). Los agregados pétreos y cerámicos provenientes de RCD fueron adquiridos durante un proceso de demolición en una construcción adyacente a la institución educativa (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo) (Figura 3.1). Finalmente, se recolectó una muestra de suelo cercana a una zona con tránsito vehicular y peatonal significativo en el Área Académica de Ingeniería y Arquitectura (Figura 3.1).



Figura 3.1 Banco de RCD utilizado.

3.2 PREPARACIÓN DEL RCD

La preparación de los RCD se realizó utilizando un mazo de acero, y los materiales procesados se almacenaron en recipientes con una capacidad de 19 litros. Este procedimiento se aplicó únicamente al RCD pétreo, ya que el cerámico se obtuvo previamente triturado.

1. Trituración

El proceso de trituración se realizó con el mazo de acero, seguido del almacenamiento en recipientes de 19 litros (Figura 3.2). Este método fue necesario solo para el RCD pétreo, dado que el cerámico se obtuvo ya triturado (Figura 3.2).



Figura 3.2. Proceso de trituración de agregados.

2. Selección

La selección consistió en escoger los agregados que cumplieran con las características especificadas en la normativa para materiales pétreos en la construcción, conforme a la Norma Mexicana N-CMT-4-06-001-19 (SCT, 2019). Durante el proceso de trituración, se descartaron agregados con adiciones indeseables (Figura 3.3), como residuos de acero de refuerzo, debido a la naturaleza del proyecto. Asimismo, se seleccionó el volumen adecuado de agregados pétreos, cerámicos, agregado grueso y suelo, en aproximación al peso y tamaño requeridos (Figura 3.3).



Figura 3.3. Selección de agregados.

3. Limpieza

La limpieza de los agregados se realizó mediante un enjuague con agua potable para eliminar impurezas y residuos de agregados finos que pudieran afectar la interacción y propiedades físico-mecánicas del material. Este procedimiento es fundamental, ya que la presencia de sedimentos puede alterar las propiedades de los agregados. El lavado se aplicó tanto al RCD pétreo como al agregado grueso (Figura 3.4).



Figura 3.4. Limpieza de agregados.

4. Secado

Una vez que los RCD (pétreo y cerámico) fueron limpiados, se sometieron a un proceso de secado en un horno (marca CONTROLS modelo 10- D1390) a una temperatura de °C durante horas. Las muestras de suelo y RCD cerámico se separaron y se secaron en otro espacio para su disposición final. El suelo se introdujo en el horno para eliminar cualquier humedad residual, cumpliendo así con los requisitos para las pruebas posteriores (Figura 3.5).



Figura 3.5. Secado de agregados.

3.3 SUELO CON RCD (CERÁMICO)

Existen sistemas de infraestructura verde diseñados para la gestión de aguas pluviales, que buscan retener y facilitar la infiltración del agua de escorrentía en el suelo, especialmente en áreas con baja precipitación. Estas estructuras suelen ser simples y se pueden adaptar a las condiciones del terreno, siguiendo las curvas de nivel para maximizar la eficiencia en la captura y almacenamiento del agua. Aunque no se mencionaron explícitamente en el capítulo 2, este tipo de infraestructura verde es relevante para la construcción de sistemas de drenaje sostenibles en entornos urbanos y rurales.

Actualmente, las zanjas de infiltración se utilizan como sistemas de drenaje en zonas urbanas, donde la escorrentía pluvial encuentra dificultades para infiltrarse en cuerpos de agua subterráneos o superficiales debido a la alta urbanización. En tales áreas, es poco viable implementar zanjas de infiltración con la configuración tradicional utilizada en zonas rurales.

Sin embargo, es posible adaptar el diseño tradicional de zanjas de infiltración utilizando RCD que puedan interactuar favorablemente con el suelo, creando productos como el que se describe en esta sección.

Se compararon dos subtipos de RCD cerámico, ambos provenientes de ladrillos recocidos. Se utilizaron dos rangos de tamaño de partícula: uno similar a la arena o polvo, y otro con gránulos perceptibles. Estos se clasificaron como agregado fino y grueso de acuerdo con la Norma Mexicana N-CMT-4-06-001-19.

Para cada subtipo de RCD, se prepararon cuatro vasos de precipitado con 300 g de muestra, etiquetados como 0%, 10%, 20% y 30% de RCD. La muestra etiquetada como 0% contenía solo suelo, mientras que las otras contenían una mezcla de suelo y agregado (fino o grueso) según el porcentaje indicado. Las muestras se mezclaron rápidamente para proceder con las pruebas iniciales.

Relación de vacíos o porosidad

El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre, compuesta por compuestos inorgánicos, nutrientes solubles, materia orgánica, agua y gases. Estas características varían según la geografía, y las diferencias en su color, olor, composición, y textura son resultado de procesos físicos y químicos (INEGI).

La interacción entre las fases gaseosa, líquida y sólida del suelo se conoce como relación de vacíos (UANL, 2005). Este cálculo es esencial para determinar la porosidad y, a su vez, para estimar el volumen de una muestra de suelo. El porcentaje de porosidad se calcula con la siguiente fórmula:

$$\%Ep = \left(100 - \left(\frac{Dap}{Dr} * 100 \right) \right) \quad \text{ec (1)}$$

Donde:

- D_{ap} (densidad aparente) = M_{ss}/V_{sc}
- M_{ss} : Masa del suelo seco.
- V_{sc} : Volumen del suelo sin compactar.
- D_r (densidad relativa) = M_{ss}/V_c
- M_{ss} : Masa del suelo seco.
- V_c : Volumen del suelo compactado.

Este procedimiento se repite para cada muestra antes de continuar con la siguiente prueba.

Absorción de agua

La prueba de absorción de agua mide la capacidad de retención de agua en el suelo y otros agregados, expresada como un porcentaje. Esto permite evaluar el desempeño de los poros del material al contacto con el agua.

Para realizar el ensayo, se utilizaron las siguientes herramientas:

- Balanza
- Ocho vasos de precipitado
- Espátula
- Muestras de material (0%, 10%, 20% y 30% de agregado grueso y fino)
- Agua

Procedimiento:

Las muestras de suelo (Figura 3.6), RCD cerámico fino y grueso se secaron en un horno (marca y modelo) a 100°C durante 24 horas para eliminar la humedad en los poros. Luego, se pesaron 100 g de suelo para cada porcentaje de adición de RCD. Después, se añadieron 50 ml de agua y se dejó absorber durante 24 horas. Tras el tiempo de absorción, se obtuvo el peso saturado y se calculó el porcentaje de absorción usando la ecuación 2:

$$\text{Porcentaje de Absorción} = \frac{W_{ss} - W_s}{W_s} \times 100 \quad \text{ec (2)}$$

Donde:

- W_{ss} : Peso de la muestra saturada.
- W_s : Peso de la muestra seca.



Figura 3.6. Prueba de absorción de agua.

Granulometría

La granulometría es una técnica esencial en el muestreo de materiales de construcción, cuyo objetivo es analizar la distribución de tamaños de partículas en un conjunto de materiales. Esta prueba es fundamental en la elaboración de diferentes tipos de concreto, rellenos, e infraestructura vial, ya que determina la adecuación del material para su uso en aplicaciones específicas.

Conforme a la norma mexicana N-CMT-4-06-001-19 del manual "Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales," las pruebas de granulometría se realizaron siguiendo los procedimientos especificados a continuación:

1. En este estudio, se analizaron tres tipos de agregados. Para el producto destinado a zanjas de infiltración, se utilizaron mallas para agregado fino con aperturas de $\frac{3}{4}$, 4, 8, 16, 30, 50 y 100 in; mientras que para el agregado grueso se seleccionaron mallas con tamaños de 2, 1 1/2, 1, 3/4, 1/2, 3/8, 4, 8 y 16 in.
2. Las mallas se ordenaron de mayor a menor tamaño, colocando una charola de fondo bajo la malla más fina. Se vertieron 300 g de muestra en la superficie del sistema de mallas.
3. Cribado: Una vez que la muestra fue colocada en el sistema de mallas, se agitó el conjunto para permitir que cada partícula se clasificara según su tamaño.
4. Tras el cribado, las fracciones retenidas en cada malla se pesaron por separado, registrando el peso acumulado hasta obtener la totalidad de la muestra por tamaño de partícula.

Los resultados se registraron en una tabla que incluyó los pesos retenidos, los porcentajes retenidos y acumulados, y el porcentaje de material pasante. Este procedimiento permitió trazar la curva granulométrica, que es fundamental para determinar la clase de suelo y su idoneidad para distintas aplicaciones.

3.4 CONCRETO PERMEABLE CON RCD

Para esta investigación, se siguieron las directrices de la norma ACI 522 R06 (ACI, 2006), que especifica los requerimientos de calidad, el procedimiento y la información técnica necesaria para la producción de concreto permeable. A diferencia del concreto convencional, en el concreto permeable sólo se utilizó agregado grueso, cemento portland y agua, siguiendo las especificaciones de la norma mencionada.

3.4.1 Diseño de mezcla:

El planteamiento de la dosificación para los especímenes de concreto permeable, está estrechamente relacionada con parámetros relacionados a la consistencia del concreto permeable, siendo una mezcla aparentemente húmeda, cuyo revenimiento usualmente es igual a cero, debido a su composición heterogénea.

Las proporciones para la mezcla de concreto para este trabajo se establecieron con base en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Diseño de Mezcla (Kia, et al. 2019)	
	Rango informado
Cemento	150 – 700 kg/m ³
Árido grueso	1100 – 2800 kg/m ³
Árido fino	0-100 kg/m ³
Relación agua/ cemento	0.2 – 0.5
Relación árido/ cemento	2 - 12
Relación árido grueso/ árido fino	0 – 0.07

De acuerdo con la bibliografía consultada, considerando un diseño se mezcla de 100kg/cm² se obtuvo la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Dosificación Concreto Permeable para 1 m ³ A/C 3.5				
Sistema	Cemento (Kg)	Agregado Grueso (Kg)	RCD (Kg)	Agua (Kg)
0%	425	1900	0	191.25
10%	425	1881	19	191.25
20%	425	1862	38	191.25
30%	425	1843	57	191.25

3.4.2 Procedimiento de elaboración de especímenes de concreto permeable

El tamaño de partícula del agregado grueso para el concreto permeable se seleccionó en un rango entre la malla #1/2 pulgadas y #4 pulgadas, buscando minimizar los espacios vacíos entre partículas sin comprometer la permeabilidad. Se utilizaron moldes cilíndricos de acero al carbono de 10 cm x 20 cm. Antes de realizar la mezcla, los moldes se cubrieron con una capa delgada de desmoldante para facilitar la extracción de los especímenes.

El cemento y el agregado grueso se pesaron por separado en una báscula previamente tarada. Luego, se mezclaron en una charola hasta obtener una distribución homogénea, añadiendo agua en pequeñas cantidades.

Cada cilindro se llenó en tres capas, compactando cada capa con 25 golpes de una varilla delgada y 15 golpes con un mazo de goma en los costados del molde. Tras el fraguado, los especímenes se desmoldaron y se curaron en agua durante 28 días.

3.5 Prueba de resistencia a la compresión

La prueba de resistencia a la compresión es una de las evaluaciones más importantes en la caracterización del concreto, ya que mide la capacidad del material para soportar cargas que tienden a reducir su tamaño. Esta prueba es fundamental para garantizar la calidad y seguridad de las estructuras de concreto, ya que proporciona información crucial sobre la resistencia mecánica del material, que es vital para el diseño estructural. La resistencia a la compresión se determina aplicando una carga axial sobre especímenes de concreto cilíndricos o cúbicos hasta que fallan. Según la norma ASTM C39/C39M (ASTM, 2021) y la norma ISO 1920-4:2005 (ISO, 2005), este ensayo es esencial para evaluar si el concreto cumple con las especificaciones técnicas requeridas para su uso en la construcción (Neville y Brooks, 2010).

Procedimiento para la prueba de resistencia a la compresión

1. Preparación de los especímenes

Fabricación y Curado: Los especímenes de concreto se moldean en cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de acuerdo con la norma ASTM C192/C192M (ASTM, 2019). Alternativamente, pueden utilizarse especímenes cúbicos de 15 cm por lado, conforme a la norma ISO 1920-4:2005. Los especímenes se dejan curar en condiciones estándar durante 28 días, sumergidos en agua a una temperatura de 20 ± 2 °C, asegurando que el proceso de hidratación del cemento sea completo.

Marcado y Medición: Antes del ensayo, se marcan los especímenes para asegurar una alineación correcta durante la prueba. Se miden el diámetro y la altura de cada cilindro, o los lados del cubo, con una precisión de 0.2 mm, registrando los valores en la hoja de datos.

2. Montaje del espécimen en la máquina de compresión

Alineación: Los especímenes se colocan en la máquina de compresión sobre la base inferior, asegurando que estén centrados en la placa de carga. En el caso de especímenes cilíndricos, se utiliza una placa de distribución de carga para asegurar una aplicación uniforme de la misma. La alineación correcta es crucial para evitar fallos prematuros o resultados inexactos.

Velocidad de Carga: Se aplica una carga axial a una velocidad de 2.5 Kg/cm²/s, como lo estipula la norma ASTM C39/C39M. Esta velocidad se mantiene constante hasta el fallo del espécimen, asegurando que el ensayo se realice bajo condiciones controladas y repetibles.

3. Ejecución del ensayo

Aplicación de la Carga: La máquina de compresión aplica una carga axial creciente hasta que el espécimen falla. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima soportada por el espécimen entre el área de la sección transversal del mismo. Este valor se registra en Kg/cm².

Registro de Resultados: Se observa y registra el tipo de fallo del espécimen (fractura cónica, corte, etc.), así como la carga máxima alcanzada. Este dato es crucial para analizar la calidad del concreto y verificar si cumple con los requisitos del proyecto.

4. Análisis de resultados

Cálculo de la Resistencia a la Compresión: La resistencia a la compresión de cada espécimen se calcula usando la fórmula:

Donde:

$$f' = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{ec (3)}$$

- f' es la resistencia a la compresión
- P es la carga máxima aplicada
- A es el área de la sección transversal del espécimen

Promedio y dispersión: Se calcula el valor promedio de la resistencia a la compresión para los especímenes ensayados para evaluar la consistencia del concreto.

3.6 Prueba de permeabilidad

La prueba de permeabilidad es esencial para evaluar la capacidad de un material, como el concreto poroso, para permitir el paso de fluidos a través de su estructura. En concreto permeable, esta propiedad es fundamental para aplicaciones donde la infiltración de agua es prioritaria, como en pavimentos urbanos sostenibles. La capacidad de un material para filtrar agua depende de sus características físico-mecánicas, como la porosidad y la distribución del tamaño de los poros, que a su vez afectan la velocidad y volumen de flujo de agua que puede atravesarlo sin comprometer su integridad estructural (Kevern et al., 2009).

Procedimiento de la prueba de permeabilidad por percolación

El ensayo de permeabilidad por percolación mide la capacidad de filtración en especímenes de concreto poroso, evaluando cómo las características físico-mecánicas del concreto afectan su rendimiento en aplicaciones prácticas. Este ensayo se lleva a cabo utilizando un permeámetro de carga constante, un dispositivo diseñado para mantener una velocidad de flujo constante a través del espécimen, permitiendo medir el tiempo de infiltración del agua sin alterar las propiedades ni la estructura interna del concreto.

Para esta prueba, se fabricaron cuatro cilindros de 15 x 7.5 cm siguiendo el diseño de mezcla. Los especímenes incluyeron diferentes porcentajes de adición de residuos de construcción y demolición (RCD): 0%, 10%, 20%, y 30%. Estos cilindros se sometieron al mismo proceso de curado que los utilizados en las pruebas de resistencia a la compresión, garantizando la homogeneidad en las condiciones de los especímenes.

Preparación del ensayo

1. Colocación del espécimen en el permeámetro: Cada muestra se introdujo individualmente en el interior del permeámetro de carga constante. Se ajustaron las distancias entre el cilindro y el tubo de nivel (H_1) para asegurarse de que el espécimen estuviera colocado en una superficie plana y estable.
2. Instalación del fluido: El tubo que contiene la muestra (H_2) se posicionó directamente debajo de la fuente de agua seleccionada para el ensayo. Se inició el flujo de agua hacia el tubo (H_2), y simultáneamente, se selló el orificio superior del tubo de nivel (H_2) para crear un efecto de vacío, asegurando que el agua ingresara uniformemente en el cilindro.
3. Inicio del ensayo: Una vez que el dispositivo se saturó hasta la altura del orificio de H_2 , se preparó el cronómetro. Se retiró la cubierta de H_1 al mismo tiempo que se inició la medición del tiempo necesario para que el agua se infiltre completamente a través del espécimen.

Desarrollo del ensayo

El funcionamiento del permeámetro de carga constante, en combinación con el cilindro y el efecto de vacío creado en H_1 , permitió que el agua fluyera uniformemente a través del concreto poroso. El fluido alojado en H_1 fue expulsado cuando tuvo contacto con la atmósfera, mientras que el fluido en H_2 se infiltró a través del espécimen hasta que el flujo se detuvo.

Repetición y consistencia de las medidas

Para evitar discrepancias y asegurar la fiabilidad de los resultados, se realizaron tres lecturas por cada espécimen. Estas mediciones permitieron observar los intervalos de tiempo entre cada lectura, proporcionando datos consistentes para el análisis y comparación de la permeabilidad de los especímenes con diferentes porcentajes de RCD.

Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad se obtuvo por medio de la siguiente fórmula:

$$K = \frac{A_1 L}{A_2 T} \log \log \frac{H_2}{H_1} \quad \text{ec (4)}$$

Donde:

- K es el coeficiente de permeabilidad
- A_1 es el área de la muestra
- L es la longitud de la muestra
- A_2 es el área de la sección transversal
- T es el tiempo de percolación
- H_2 y H_1 son las alturas de agua inicial y final.

El cálculo anterior es realizado para las cuatro muestras.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Pavimento Permeable

4.1.1 Resistencia a la compresión

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de los sistemas de concreto permeable, presentados en la Tabla 4.1, muestran una tendencia clara a la disminución de la resistencia conforme aumenta el porcentaje de sustitución de agregados naturales por residuos de construcción y demolición (RCD) de origen pétreo. En este estudio, se seleccionó RCD proveniente de concreto demolido, que fue utilizado como sustituto parcial del agregado grueso en las mezclas. El sistema con 0% de RCD, que actúa como el control, alcanza una resistencia promedio de 106.91 Kg/cm², mientras que el sistema con 30% de RCD muestra una disminución significativa con una resistencia promedio de 55.92 Kg/cm².

Tabla 4.1. Resistencias a la compresión para un diseño de mezcla de concreto permeable $f'c = \text{Kg/cm}^2$ a los 28 días.				
Sistema de concreto permeable con RCD pétreo	Resistencia a la compresión ($\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$)			
0%	107.45	105.8	108.55	106.91
10%	87.5	88.01	86.36	85.43
20%	81.34	80.77	80.96	79.65
30%	56.34	55.02	55.10	57.23

El sistema con 0% de RCD, que actúa como control, alcanza una resistencia promedio de 106.91 Kg/cm². Este valor es superior al rango mínimo recomendado de 80-100 Kg/cm² para concretos permeables, según la normativa ACI 522R-06 y autores como Kia et al. (2019), quienes establecen que un concreto permeable debe mantener una resistencia adecuada para soportar cargas en aplicaciones ligeras como pavimentos peatonales o estacionamientos.

Por otro lado, el sistema con 30% de RCD muestra una disminución significativa, alcanzando una resistencia promedio de 55.92 Kg/cm², lo que representa un 47.7% menos que el sistema de control. Este valor queda por debajo del rango esperado, indicando que el aumento en la proporción de RCD compromete su capacidad mecánica para cumplir con las aplicaciones estructurales ligeras. Los sistemas con 10% y 20% de RCD, con resistencias promedio de 85.43 Kg/cm² y 79.65 Kg/cm² respectivamente, aún se encuentran dentro del rango mínimo recomendado,

aunque presentan disminuciones del 20.1% y 25.5% en comparación con el sistema de control.

Estos resultados sugieren que, aunque el uso de RCD puede ser viable en proporciones moderadas, su incremento más allá del 20% podría limitar su aplicación a contextos no estructurales o donde la resistencia mecánica no sea el factor principal.

Esta reducción en la resistencia se debe principalmente a la naturaleza del RCD, que generalmente presenta una menor adherencia entre las partículas debido a la posible presencia de cemento residual y a su mayor porosidad en comparación con los agregados naturales (Khalaf y DeVenny, 2004). Los resultados, obtenidos tras 28 días de curado y considerando los valores promedio de resistencia a la compresión, muestran que el descenso en la resistencia es especialmente pronunciado a partir del 20% de sustitución de agregados naturales por RCD. Esto indica que, aunque el uso de RCD es viable en porcentajes más bajos, una mayor proporción de sustitución influye directamente en la integridad estructural del concreto permeable.

La incorporación de RCD en la mezcla de concreto permeable muestra un impacto adverso en la resistencia a la compresión (Tabla 4.2). Según la normativa ACI 522R-06 y autores como Kia et al. (2019), los rangos aceptables para concreto permeable se sitúan entre 80 y 100 Kg/cm², dependiendo de la aplicación específica. En este caso, los resultados obtenidos se encuentran dentro de este rango para los sistemas con 0%, 10% y 20% de RCD, lo que los hace viables para aplicaciones donde la resistencia no es el principal requerimiento, como pavimentos permeables y superficies de bajo tránsito. Sin embargo, la disminución observada en la resistencia al alcanzar el 30% de sustitución, con valores promedio de 55.92 Kg/cm², podría limitar su uso en aplicaciones con mayores demandas estructurales. Esta disminución también podría atribuirse a la variabilidad en la calidad del RCD utilizado, lo que resalta la necesidad de un control de calidad riguroso en la selección y procesamiento de estos materiales reciclados (Poon, Shui, y Lam, 2004).

4.1.2 Permeabilidad

En cuanto a los resultados de la prueba de permeabilidad, presentados en la Tabla 4.3, se observa un comportamiento inverso al de la resistencia a la compresión. El coeficiente de permeabilidad (K) aumenta con el incremento en el porcentaje de RCD, siendo más notorio a partir del 20%, donde se registra un coeficiente de 9.96×10^{-4} cm/s para el sistema con 20% de RCD y 1.2×10^{-3} cm/s para el sistema con 30% de RCD. Según Kevern, Schaefer y Wang (2009), los valores típicos de K para concreto permeable oscilan entre 2.7×10^{-4} cm/s y 3.2×10^{-3} cm/s, dependiendo del agregado y la proporción agua-cemento. Estos resultados indican que el concreto permeable con mayor contenido de RCD se encuentra dentro de los rangos aceptables para aplicaciones que priorizan la capacidad de infiltración, lo

que lo hace idóneo para su uso en sistemas de drenaje sostenible o pavimentos permeables.

El aumento en la permeabilidad con el incremento de RCD puede atribuirse a la mayor porosidad y a la distribución de tamaño de poros más amplia en el concreto que contiene RCD. Esto es favorable para aplicaciones donde la rápida infiltración de agua es esencial, como en pavimentos urbanos sostenibles, donde la gestión del agua pluvial es una prioridad. Sin embargo, es crucial balancear esta ventaja con la disminución en la resistencia a la compresión, especialmente en proyectos donde se requieren criterios de desempeño más estrictos (Kevern et al., 2009).

El uso de RCD pétreo en una dosificación de hasta el 20% puede justificarse en aplicaciones donde la permeabilidad del concreto es un factor crucial y las exigencias de resistencia a la compresión no son tan estrictas. Según la normativa ACI 522R-06 y los estudios de Poon et al. (2004), un concreto permeable adecuado debe presentar un coeficiente de permeabilidad (K) entre 2.7×10^{-4} cm/s y 3.2×10^{-3} cm/s, y una resistencia a la compresión mínima de 80 Kg/cm² para aplicaciones de pavimentos ligeros. En este trabajo, a un nivel de sustitución del 20%, se observa un coeficiente de permeabilidad de 9.96×10^{-4} cm/s, dentro del rango recomendado, mientras que la resistencia a la compresión promedio es de 79.65 Kg/cm², apenas por debajo del límite sugerido. Este equilibrio razonable entre permeabilidad y resistencia permite su uso en pavimentos permeables que requieren una alta capacidad de infiltración de agua sin comprometer significativamente la integridad estructural del material. Además, la reutilización de RCD contribuye a la sostenibilidad al reducir la demanda de recursos naturales y minimizar los desechos de construcción (Poon et al., 2004).

La Tabla 4.3. muestra los resultados obtenidos de los promedios de los coeficientes de permeabilidad (K) de los concretos permeables en estudio (3 especímenes de cada sistema).

Tabla 4.2 Permeabilidad de los distintos sistemas en estudio.		
Sistemas de concreto permeable con RCD pétreo	Tiempo promedio (s)	K promedio
0%	26.89	7.39×10^{-4}
10%	26.63	7.34×10^{-4}
20%	19.63	9.96×10^{-4}
30%	16.29	1.20×10^{-3}

4.2 Suelo con RCD cerámico.

Porosidad y Absorción de Agregados en Suelo con RCD Cerámico

La relación entre la porosidad y la absorción de un agregado es un aspecto fundamental para entender su comportamiento en aplicaciones geotécnicas. En este estudio, se investigó cómo la incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) cerámico, en diferentes proporciones, afecta estas propiedades en suelos.

4.2.1 Porosidad

La porosidad de los agregados es un indicador clave de la cantidad de espacios vacíos que pueden almacenar agua. Los resultados mostraron que la porosidad del agregado fino aumentó de 24% a 28% al incorporar hasta un 10% de RCD cerámico, lo que indica una mayor capacidad para retener agua en los poros. Sin embargo, con una mayor adición de RCD cerámico (20% y 30%), la porosidad disminuyó a 18% y 22%, respectivamente. Este comportamiento sugiere que, a partir de un cierto umbral, la mezcla comienza a compactarse, reduciendo los espacios vacíos disponibles (García et al., 2016).

En el caso del agregado grueso, la porosidad inicial fue del 28% sin RCD cerámico. Con la adición de RCD, se observó una ligera disminución al 10% de inclusión (24%), seguida de un aumento al 20% (26%) y un máximo de 30% con la incorporación del 30% de RCD cerámico. Este patrón puede atribuirse a la variabilidad en la forma y tamaño de las partículas del RCD cerámico, que influye en la disposición y compactación del material.

4.2.2 Absorción

La capacidad de absorción de los agregados es crucial para evaluar cómo el suelo retiene y libera agua. Los resultados para el agregado fino indicaron que la absorción se mantuvo relativamente constante, con ligeras variaciones en torno al 22%, independientemente del porcentaje de RCD cerámico. Esto sugiere que la textura del RCD cerámico no altera significativamente la capacidad de absorción de los agregados finos.

Por otro lado, el agregado grueso mostró una mayor variabilidad en su capacidad de absorción. Sin RCD cerámico, la absorción fue del 21.44%, aumentando ligeramente con la incorporación de RCD cerámico hasta alcanzar un 23.02% al 20% de inclusión. Sin embargo, al 30% de RCD cerámico, la absorción disminuyó a 22.22%, lo que podría indicar una saturación en la capacidad del material para retener agua (Siddique, 2008).

4.2.3 Relación entre porosidad y absorción

La relación entre porosidad y absorción es crítica para entender el comportamiento del suelo en condiciones de infiltración de agua. Los resultados sugieren que, para los agregados finos, la adición de RCD cerámico no tiene un impacto significativo en la absorción, a pesar de las variaciones en porosidad. Sin embargo, para los agregados gruesos, se observó una correlación más directa, donde un aumento en la porosidad generalmente condujo a una mayor absorción hasta un cierto punto.

El uso de RCD cerámico en suelos también puede tener implicaciones positivas para la vegetación. La mayor porosidad observada en ciertas combinaciones sugiere que estos suelos pueden mejorar la retención de agua y, por lo tanto, ser beneficiosos para el crecimiento de plantas. En particular, los suelos con un 10% a 20% de RCD cerámico pueden proporcionar un entorno más adecuado para la vegetación en áreas urbanas, donde la infiltración de agua es crucial para el desarrollo de raíces y la sostenibilidad de jardines y espacios verdes. La estructura porosa del RCD cerámico podría ayudar a mantener niveles de humedad adecuados, reduciendo la necesidad de riego frecuente y apoyando el desarrollo sostenible de la flora en entornos urbanos y semiurbanos (Medina et al., 2014).

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de RCD cerámico en suelos puede ser beneficiosa para diversas aplicaciones, como en sistemas de drenaje, paisajismo, bases para pavimentos permeables, y como sustrato para la vegetación (Medina et al., 2014). La adición de hasta un 20% de RCD cerámico parece ser óptima, ya que mejora la porosidad y la capacidad de absorción del suelo sin comprometer la estabilidad estructural. Sin embargo, la inclusión de un 30% de RCD cerámico podría llevar a una compactación excesiva, reduciendo la eficacia del suelo para aplicaciones que dependen de una alta capacidad de infiltración (Kevern et al., 2009).

De igual forma, el tamaño de partícula de los agregados nos permite conocer el tipo de suelo al que corresponden las muestras producidas. Debido a que el suelo clasificado se obtuvo de combinación de RCD cerámico y suelo de la región, se obtuvo la siguiente información (Tabla 4.1):

Tabla 4.3. Porcentaje de porosidad y absorción del suelo con RCD cerámico.			
% Porosidad		%Absorción	
Agregado Fino		Agregado Fino	
0 %	24%	0%	22.31%
10%	28%	10%	21.63%
20%	18%	20%	21.92%
30%	22%	30%	22.48%
Agregado Grueso		Agregado Grueso	
0%	28%	0%	21.44%
10%	24%	10%	21.78%
20%	26%	20%	23.02%
30%	30%	30%	22.22%

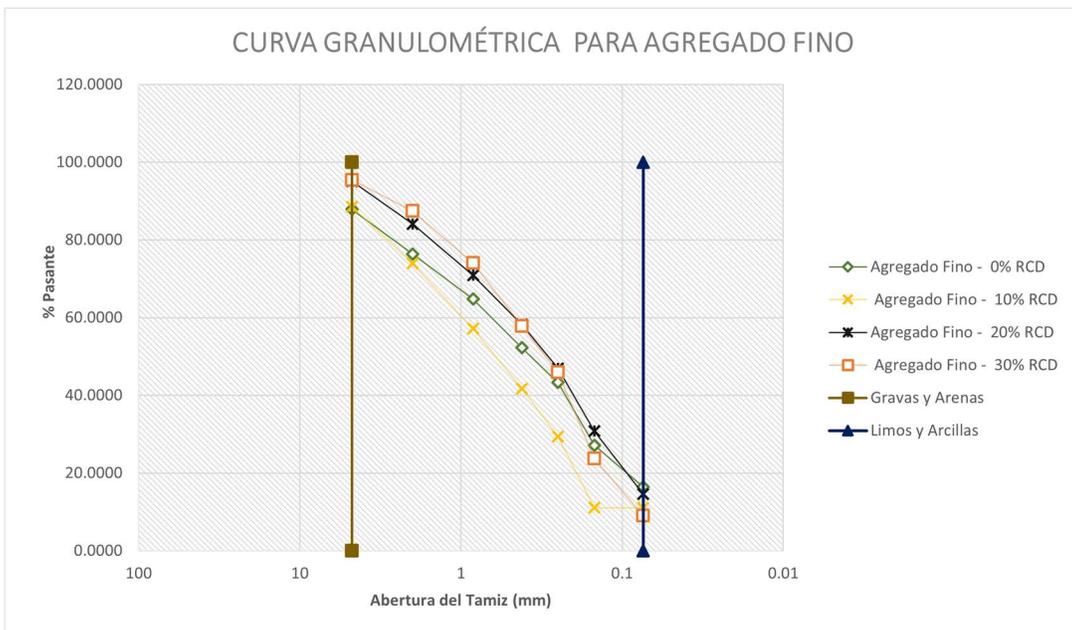


Figura 4.1 Curva granulométrica para agregado fino.

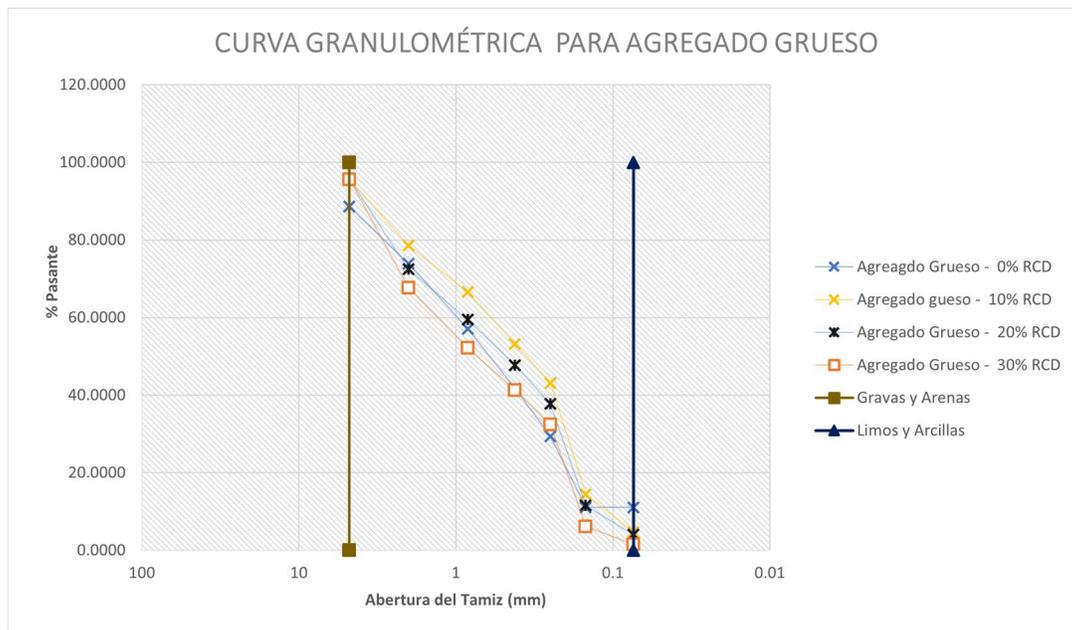


Figura 4.2 Curva granulométrica para agregado grueso.

El sistema integral pavimento-sustrato modificado propuesto en este estudio combina la capacidad de infiltración del concreto permeable con las propiedades de retención de agua del suelo mejorado con RCD cerámico. Los resultados indican que el concreto permeable con hasta un 20% de RCD pétreo mantiene una permeabilidad adecuada (coeficiente de 9.96×10^{-4} cm/s) para permitir una eficiente infiltración de agua, asegurando que el exceso de escorrentía sea conducido hacia el sustrato. A su vez, el suelo modificado con RCD cerámico muestra un aumento significativo en su porosidad (10%) y capacidad de retención de agua (15% superior al suelo no modificado), características suficientes para favorecer el desarrollo de vegetación en entornos urbanos con condiciones controladas.

Este comportamiento integral refleja que el sistema pavimento-sustrato no solo gestiona eficientemente el agua pluvial, sino que también crea un entorno propicio para el crecimiento de vegetación en áreas urbanizadas. El concreto permeable permite la recarga de acuíferos al facilitar el paso del agua, mientras que el suelo mejorado actúa como un reservorio temporal de agua, garantizando condiciones adecuadas para el establecimiento y desarrollo de plantas. Estas propiedades sustentan la hipótesis planteada, demostrando que el diseño propuesto ofrece una solución técnica y ambientalmente viable para la gestión del agua y la sostenibilidad en la infraestructura urbana.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- La incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) cerámicos en suelos modificó de manera significativa la porosidad y absorción, especialmente en los agregados gruesos. Un contenido de hasta 20% de RCD cerámico incrementó la porosidad en los agregados finos, lo que sugiere un mejoramiento en la retención de agua, beneficioso para aplicaciones que favorecen la vegetación urbana. Sin embargo, proporciones mayores (30%) llevaron a una disminución de la porosidad debido a la compactación del material, lo que podría limitar su efectividad en aplicaciones que dependen de una alta infiltración de agua.
- Los resultados indican que la incorporación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) pétreos en el concreto permeable reduce la resistencia a la compresión, especialmente a partir del 20% de sustitución. Mientras que el concreto con 0% de RCD alcanza una resistencia promedio de 106.91 Kg/cm², la mezcla con 30% de RCD presenta una resistencia significativamente inferior, con un promedio de 55.92 Kg/cm². Esto sugiere que el uso de RCD pétreo debe ser cuidadosamente evaluado en aplicaciones donde la resistencia estructural es un factor crítico.
- Se observó que la permeabilidad del concreto permeable mejora con el incremento del porcentaje de RCD. Los coeficientes de permeabilidad aumentan significativamente a partir del 20% de sustitución, alcanzando un valor de 1.200×10^{-3} cm/s para el sistema con 30% de RCD. Este comportamiento es favorable para aplicaciones donde la gestión del agua es prioritaria, como en pavimentos urbanos sostenibles.
- El estudio muestra que existe un compromiso entre la resistencia a la compresión y la permeabilidad en mezclas de concreto permeable con RCD. Una dosificación de hasta un 20% de RCD parece ser el límite óptimo para mantener un equilibrio razonable entre estos dos parámetros, permitiendo un desempeño adecuado en aplicaciones específicas como pavimentos permeables.
- Sostenibilidad: La inclusión de RCD en el concreto permeable no solo contribuye a mejorar la permeabilidad, sino que también fomenta prácticas sostenibles al reducir el uso de agregados naturales y minimizar los desechos de construcción. Esto refuerza la viabilidad del concreto permeable como una solución sostenible en la construcción civil.

-
- Se recomienda utilizar concreto permeable con RCD en proyectos donde la gestión del agua y la sostenibilidad son prioridades, tales como estacionamientos, senderos peatonales y zonas de baja carga vehicular. En proyectos que requieran mayor resistencia estructural, se debería considerar un diseño de mezcla con menor proporción de RCD o la utilización de aditivos que mejoren las propiedades mecánicas del concreto.

Recomendaciones

Se recomienda limitar la incorporación de RCD cerámico en suelos a un máximo del 20%, especialmente para aplicaciones donde la retención de agua y la infiltración son cruciales. Proporciones mayores podrían resultar en una compactación excesiva, afectando negativamente las propiedades de permeabilidad y, por lo tanto, la funcionalidad del suelo en aplicaciones geotécnicas y paisajísticas.

Se recomienda limitar la sustitución de agregados naturales por RCD pétreo hasta un 20% en aplicaciones que requieran un equilibrio entre resistencia y permeabilidad. Para aplicaciones que prioricen la permeabilidad, como pavimentos en áreas de baja carga vehicular, se podría considerar una mayor proporción de RCD, siempre y cuando se evalúe cuidadosamente el impacto en la resistencia.

Es crucial establecer un control de calidad riguroso para el procesamiento y selección de RCD. Esto incluye la eliminación de contaminantes y la homogenización del material para reducir la variabilidad en la mezcla de concreto y garantizar un desempeño consistente.

Se sugiere realizar investigaciones adicionales para explorar el uso de diferentes tipos de RCD y su impacto en las propiedades del concreto permeable. Además, estudiar la durabilidad a largo plazo y el comportamiento en diferentes condiciones ambientales permitirá ampliar las aplicaciones potenciales del concreto permeable con RCD.

Investigaciones Futuras

- Exploración de Otros Tipos de RCD: Además del RCD pétreo, existen otros tipos de residuos de construcción y demolición que podrían ser utilizados como agregados en el concreto permeable, tales como residuos cerámicos, ladrillo triturado, y vidrio reciclado. Investigaciones futuras podrían evaluar cómo estos materiales impactan en la resistencia, permeabilidad, y durabilidad del concreto, así como en su viabilidad económica.
- Mejoras en el Diseño de Mezclas: El desarrollo de mezclas optimizadas que combinen diferentes proporciones de RCD con aditivos o materiales suplementarios (como fibras o nano-materiales) podría mejorar

significativamente las propiedades del concreto permeable. Se recomienda investigar el uso de aditivos que puedan compensar la pérdida de resistencia mecánica sin comprometer la permeabilidad.

- **Evaluación del Impacto Ambiental y Económico:** Investigaciones futuras deberían incluir un análisis exhaustivo del ciclo de vida del concreto permeable con RCD para determinar su verdadero impacto ambiental y económico en comparación con los métodos tradicionales de construcción. Esto podría incluir estudios sobre la huella de carbono, el ahorro de recursos naturales, y el costo-beneficio en el contexto de la economía circular.
- **Aplicaciones Innovadoras en Infraestructura Verde:** Dado que el concreto permeable con RCD ofrece ventajas en la gestión del agua, futuras investigaciones podrían enfocarse en su aplicación en infraestructuras verdes, como techos verdes, jardines de lluvia, y sistemas de drenaje sostenibles. Estas aplicaciones innovadoras podrían ayudar a mitigar los efectos de la urbanización en el ciclo hidrológico y mejorar la resiliencia urbana frente al cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

ACI Committee 211. (1991). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1-91). American Concrete Institute.

ACI Committee 212. (2010). Report on chemical admixtures for concrete. American Concrete Institute.

Arana, M. A. (2016). El concreto, material fundamental para la infraestructura. *Voz del Experto*, (24).

ASTM C192/C192M-21. (2021). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. ASTM International.

ASTM C39/C39M – 18. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.

Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S. E., & Perevochtchikova, M. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 409-427.

Pérez-Ceballos, R., Pacheco-Ávila, J., & Euán-Ávila, J. (2008). Evaluación a escala regional de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México. *Revista Ambiente Ecológico* (14), 1-18.

Ávila García, P. (2008). Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México. *Ciencias*, (90), 46-57. <https://www.redalyc.org/pdf/644/64411395008.pdf>

Ayala-Rodríguez, N. A. (2015). Propuesta para la gestión integral sustentable de los residuos de construcción y demolición (RCD) en el área metropolitana de Guadalajara [Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara].

Bentz, D. P., Garboczi, E. J., & Quenard, D. A. (1999). Percolation theory and the role of the interfacial zone in predicting the transport properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 29(11), 1867-1872. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00173-9)

Bisengimana, E., Zhou, J., Binama, M., Zhao, K., Abbas, S., & Yuan, Y. (2022). The frosting and soil imbalance performance issues of building heat pumps: An overview. *Energy and Buildings*, 273, 112387.

Bock, F. E. R. (2020). La sostenibilidad ambiental como eje transversal de la Agenda 2030. *Revista Mexicana de Política Exterior*, 118, 209-223.

Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234, 117271.

Cubides, E. D., & Santos, G. E. (2018). Control de escorrentías urbanas mediante sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS): Pozos/zanjas de infiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672018000200032

Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(3), 234-254. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732014000300002&script=sci_arttext&lng=pt

Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735-742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>

Feng, Y., Wang, W., & Wang, S. (2024). Multiscale analysis of recycled coarse aggregate concrete under the synergistic action of KH560 and PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 419, 135433.

Frías, M., Guerrero, A., Monasterio, M., Insignares, A., & de Rojas, M. I. S. (2024). Viability of using limestone concrete waste from CDW to produce ternary cements type LC3. *Construction and Building Materials*, 411, 134362.

García-González, C. A., Álvarez-Lloret, P., & Esquivel, J. (2016). Properties and applications of recycled ceramic aggregates. *Materials Science Forum*, 845, 23-29.

Gobierno de México. (2020). Programa Nacional Hídrico 2020-2024. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/828182/Avance_y_Resultados_2022.pdf

Gordillo, J. D. B., & Elizalde, N. F. L. (2018). Impactos de la construcción sostenible y tradicional a nivel ambiental. *Boletín Semillas Ambientales*, 12(1), 16-25. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/bsa/article/view/13613>

Gyawali, T. R. (2020). Development of heavyweight concrete with 2n mixing theory for shielding application. *Progress in Nuclear Energy*, 128, 103465.

Hierro, R. S. (2003). Regeneración natural: situaciones, concepto, factores y evaluación. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 15, 11-16. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2976231>

Hüsken, G., & Brouwers, H. J. H. (2008). A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research*, 38(10), 1246-1259.

IS 456:2000. Indian Standard "Plain and Reinforced Concrete – Code of Practice". Bureau of Indian Standards, New Delhi.

ISO 1920-4:2005. (2005). Testing of concrete - Part 4: Strength of hardened concrete. International Organization for Standardization.

Kevern, J. T., Schaefer, V. R., & Wang, K. (2009). Mix design determination for freeze-thaw resistance of pervious concrete. *Journal of ASTM International*, 6(9), 1-12.

Khalaf, F. M., & DeVenny, A. S. (2004). Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(4), 331-340.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2011). Design and control of concrete mixtures. Portland Cement Association.

Li, J., & Zhuge, Y. (2018). Utilization of recycled aggregates in permeable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 204, 835-845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.277>

López-Ortiz, M. I., & Melgarejo, J. (2020). Presentación: de las rogativas a la gestión de las inundaciones en España. <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/109060/1/riesgo-inundacion-espana-13-19.pdf>

Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2016). Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 36, 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.083>

Medina, C., Juan, A., & Aguado, A. (2014). Reuse of ceramic wastes in construction. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 106–117.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, properties, and materials (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Mexicana, N. (2017). NMX-C-414-ONNCCE-2017. Industria de la construcción–cementos hidráulicos–Especificaciones y métodos de prueba. ONNCCE.

Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2002). Concrete (2nd ed.). Prentice Hall.

Murcia Ortega, M. L. (2014). Efecto de los modelos de ocupación del suelo en relación con el ciclo hidrológico y la cobertura vegetal en áreas urbanas consolidadas [Tesis de licenciatura, Universidad Piloto de Colombia].

Neville, A. M. (2011). Properties of concrete (5th ed.). Pearson Education Limited.

Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). Concrete technology. Pearson Education Limited.

Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. (2013). Que establece las especificaciones para la protección, recuperación y manejo de las poblaciones de las tortugas marinas en su hábitat de anidación. Diario Oficial de la Federación. México.

Oliveira, D. R. B., Leite, M. B., & Vieira, R. R. (2020). Construction and demolition waste composition analysis using wet particle size distribution. Construction and Building Materials, 23(3), 1331-1338.

Pourkhorshidi, A. R., & Najimi, M. (2008). Durability properties of self-consolidating concretes with different mineral admixtures. Cement and Concrete Composites, 30(4), 241-247. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.07.004>

Pujadas, P., Blanco, A., Fuente, A., Cavalaro, S. H. P., & Aguado, A. (2014). Multidisciplinary approach to sustainable concrete structures. Cement and Concrete Composites, 51, 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.006>

Rao, A., Jha, K. N., & Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resources, Conservation and Recycling, 50(1), 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>

Roesler, J. R., Wang, H., & Gaedicke, C. (2016). Mechanical and durability characteristics of pervious concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 18(5), 733-738. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:5\(733\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:5(733))

Siddique, R., Aggarwal, P., & Aggarwal, Y. (2009). Impact resistance of concrete containing waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, 24(4), 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.007>

Siddique, R., Aggarwal, P., & Aggarwal, Y. (2012). Strength and microstructural properties of self-compacting concrete containing coal bottom ash. *Construction and Building Materials*, 26(1), 334-341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.032>

Siddique, R., Aggarwal, P., Aggarwal, Y., & Singh, M. (2011). Durability properties of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3048-3054. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.01.033>

Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.115>

Toledo Filho, R. D., & Gonçalves, J. P. (2016). Performance of concrete with recycled aggregates: The influence of mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 495-505. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.004>

UNE-EN 933-1. (2012). Ensayos para determinar las características geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría. Método del tamizado. AENOR.

Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H., & Wan, S. (2016). Effects of different types of micro/nano-silica on the rheology and mechanical properties of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 81, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.006>

ANEXOS



Designation: C39/C39M – 24

Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation C39/C39M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers determination of compressive strength of cylindrical concrete specimens such as molded cylinders and drilled cores. It is limited to concrete having a density in excess of 800 kg/m³ [50 lb/ft³].

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* (Warning—Means should be provided to contain concrete fragments during sudden rupture of specimens. Tendency for sudden rupture increases with increasing concrete strength and it is more likely when the testing machine is relatively flexible. The safety precautions given in R0030 are recommended.)

1.4 The text of this standard references notes which provide explanatory material. These notes shall not be considered as requirements of the standard.

1.5 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.61 on Testing for Strength.

Current edition approved June 1, 2024. Published June 2024. Originally approved in 1921. Last previous edition approved in 2023 as C39/C39M – 23. DOI: 10.1520/C0039_C0039M-24.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

- C31/C31M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
- C42/C42M Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete
- C125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C192/C192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- C617/C617M Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens
- C670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials
- C873/C873M Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds
- C943 Practice for Making Test Cylinders and Prisms for Determining Strength and Density of Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory
- C1077 Practice for Agencies Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Testing Agency Evaluation
- C1176/C1176M Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table
- C1231/C1231M Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Cylindrical Concrete Specimens
- C1435/C1435M Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer
- C1604/C1604M Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores of Shotcrete
- E4 Practices for Force Calibration and Verification of Testing Machines
- E18 Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at www.astm.org/contact. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

E74 Practices for Calibration and Verification for Force-Measuring Instruments
R0030 Manual of Aggregate and Concrete Testing

C943, C1176/C1176M, C1231/C1231M, and C1435/C1435M, and Test Methods C42/C42M, C873/C873M, and C1604/C1604M.

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this practice, refer to Terminology C125.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *bearing block, n*—steel piece to distribute the load from the testing machine to the specimen.

3.2.2 *lower bearing block, n*—steel piece placed under the specimen to distribute the load from the testing machine to the specimen.

3.2.2.1 *Discussion*—The lower bearing block provides a readily machinable surface for maintaining the specified bearing surface. The lower bearing block may also be used to adapt the testing machine to various specimen heights. The lower bearing block is also referred to as *bottom block, plain block, and false platen*.

3.2.3 *platen, n*—primary bearing surface of the testing machine.

3.2.3.1 *Discussion*—The platen is also referred to as the testing machine *table*.

3.2.4 *spacer, n*—steel piece used to elevate the lower bearing block to accommodate test specimens of various heights.

3.2.4.1 *Discussion*—Spacers are not required to have hardened bearing faces because spacers are not in direct contact with the specimen or the retainers of unbonded caps.

3.2.5 *upper bearing block, n*—steel assembly suspended above the specimen that is capable of tilting to bear uniformly on the top of the specimen.

3.2.5.1 *Discussion*—The upper bearing block is also referred to as the *spherically seated block* and the *suspended block*.

4. Summary of Test Method

4.1 This test method consists of applying a compressive axial load to molded cylinders or cores at a rate which is within a prescribed range until failure occurs. The compressive strength of the specimen is calculated by dividing the maximum load attained during the test by the cross-sectional area of the specimen.

5. Significance and Use

5.1 Care must be exercised in the interpretation of the significance of compressive strength determinations by this test method since strength is not a fundamental or intrinsic property of concrete made from given materials. Values obtained will depend on the size and shape of the specimen, batching, mixing procedures, the methods of sampling, molding, and fabrication and the age, temperature, and moisture conditions during curing.

5.2 This test method is used to determine compressive strength of cylindrical specimens prepared and cured in accordance with Practices C31/C31M, C192/C192M, C617/C617M,

5.3 The results of this test method are used as a basis for quality control of concrete proportioning, mixing, and placing operations; determination of compliance with specifications; control for evaluating effectiveness of admixtures; and similar uses.

5.4 The individual who tests concrete cylinders for acceptance testing shall meet the concrete laboratory technician requirements of Practice C1077, including an examination requiring performance demonstration that is evaluated by an independent examiner.

NOTE 1—Certification equivalent to the minimum guidelines for ACI Concrete Laboratory Technician, Level I or ACI Concrete Strength Testing Technician will satisfy this requirement.

6. Apparatus

6.1 *Testing Machine*—The testing machine shall be of a type having sufficient capacity and capable of providing the rates of loading prescribed in 8.5.

6.1.1 Verify the accuracy of the testing machine in accordance with Practices E4, except that the verified loading range shall be as required in 6.4. Verification is required:

6.1.1.1 Within 13 months of the last calibration,

6.1.1.2 On original installation or immediately after relocation,

6.1.1.3 Immediately after making repairs or adjustments that affect the operation of the force applying system or the values displayed on the load indicating system, except for zero adjustments that compensate for the mass of bearing blocks or specimen, or both, or

6.1.1.4 Whenever there is reason to suspect the accuracy of the indicated loads.

6.1.2 *Design*—The design of the machine must include the following features:

6.1.2.1 The machine must be power operated and must apply the load continuously rather than intermittently, and without shock. If it has only one loading rate (meeting the requirements of 8.5), it must be provided with a supplemental means for loading at a rate suitable for verification. This supplemental means of loading may be power or hand operated.

6.1.2.2 The space provided for test specimens shall be large enough to accommodate, in a readable position, an elastic calibration device which is of sufficient capacity to cover the potential loading range of the testing machine and which complies with the requirements of Practice E74.

NOTE 2—The types of elastic calibration devices most generally available and most commonly used for this purpose are the circular proving ring or load cell.

6.1.3 *Accuracy*—The accuracy of the testing machine shall be in accordance with the following provisions:

6.1.3.1 The percentage of error for the loads within the proposed range of use of the testing machine shall not exceed $\pm 1.0\%$ of the indicated load.

6.1.3.2 The accuracy of the testing machine shall be verified by applying five test loads in four approximately equal increments in ascending order. The difference between any two successive test loads shall not exceed one third of the difference between the maximum and minimum test loads.

6.1.3.3 The test load as indicated by the testing machine and the applied load computed from the readings of the verification device shall be recorded at each test point. Calculate the error, E , and the percentage of error, E_p , for each point from these data as follows:

$$E = A - B \quad (1)$$

$$E_p = 100(A - B)/B$$

where:

- A = load, kN [lbf] indicated by the machine being verified, and
- B = applied load, kN [lbf] as determined by the calibrating device.

6.1.3.4 The report on the verification of a testing machine shall state within what loading range it was found to conform to specification requirements rather than reporting a blanket acceptance or rejection. In no case shall the loading range be stated as including loads below the value which is 100 times the smallest change of load estimable on the load-indicating mechanism of the testing machine or loads within that portion of the range below 10 % of the maximum range capacity.

6.1.3.5 In no case shall the loading range be stated as including loads outside the range of loads applied during the verification test.

6.1.3.6 The indicated load of a testing machine shall not be corrected either by calculation or by the use of a calibration diagram to obtain values within the required permissible variation.

6.2 *Bearing Blocks*—The upper and lower bearing blocks shall conform to the following requirements:

6.2.1 Bearing blocks shall be steel with hardened bearing faces (Note 3).

6.2.2 Bearing faces shall have dimensions at least 3 % greater than the nominal diameter of the specimen.

6.2.3 Except for the inscribed concentric circles described in 6.2.4.7, the bearing faces shall not depart from a plane by more than 0.02 mm [0.001 in.] along any 150 mm [6 in.] length for bearing blocks with a diameter of 150 mm [6 in.] or larger, or by more than 0.02 mm [0.001 in.] in any direction of smaller bearing blocks. New bearing blocks shall be manufactured within one half of this tolerance.

NOTE 3—It is desirable that the bearing faces of bearing blocks have a Rockwell hardness at least 55 HRC as determined by Test Methods E18.

NOTE 4—Square bearing faces are permissible for the bearing blocks.

6.2.4 *Upper Bearing Block*—The upper bearing block shall conform to the following requirements:

6.2.4.1 The upper bearing block shall be spherically seated and the center of the sphere shall coincide with the center of the bearing face within $\pm 5\%$ of the radius of the sphere.

6.2.4.2 The ball and the socket shall be designed so that the steel in the contact area does not permanently deform when loaded to the capacity of the testing machine.

NOTE 5—The preferred contact area is in the form of a ring (described as *preferred bearing area*) as shown in Fig. 1.

6.2.4.3 Provision shall be made for holding the upper bearing block in the socket. The design shall be such that the bearing face can be rotated and tilted at least 4° in any direction.

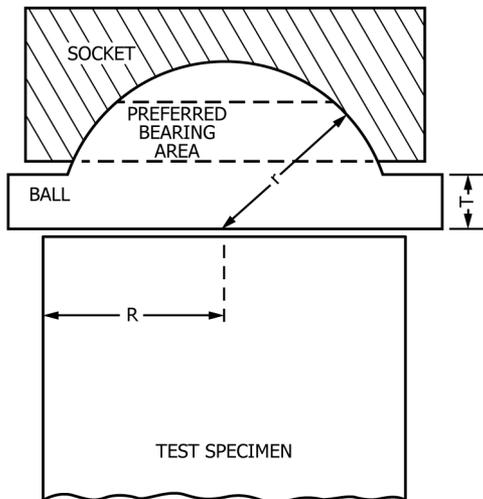
6.2.4.4 If the upper bearing block is a two-piece design composed of a spherical portion and a bearing plate, a mechanical means shall be provided to ensure that the spherical portion is fixed and centered on the bearing plate.

6.2.4.5 The diameter of the sphere shall be at least 75 % of the nominal diameter of the specimen. If the diameter of the sphere is smaller than the diameter of the specimen, the portion of the bearing face extending beyond the sphere shall have a thickness not less than the difference between the radius of the sphere and radius of the specimen (see Fig. 1). The least dimension of the bearing face shall be at least as great as the diameter of the sphere.

6.2.4.6 The dimensions of the bearing face of the upper bearing block shall not exceed the following values:

Nominal Diameter of Specimen, mm [in.]	Maximum Diameter of Round Bearing Face, mm [in.]	Maximum Dimensions of Square Bearing Face, mm [in.]
50 [2]	105 [4]	105 by 105 [4 by 4]
75 [3]	130 [5]	130 by 130 [5 by 5]
100 [4]	165 [6.5]	165 by 165 [6.5 by 6.5]
150 [6]	255 [10]	255 by 255 [10 by 10]
200 [8]	280 [11]	280 by 280 [11 by 11]

6.2.4.7 If the diameter of the bearing face of the upper bearing block exceeds the nominal diameter of the specimen by more than 13 mm [0.5 in.], concentric circles not more than 0.8 mm [0.03 in.] deep and not more than 1 mm [0.04 in.] wide shall be inscribed on the face of upper bearing block to facilitate proper centering.



- $T \geq R - r$
- r = radius of spherical portion of upper bearing block
- R = nominal radius of specimen
- T = thickness of upper bearing block extending beyond the sphere

FIG. 1 Schematic Sketch of Typical Upper Bearing Block

6.2.4.8 At least every six months, or as specified by the manufacturer of the testing machine, clean and lubricate the curved surfaces of the socket and of the spherical portion of the upper bearing block. The lubricant shall be a petroleum-type oil such as conventional motor oil or as specified by the manufacturer of the testing machine.

NOTE 6—To ensure uniform seating, the upper bearing block is designed to tilt freely as it comes into contact with the top of the specimen. After contact, further rotation is undesirable. Friction between the socket and the spherical portion of the head provides restraint against further rotation during loading. Pressure-type greases can reduce the desired friction and permit undesired rotation of the spherical head and should not be used unless recommended by the manufacturer of the testing machine. Petroleum-type oil such as conventional motor oil has been shown to permit the necessary friction to develop.

6.2.5 *Lower Bearing Block*—The lower bearing block shall conform to the following requirements:

6.2.5.1 The lower bearing block shall be solid.

6.2.5.2 The top and bottom surfaces of the lower bearing block shall be parallel to each other.

6.2.5.3 The lower bearing block shall be at least 25 mm [1.0 in.] thick when new, and at least 22.5 mm [0.9 in.] thick after resurfacing.

6.2.5.4 The lower bearing block shall be fully supported by the platen of the testing machine or by any spacers used.

6.2.5.5 If the testing machine is designed that the platen itself is readily maintained in the specified surface condition, a lower bearing block is not required.

NOTE 7—The lower bearing block may be fastened to the platen of the testing machine.

NOTE 8—Inscribed concentric circles as described in 6.2.4.7 are optional on the lower bearing block.

6.3 *Spacers*—If spacers are used, the spacers shall be placed under the lower bearing block and shall conform to the following requirements:

6.3.1 Spacers shall be solid steel. One vertical opening located in the center of the spacer is permissible. The maximum diameter of the vertical opening is 19 mm [0.75 in.].

6.3.2 The top and bottom surfaces of the spacer shall be parallel to each other.

6.3.3 Spacers shall be fully supported by the platen of the test machine.

6.3.4 Spacers shall fully support the lower bearing block and any spacers above.

6.3.5 Spacers shall not be in direct contact with the specimen or the retainers of unbonded caps.

6.4 *Load Indication*—The testing machine shall be equipped with either a dial or digital load indicator.

6.4.1 The verified loading range shall not include loads less than 100 times the smallest change of load that can be read.

6.4.2 A means shall be provided that will record, or indicate until reset, the maximum load to an accuracy within 1.0 % of the load.

6.4.3 If the load is displayed on a dial, the graduated scale shall be readable to at least the nearest 0.1 % of the full scale load (Note 9). The dial shall be readable within 1.0 % of the indicated load at any given load level within the loading range. The dial pointer shall be of sufficient length to reach the graduation marks. The width of the end of the pointer shall not

exceed the clear distance between the smallest graduations. The scale shall be provided with a labeled graduation line load corresponding to zero load. Each dial shall be equipped with a zero adjustment located outside the dial case and accessible from the front of the machine while observing the zero mark and dial pointer.

NOTE 9—Readability is considered to be 0.5 mm [0.02 in.] along the arc described by the end of the pointer. If the spacing is between 1 mm and 2 mm [0.04 in. and 0.08 in.], one half of a scale interval is considered readable. If the spacing is between 2 mm and 3 mm [0.08 in. and 0.12 in.], one third of a scale interval is considered readable. If the spacing is 3 mm [0.12 in.] or more, one fourth of a scale interval is considered readable.

6.4.4 If the load is displayed in digital form, the numbers must be large enough to be read. The numerical increment shall not exceed 0.1 % of the full scale load of a given loading range. Provision shall be made for adjusting the display to indicate a value of zero when no load is applied to the specimen.

6.5 Documentation of the calibration and maintenance of the testing machine shall be in accordance with Practice C1077.

7. Specimens

7.1 Specimens shall not be tested if any individual diameter of a cylinder differs from any other diameter of the same cylinder by more than 2 %.

NOTE 10—This may occur when single use molds are damaged or deformed during shipment, when flexible single use molds are deformed during molding, or when a core drill deflects or shifts during drilling.

7.2 Prior to testing, neither end of test specimens shall depart from perpendicularity to the axis by more than 0.5° (approximately equivalent to 1 mm in 100 mm [0.12 in. in 12 in.]). The ends of compression test specimens that are not plane within 0.050 mm [0.002 in.] shall be sawed or ground to meet that tolerance, or capped in accordance with either Practice C617/C617M or, when permitted, Practice C1231/C1231M. The diameter used for calculating the cross-sectional area of the test specimen shall be determined to the nearest 0.25 mm [0.01 in.] by averaging two diameters measured at right angles to each other at about midheight of the specimen.

7.3 The number of individual cylinders measured for determination of average diameter is not prohibited from being reduced to one for each ten specimens or three specimens per day, whichever is greater, if all cylinders are known to have been made from a single lot of reusable or single-use molds which consistently produce specimens with average diameters within a range of 0.5 mm [0.02 in.]. When the average diameters do not fall within the range of 0.5 mm [0.02 in.] or when the cylinders are not made from a single lot of molds, each cylinder tested must be measured and the value used in calculation of the unit compressive strength of that specimen. When the diameters are measured at the reduced frequency, the cross-sectional areas of all cylinders tested on that day shall be computed from the average of the diameters of the three or more cylinders representing the group tested that day.

7.4 If the purchaser of the testing services or the specifier of the tests requests measurement of the specimen density, determine the specimen density before capping by either 7.4.1

(specimen dimension method) or 7.4.2 (submerged weighing method). For either method, use a balance or scale that is accurate to within 0.3 % of the mass being measured.

7.4.1 Remove any surface moisture with a towel and measure the mass of the specimen. Measure the length of the specimen to the nearest 1 mm [0.05 in.] at three locations spaced evenly around the circumference. Compute the average length and record to the nearest 1 mm [0.05 in.].

7.4.2 Remove any surface moisture with a towel and determine the mass of the specimen in air. Submerge the specimen in water at a temperature of 23.0 °C ± 2.0 °C [73.5 °F ± 3.5 °F] for 15 sec ± 5 sec. Then, determine the apparent mass of the specimen while submerged under water.

7.5 When density determination is not required and the length to diameter ratio is less than 1.8 or more than 2.2, measure the length of the specimen to the nearest 0.05 D.

8. Procedure

8.1 Compression tests of moist-cured specimens shall be made as soon as practicable after removal from moist storage.

8.2 Test specimens shall be kept moist by any convenient method during the period between removal from moist storage and testing. They shall be tested in the moist condition.

8.3 Tolerances for specimen ages are as follows:

Test Age ^A	Permissible Tolerance
24 h	±0.5 h
3 days	±2 h
7 days	±6 h
28 days	±20 h
90 days	±2 days

^AFor test ages not listed, the test age tolerance is ±2.0% of the specified age.

8.3.1 Unless otherwise specified by the specifier of tests, for this test method the test age shall start at the beginning of casting specimens.

8.4 *Placing the Specimen*—Place the lower bearing block, with the hardened face up, on the table or platen of the testing machine. Wipe clean the bearing faces of the upper and lower bearing blocks, spacers if used, and of the specimen. If using unbonded caps, wipe clean the bearing surfaces of the retainers and center the unbonded caps on the specimen. Place the specimen on the lower bearing block and align the axis of the specimen with the center of thrust of the upper bearing block.

NOTE 11—Although the lower bearing block may have inscribed concentric circles to assist with centering the specimen, final alignment is made with reference to the upper bearing block.

8.4.1 *Zero Verification and Block Seating*—Prior to testing the specimen, verify that the load indicator is set to zero. In cases where the indicator is not properly set to zero, adjust the indicator (Note 12). After placing the specimen in the machine but prior to applying the load on the specimen, tilt the movable portion of the spherically seated block gently by hand so that the bearing face appears to be parallel to the top of the test specimen.

NOTE 12—The technique used to verify and adjust load indicator to zero

will vary depending on the machine manufacturer. Consult your owner's manual or compression machine calibrator for the proper technique.

8.4.2 *Verification of Alignment When Using Unbonded Caps*—If using unbonded caps, verify the alignment of the specimen after application of load, but before reaching 10 % of the anticipated specimen strength. Check to see that the axis of the cylinder does not depart from vertical by more than 0.5° (Note 13) and that the ends of the cylinder are centered within the retaining rings. If the cylinder alignment does not meet these requirements, release the load, and carefully recenter the specimen. Reapply load and recheck specimen centering and alignment. A pause in load application to check cylinder alignment is permissible.

NOTE 13—An angle of 0.5° is equal to a slope of approximately 1 mm in 100 mm [$\frac{1}{8}$ inches in 12 inches]

8.5 *Rate of Loading*—Apply the load continuously and without shock.

8.5.1 The load shall be applied at a rate of movement (platen to crosshead measurement) corresponding to a stress rate on the specimen of 0.25 MPa/s ± 0.05 MPa/s [35 psi/s ± 7 psi/s] (see Note 14). The designated rate of movement shall be maintained at least during the latter half of the anticipated loading phase.

NOTE 14—For a screw-driven or displacement-controlled testing machine, preliminary testing will be necessary to establish the required rate of movement to achieve the specified stress rate. The required rate of movement will depend on the size of the test specimen, the elastic modulus of the concrete, and the stiffness of the testing machine.

8.5.2 During application of the first half of the anticipated loading phase, a higher rate of loading shall be permitted. The higher loading rate shall be applied in a controlled manner so that the specimen is not subjected to shock loading.

8.5.3 Make no adjustment in the rate of movement (platen to crosshead) as the ultimate load is being approached and the stress rate decreases due to cracking in the specimen.

8.6 Apply the compressive load until the load indicator shows that the load is decreasing steadily and the specimen displays a well-defined fracture pattern (Types 1 to 4 in Fig. 2). For a testing machine equipped with a specimen break detector, automatic shut-off of the testing machine is prohibited until the load has dropped to a value that is less than 95 % of the peak load. When testing with unbonded caps, a corner fracture similar to a Type 5 or 6 pattern shown in Fig. 2 may occur before the ultimate capacity of the specimen has been attained. Continue compressing the specimen until the user is certain that the ultimate capacity has been attained. Record the maximum load carried by the specimen during the test, and note the type of fracture pattern according to Fig. 2. If the fracture pattern is not one of the typical patterns shown in Fig. 2, sketch and describe briefly the fracture pattern. If the measured strength is lower than expected, examine the fractured concrete and note the presence of large air voids, evidence of segregation, whether fractures pass predominantly around or through the coarse aggregate particles, and verify end preparations were in accordance with Practice C617/C617M or Practice C1231/C1231M.

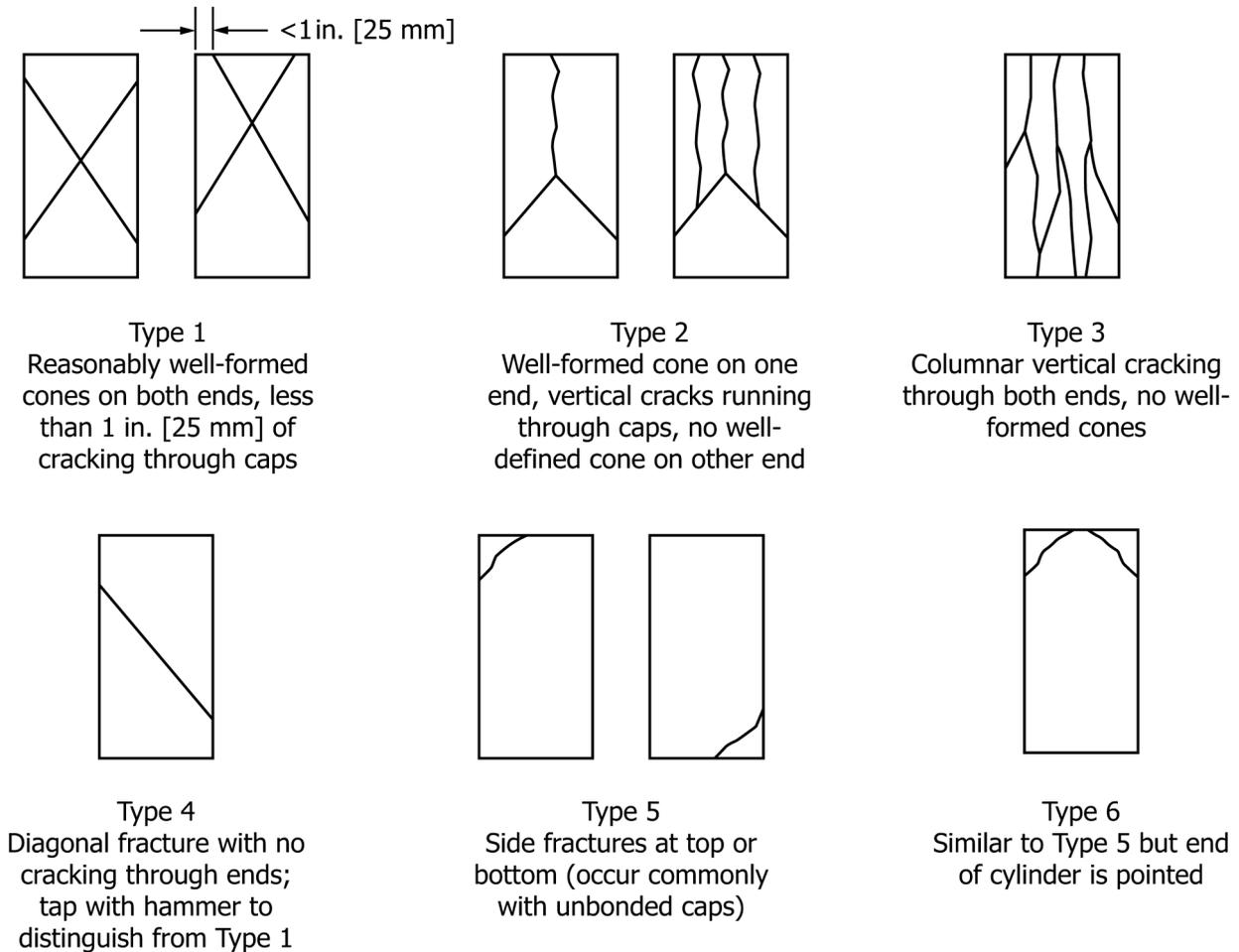


FIG. 2 Schematic of Typical Fracture Patterns

9. Calculation

9.1 Calculate the compressive strength of the specimen as follows:

SI units:

$$f_{cm} = \frac{4000 P_{max}}{\pi D^2} \quad (2)$$

Inch-pound units:

$$f_{cm} = \frac{4 P_{max}}{\pi D^2} \quad (3)$$

where:

- f_{cm} = compressive strength, MPa [psi],
- P_{max} = maximum load, kN [lbf], and
- D = average measured diameter, mm [in.].

Use at least five digits for the value of π , that is, use 3.1416 or a more precise value.

9.2 If the specimen length to diameter ratio is 1.75 or less, correct the result obtained in 9.1 by multiplying by the appropriate correction factor shown in the following table:

L/D:	1.75	1.50	1.25	1.00
Factor:	0.98	0.96	0.93	0.87

Use interpolation to determine correction factors for L/D values between those given in the table.

NOTE 15—Correction factors depend on various conditions such as moisture condition, strength level, and elastic modulus. Average values are given in the table. These correction factors apply to low-density concrete weighing between 1600 kg/m³ and 1920 kg/m³ [100 lb/ft³ and 120 lb/ft³] and to normal-density concrete. They are applicable to concrete dry or soaked at the time of loading and for nominal concrete strengths from 14 MPa to 42 MPa [2000 psi to 6000 psi]. For strengths higher than 42 MPa [6000 psi] correction factors may be larger than the values listed above³.

9.3 If required, calculate the specimen density to the nearest 10 kg/m³ [1 lb/ft³] using the applicable method.

9.3.1 If specimen density is determined based on specimen dimensions, calculate specimen density as follows:

SI units:

$$\rho_s = \frac{4 \times 10^9 \times W}{L \times D^2 \times \pi} \quad (4)$$

Inch-pound units:

$$\left[\rho_s = \frac{6912 \times W}{L \times D^2 \times \pi} \right] \quad (5)$$

where:

ρ_s = specimen density, kg/m³ [lb/ft³],

³ Bartlett, F.M. and MacGregor, J.G., "Effect of Core Length-to-Diameter Ratio on Concrete Core Strength," *ACI Materials Journal*, Vol 91, No. 4, July-August, 1994, pp. 339–348.

W = mass of specimen in air, kg [lb],
 L = average measured length, mm [in.], and
 D = average measured diameter, mm [in.].

9.3.2 If the specimen density is based on submerged weighing, calculate the specimen density as follows:

$$\rho_s = \frac{W \times \gamma_w}{W - W_s} \quad (6)$$

where:

ρ_s = specimen density, kg/m³ [lb/ft³],
 W = mass of specimen in air, kg [lb],
 W_s = apparent mass of submerged specimen, kg [lb], and
 γ_w = density of water at 23 °C [73.5 °F] = 997.5 kg/m³ [62.27 lb/ft³].

10. Report

10.1 Report the following information:

- 10.1.1 Specimen identification,
- 10.1.2 Serial number of delivery ticket, if available,
- 10.1.3 Average measured diameter (and measured length, if outside the range of 1.8 D to 2.2 D), in millimetres [inches],
- 10.1.4 Cross-sectional area, in square millimetres [square inches],
- 10.1.5 Maximum load, in kilonewtons [pounds-force],
- 10.1.6 Compressive strength rounded to the nearest 0.1 MPa [10 psi],
- 10.1.7 If the average of two or more companion cylinders tested at the same age is reported, calculate the average compressive strength using the unrounded individual compressive strength values. Report the average compressive-strength rounded to the nearest 0.1 MPa [10 psi].
- 10.1.8 Type of fracture (see Fig. 2),
- 10.1.9 Defects in either specimen or caps,
- 10.1.10 Age of specimen at time of testing. Report age in days for ages three days or greater, report age in hours if the age is less than three days,

NOTE 16—If software limitations prevent reporting the specimen age in hours, the age of the specimen in hours may be included in a note in the report.

10.1.11 If determined, the density to the nearest 10 kg/m³ [1 lb/ft³].

11. Precision and Bias

11.1 Precision

11.1.1 *Single-Operator Precision*—The following table provides the single-operator precision of tests of 150 mm by 300 mm [6 in. by 12 in.] and 100 mm by 200 mm [4 in. by 8 in.] cylinders made from a well-mixed sample of concrete under laboratory conditions and under field conditions (see 11.1.2).

	Coefficient of Variation ⁴	Acceptable Range of Individual Cylinder Strengths	
		2 cylinders	3 cylinders
150 mm by 300 mm [6 in. by 12 in.]			
Laboratory conditions	2.4 %	6.6 %	7.8 %
Field conditions	2.9 %	8.0 %	9.5 %
100 mm by 200 mm [4 in. by 8 in.]			
Laboratory conditions	3.2 %	9.0 %	10.6 %
Field conditions	3.0 %	8.4 %	9.9 %

11.1.2 The single-operator coefficient of variation represents the expected variation of measured strength of companion cylinders prepared from the same sample of concrete and tested by one laboratory at the same age. The values given for the single-operator coefficient of variation of 150 mm by 300 mm [6 in. by 12 in.] cylinders are applicable for compressive strengths between 15 MPa to 55 MPa [2000 psi to 8000 psi] for laboratory and field conditions. For 100 mm by 200 mm [4 in. by 8 in.] cylinders, the values are applicable for compressive strengths between 17 MPa to 32 MPa [2500 psi and 4700 psi] and 20 MPa to 75 MPa [3000 psi to 11 000 psi] for laboratory and field conditions, respectively.

NOTE 17—The single-operator coefficients of variation for 150 mm by 300 mm [6 in. by 12 in.] cylinders are derived from CCRL concrete proficiency sample data for laboratory conditions and a collection of 1265 test reports from 225 commercial testing agencies in 1978 for field conditions.⁵ The single operator coefficient of variation of 100 mm by 200 mm [4 in. by 8 in.] cylinders are derived from CCRL concrete proficiency sample data for laboratory conditions and from a collection of 9400 test reports from 53 ready mixed companies that were compiled in 2022 for field conditions.⁶

11.1.3 *Multilaboratory Precision*—The multi-laboratory coefficient of variation for compressive strength test results of 150 mm by 300 mm [6 in. by 12 in.] cylinders has been found to be 5.0 %⁴; therefore, the results of properly conducted tests by two laboratories on specimens prepared from the same sample of concrete are not expected to differ by more than 14 %⁴ of the average (see Note 18). A strength test result is the average of two cylinders tested at the same age.

NOTE 18—The multilaboratory precision does not include variations associated with different operators preparing test specimens from split or independent samples of concrete. These variations are expected to increase the multilaboratory coefficient of variation.

NOTE 19—The multilaboratory data were obtained from six separate organized strength testing round robin programs where 150 mm by 300 mm [6 in. by 12 in.] cylindrical specimens were prepared at a single

⁴ These numbers represent respectively the (1s %) and (d2s %) limits as described in Practice C670.

⁵ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:C09-1006. Contact ASTM Customer Service at www.astm.org/contact.

⁶ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:C09-2003. Contact ASTM Customer Service at www.astm.org/contact.

location and tested by different laboratories. The range of average strength from these programs was 17.0 MPa to 90 MPa [2500 psi to 13 000 psi].

11.2 *Bias*—There is no accepted reference material suitable for determining the bias of this test method, therefore no statement on bias is made.

12. Keywords

12.1 concrete core; concrete cylinder; concrete specimen; concrete strength; compressive strength; core; cylinder; drilled core; strength

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (C39/C39M–23) that may impact the use of this standard. (Approved June 1, 2024.)

- (1) Revised 11.1.2 and moved informative text to current Note 17.
- (2) Moved informative text in previous 11.1.4 to current Note 19.
- (3) Deleted previous Note 18.
- (4) Revised 11.2.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (C39/C39M–21) that may impact the use of this standard. (Approved December 1, 2023.)

- (1) Revised 11.1.1 and 11.1.2.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), or through the ASTM website (www.astm.org/contact). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com/>



Designation: C1688/C1688M – 14a

Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C1688/C1688M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers determining the density of freshly mixed pervious concrete under standardized conditions and gives formulas for calculating the void content of pervious concrete. Test results are not intended to represent the in-place density and void content.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (Warning—Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to skin and tissue upon prolonged exposure.²)*

1.4 The text of this test method references notes and footnotes that provide explanatory information. These notes and footnotes (excluding those in tables) shall not be considered as requirements of this test method.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*³

C29/C29M Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”)

and Voids in Aggregate

C125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates

C127 Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate

C128 Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate

C150/C150M Specification for Portland Cement

C172/C172M Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete

C188 Test Method for Density of Hydraulic Cement

C192/C192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

C231/C231M Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method

C311 Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete

C595/C595M Specification for Blended Hydraulic Cements

C989/C989M Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars

C1157/C1157M Performance Specification for Hydraulic Cement

C1240 Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures

D698 Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))

D6926 Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 For definitions of terms used in this standard, refer to Terminology **C125**.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *concrete, pervious, n*—hydraulic cement concrete proportioned with sufficient, distributed, interconnected macroscopic voids that allow water to flow through the material under the action of gravity alone.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

3.3 Symbols:

D	=	density (unit weight) of concrete kg/m ³ [lb./ft. ³]
M_s	=	total mass of all materials batched, kg [lb] (see Note 1)
M_c	=	mass of the measure filled with concrete, kg [lb]
M_m	=	mass of the measure, kg [lb]
T	=	theoretical density of the concrete computed on an airfree basis, kg/m ³ [lb./ft. ³] (see Note 1)
U	=	percentage of voids in the fresh pervious concrete, including entrained and entrapped air voids in the cement paste.
V_s	=	sum of the absolute volumes of the component ingredients in the batch, m ³ [ft. ³]
V_m	=	volume of the measure, m ³ [ft. ³]

NOTE 1—The theoretical density is a laboratory determination, and is assumed to remain constant for all batches made using identical component ingredients and proportions.

4. Summary of Test Method

4.1 A sample of fresh pervious concrete is placed and consolidated in a standard measure. The concrete is consolidated using a standard Proctor hammer (Procedure A) or a standard Marshall hammer (Procedure B). The density and void content of the pervious concrete are calculated based on the measured mass of the consolidated concrete specimen, the volume of the measure, and the total mass of materials batched.

5. Significance and Use

5.1 This test method provides a procedure for determining the density and void content of freshly mixed pervious concrete.

5.2 This test method is applicable to pervious concrete mixtures containing coarse aggregate with a nominal maximum size of 25 mm [1 in.] or smaller.

5.3 The measured fresh density may be used as verification of mixture proportions.

5.4 This method uses a standard consolidation procedure to measure fresh density and void content of a pervious concrete mixture as delivered. Test results are not intended to represent the density and void content of the in-place pervious concrete. This method shall not be used to determine the in-place void content or yield of the pervious concrete.

5.5 The fresh density and void content calculated from this test method may be different when comparing the results from Procedure A with Procedure B. Results are only comparable when obtained using the same procedure (Procedure A or B).

6. Apparatus

6.1 *Balance*—A balance or scale accurate to 50 g [0.1 lb] or to within 0.3 % of the test load, whichever is greater, at any point within the range of use. The range of use shall be considered to extend from the mass of the empty measure to the mass of the measure filled with concrete having an assumed density of 2600 kg/m³ [160 lb/ft.³].

6.2 *Standard Proctor Hammer*—A device used to compact a pervious concrete specimen for Procedure A that conforms to Test Method [D698](#).

6.3 *Marshall Hammer*—A device used to compact a pervious concrete specimen for Procedure B that conforms to Practice [D6926](#) manual compaction hammer.

6.4 *Measure*—A cylindrical container made of steel or other suitable metal with a capacity of 7.0 ± 0.6 L [0.25 ± 0.02 ft.³] and a diameter equal to 0.75 to 1.25 times the height (See [Note 2](#)). The volume of the measure shall be determined as described in Test Method [C29/C29M](#). The top rim of the container shall be plane within 0.3 mm [0.01 in.] (See [Note 3](#)).

NOTE 2—The metal should not be attacked readily by cement paste. However, a reactive material such as aluminum alloy may be used if, as a result of an initial reaction, a surface film is formed that protects the metal against further corrosion. The measuring bowl of an air meter conforming to Test Method [C231/C231M](#) can meet the requirements for the measure.

NOTE 3—The top rim is satisfactorily plane if a 0.3 mm [0.01-in.] wire feeler gauge cannot be inserted between the rim and a piece of 6 mm [¼-in.] or thicker plate glass laid over the top of the measure.

6.5 *Strike-Off Plate*—A flat rectangular metal plate at least 6 mm [¼ in.] thick or a glass or acrylic plate at least 12 mm [½ in.] thick with length and width that are at least 50 mm [2 in.] greater than the diameter of the measure with which it is to be used. The edges of the plate shall be straight within a tolerance of 2 mm [⅛ in.].

6.6 *Scoop*—Of a size large enough so each amount of pervious concrete obtained from the sampling receptacle is representative and small enough so that the concrete is not spilled during placement in the measure.

7. Sampling

7.1 For field placements, obtain the sample of freshly-mixed pervious concrete in accordance with Practice [C172/C172M](#).

7.1.1 Start the test for density within 5 min after obtaining the final portion of the composite sample.

7.2 For laboratory testing, obtain the sample of freshly-mixed pervious concrete in accordance with Practice [C192/C192M](#).

7.2.1 Start the test for density within 5 min after obtaining the sample.

8. Procedure

8.1 Place the measure on a flat, level surface free from vibration. Moisten the inside of the measure before placing pervious concrete. Remove any standing water from the bottom of the container using a moistened sponge. Place the pervious concrete in the measure in two layers of approximately equal thickness using the scoop described in [6.6](#). During filling of the measure, move the scoop around the perimeter of the opening to ensure an even distribution of the concrete with minimal segregation. For Procedure A, drop the hammer vertically 20 times per layer at the full 305 mm [12 in.] drop height. For Procedure B, drop the hammer vertically 10 times per layer at the full 457 mm [18 in.] drop height. For each layer, distribute the position of the tamper so that the entire surface area of the pervious concrete in the measure is consolidated equally. Before consolidating the final layer, fill the measure to overflowing. After completion of consolidation, the measure must contain about 3 mm [⅛ in.] of excess pervious concrete protruding above the top of the measure. If after half the number of specified hammer drops to the final layer it appears that there will be insufficient concrete, add a small quantity of concrete to correct the deficiency. If after half

the number of specified hammer drops to the final layer it appears that there will be too much concrete in the measure, remove a representative portion of excess concrete with a trowel or scoop. Complete the consolidation of the final layer.

8.2 Strike Off—After consolidation, strike off the top surface of the concrete and finish it flat with the strike-off plate so that the concrete surface is level with the top of the measure. Accomplish the strike-off by pressing the strike-off plate on the top surface of the measure to cover about two thirds of the surface and withdrawing the plate with a sawing motion to strike off the area originally covered. Then place the plate on the top of the measure to cover the same two thirds of the surface and advance it with a vertical pressure and a sawing motion to cover the whole surface of the measure; continue to advance plate until it slides completely off the measure. Several final sawing-motion strokes with the edge of the plate, which has been inclined to the top of the measure, will produce a flat finished surface.

8.3 Cleaning and Weighing—After strike-off, clean excess concrete from the exterior of the measure and determine the mass of the concrete and measure to an accuracy consistent with the requirements of 6.1.

9. Calculation

9.1 Density (Unit Weight)—Calculate the net mass of the concrete by subtracting the mass of the measure, M_m , from the mass of the measure filled with concrete, M_c . Calculate the density (unit weight), D , by dividing the net mass of concrete by the volume of the measure, V_m , as follows:

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (1)$$

9.2 Theoretical Density—Calculate the theoretical density from the following equation:

$$T = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

The total mass of all materials batched is the sum of the masses of the cement, the fine aggregate in the saturated-surface-dry condition, the coarse aggregate in the saturated-surface-dry condition, the water in the batch (includes free water from the aggregate), and any other solid or liquid materials used. The absolute volume of each ingredient is equal to the quotient of the mass of that ingredient divided by the product of its relative density (specific gravity) times the density of water (See Test Method C29/C29M). For the aggregate components, the relative density (specific gravity) shall be based on the saturated-surface-dry condition (as determined by Test Method C127 for coarse aggregate and Test Method C128 for fine aggregate). The relative density (specific gravity) for cements meeting Specifications C150/C150M, C595/C595M, and C1157/C1157M and for slag cement meeting Specification C989/C989M shall be determined by Test Method C188. It is permitted to use a value of 3.15 for portland cements manufactured to meet the requirements of Specification C150/C150M. The relative density (specific gravity) of fly ash shall be determined as directed in Test Method C311, and of silica fume as directed in Specification C1240

NOTE 4—The relative density (specific gravity) of portland cements, blended cements, and supplementary cementitious materials obtained by methods required in 9.2 are commonly available from the supplier. .

9.3 Void Content—Calculate the percentage of voids as follows:

$$U = \frac{T - D}{T} \times 100 \quad (3)$$

10. Report

10.1 Report the following information:

10.1.1 Date, time, and name of individual molding specimens.

10.1.2 Mixture identification and location of concrete represented by the sample.

10.1.3 Volume of the density (unit weight) measure, to the nearest 0.01 L [0.001 ft³].

10.1.4 Measured density (unit weight) of the concrete, to the nearest 1.0 kg/m³ [0.1 lb/ft³].

10.1.5 Theoretical density, to the nearest 1.0 kg/m³ [0.1 lb/ft³].

10.1.6 Void content, to the nearest 0.1 %.

10.1.7 Procedure followed (A or B).

11. Precision and Bias

11.1 Repeatability testing was performed by six laboratories using pervious concrete mixtures proportioned using local materials. Each laboratory prepared three batches and performed two replicate tests per batch. The range of density of fresh pervious concrete was from 1750 to 2000 kg/m³ [109 to 125 lb/ft³] (See Note 5).

NOTE 5—Round robin testing was performed using the following six consolidation methods:

Proctor Hammer-2 equal layers, 20 times per layer

Marshall Hammer-2 equal layers, 5 times per layer

Marshall Hammer-2 equal layers, 10 times per layer

ASTM C29 Jigging-2 equal layers, 50 drops per layer as per Test Method C29/C29M

ASTM C138 Rodding Method-2 equal layers, 25 times per layer

No Consolidation-Fill the empty unit weight bucket.

Of the six consolidation methods evaluated, the method using the Proctor Hammer and Marshall Hammer produced a high degree of repeatability and employed a straightforward process.

11.1.1 The single-operator standard deviation of density of freshly mixed pervious concrete following Procedure A has been found to be 22 kg/m³ [1.4 lb/ft³].

11.1.2 The single-operator standard deviation of density of freshly mixed pervious concrete following Procedure B has been found to be 21 kg/m³ [1.3 lb/ft³].

11.1.3 The multi-operator standard deviation has not been developed. The reproducibility of this test method is being determined.

11.2 This test method has no bias because the density of pervious concrete is defined only in terms of this test method.

12. Keywords

12.1 density; fresh concrete; pervious concrete; Proctor hammer; Marshall hammer; void content

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (C1688/C1688M – 14) that may impact the use of this standard. (Approved October 1, 2014.)

(1) Revised 3.2.1.

(2) Revised 5.5.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com/>