



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

"Efectos del curado en la resistencia de un concreto con gravas de origen volcánico"

TESIS

Que para obtener el grado de licenciado en Ingeniería Civil

Presenta

Muñoz Vargas Hípías

Director:

Dr. Luis Daimir López León

Codirector:

Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Fecha:

Abril de 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 7 de mayo de 2025

Número de control: ICBI-D/754/2025

Asunto: Autorización de impresión.

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

Con 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 al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Hipias Muñoz Vargas**, quien presenta el trabajo de titulación **"Efectos del curado en la resistencia de un concreto con gravas de origen volcánico"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones 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. Omar Caballero Garatachea

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



uaeh.edu.mx

ÍNDICE

GLOSARIO DE TÉRMINOS:	4
RELACIÓN DE CUADROS, GRAFICAS, ILUSTRACIONES Y ECUACIONES	6
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
Capítulo 1. ANTECEDENTES	13
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.2. OBJETIVO GENERAL	16
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	18
1.6. HIPÓTESIS	18
2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Normativa para el diseño de un concreto ligero.....	20
2.2. Escorias volcánicas como materiales alternativos	21
2.3. Incorporación de escorias volcánicas al concreto.....	22
2.4. Limitaciones del uso de escorias volcánicas.....	22
2.5. Importancia del curado en concretos con agregados volcánicos	23
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1. Materiales y métodos	26
3.1.1. Cemento.....	26
3.1.3. Agregado grueso	29
3.1.5. Absorción de agua en el agregado grueso	32

3.1.6. Diseño de mezcla.....	33
3.1.7. Elaboración de la mezcla.....	35
3.1.8. Curado de especímenes.....	36
3.1.9. Ensayo de resistencia a la compresión	38
4. Resultados y discusión.....	40
4.1. Proporciones del diseño de mezcla.....	40
4.2. Ensayo de cilindros curados por aspersion	41
4.3. Ensayo de cilindros curados con membrana	42
4.4. Ensayo de cilindros en condiciones ambientales.....	44
4.6. Discusión de los resultados	48
CONCLUSIONES.....	51
BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXOS	56

GLOSARIO DE TÉRMINOS:

ACI (American Concrete Institute): Instituto norteamericano que establece normas y recomendaciones técnicas para el diseño, producción y curado del concreto.

Agregado fino: Material granular (arena) que pasa completamente a través del tamiz No. 4 (4.75 mm), empleado para proporcionar trabajabilidad y cohesión en mezclas de concreto.

Agregado grueso: Material granular (grava o escoria volcánica) que queda retenido en el tamiz No. 4, cuya función es proporcionar resistencia y volumen al concreto.

ASTM (American Society for Testing and Materials): Organización internacional que desarrolla y publica normas técnicas para materiales, productos y sistemas.

Cabeceo: Proceso de preparación de las superficies de los especímenes cilíndricos de concreto antes del ensayo de compresión, mediante la aplicación de neopreno u otros materiales.

CPC 30 R RS: Cemento Portland Compuesto con resistencia a sulfatos, de alta resistencia inicial, regulado por la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017.

Curado: Proceso mediante el cual se mantiene la humedad y la temperatura adecuadas del concreto durante su fraguado y endurecimiento, para asegurar su resistencia y durabilidad.

Curado con membrana: Método de conservación de humedad que consiste en envolver el concreto con láminas plásticas impermeables para evitar la evaporación del agua.

Curado por aspersión: Método de curado que emplea rociado o niebla de agua sobre el concreto para mantener su humedad superficial.

f'_c : Resistencia característica a la compresión del concreto, expresada en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), que debe alcanzarse a los 28 días.

kg/cm^2 : Kilogramo por centímetro cuadrado, unidad de presión utilizada comúnmente en ensayos de compresión de concreto.

Membrana plástica: Película impermeable utilizada en el curado del concreto para evitar la pérdida de humedad interna.

NMX: Norma Mexicana, establecida por la Secretaría de Economía a través del ONNCCE, que regula especificaciones y métodos de prueba de materiales de construcción.

NTC-RCDF: Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, ahora Ciudad de México.

ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación): Organismo mexicano que emite normas y certificaciones en el sector construcción.

Revenimiento (Slump): Medida de la consistencia o trabajabilidad del concreto fresco, determinada por el ensayo con el cono de Abrams.

Tezontle: Escoria volcánica porosa de baja densidad, utilizada como agregado alternativo en la producción de concreto ligero.

RELACIÓN DE CUADROS, GRAFICAS, ILUSTRACIONES Y ECUACIONES

Tabla 3.1.	Especificaciones técnicas del cemento CPC 30 R RS (Cruz Azul)	28
Tabla 3.2.	Propiedades físicas de la arena caliza utilizada	29
Tabla 3.3.	Propiedades físicas del agregado grueso (grava caliza)	30
Tabla 3.4.	Propiedades físicas del tezontle rojo (escoria volcánica).....	31
Tabla 3.5.	Propiedades de los agregados utilizados	34
Tabla 4.1.	Promedio de resistencias en especímenes curados con aspersores.....	40
Tabla 4.2.	Promedio de resistencias en especímenes curados con aspersores.....	41
Tabla 4.3.	Promedio de resistencia en especímenes curados con membrana.	43
Tabla 4.4.	Promedio de resistencia en especímenes sometidos a condiciones ambientales.	44
Figura 3.1.	Cuarteo de agregados gruesos	35
Figura 3.2.	Mezclado de componentes	36
Figura 3.3.	Ensayo de revenimiento.....	36
Figura 3.4.	Sistema de aspersión para curado húmedo	37
Figura 3.5.	Cilindros envueltos en membrana plástica	38
Figura 3.6.	Ensayo de resistencia a compresión en prensa hidráulica	39
Gráfica 4.1.	Resistencias promedio en especímenes curados con aspersión	42
Gráfica 4.2.	Resistencias promedio en especímenes curados con membrada.....	43
Gráfica 4.3.	Resistencias promedio en especímenes sin curado.	45
Gráfica 4.4.	Resistencias promedio de los distintos sistemas de curado.....	46

Ecuación 3.1.	Densidad relativa	33
Ecuación 3.2.	Porcentaje de absorción.....	33
Ecuación 3.3.	Porción de grava sustituida	34
Ecuación 3.4.	Peso efectivo del agregado alternativo.....	34

RESUMEN

El presente trabajo de investigación evalúa el efecto de distintos métodos de curado sobre la resistencia a la compresión de un concreto estructural ligero modificado con agregado volcánico, específicamente tezontle rojo. Se diseñó una mezcla con sustitución del 25% del agregado grueso convencional por tezontle, siguiendo la metodología ACI 211.5R-22 y normas mexicanas como la NMX-C-404-ONNCCE-2016. El objetivo fue identificar qué tipo de curado —aspersión, membrana plástica o sin curado— proporciona un mejor desarrollo mecánico del concreto a distintas edades (4, 7, 14, 20, 25 y 28 días).

Los especímenes cilíndricos fueron elaborados en laboratorio y curados bajo condiciones controladas. Posteriormente, se sometieron a ensayos de compresión conforme a la norma ASTM C39/C39M-23. Los resultados mostraron que el curado con membrana plástica fue el más eficiente, alcanzando el 99.74% de la resistencia de diseño ($f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$) a los 28 días. En contraste, el curado por aspersión alcanzó solo el 73.88%, y los especímenes sin curado no superaron el 36% del f'_c esperado.

Se concluye que el método de curado influye significativamente en el desempeño del concreto con agregados porosos, y que el uso del tezontle es viable siempre que se aplique un sistema de curado adecuado. Esta investigación promueve el uso sostenible de materiales regionales y aporta evidencia técnica para la implementación de concretos ligeros en contextos donde el acceso a recursos hídricos o tecnología constructiva es limitado.

Palabras clave: concreto ligero, tezontle, curado, resistencia a la compresión

ABSTRACT

This research evaluates the effect of different curing methods on the compressive strength of a lightweight structural concrete modified with volcanic aggregate, specifically red tezontle. A concrete mix was designed by replacing 25% of the conventional coarse aggregate with tezontle, following the ACI 211.5R-22 methodology and Mexican standards such as NMX-C-404-ONNCCE-2016. The objective was to identify which curing method—sprinkling, plastic membrane, or no curing—provides better mechanical development at various ages (4, 7, 14, 20, 25, and 28 days).

Cylindrical specimens were prepared under laboratory conditions and subjected to standardized curing. Compressive strength tests were conducted according to ASTM C39/C39M-23. Results showed that the plastic membrane curing method was the most effective, reaching 99.74% of the design strength ($f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$) at 28 days. In contrast, sprinkling achieved only 73.88%, and uncured specimens did not exceed 36% of the expected f'_c .

It is concluded that the curing method significantly influences the performance of concrete made with porous aggregates and that tezontle is a technically viable alternative when combined with an adequate curing system. This research supports the sustainable use of regional materials and provides technical evidence to implement lightweight concrete in areas with limited water resources or construction technology.

Keywords: lightweight concrete, tezontle, curing, compressive strength.

INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial para la construcción de infraestructura civil, debido a su resistencia a la compresión, durabilidad, versatilidad de moldeo y bajo costo relativo. Desde épocas antiguas, como en el Imperio Romano, hasta la actualidad, el concreto ha sido protagonista en el desarrollo de las ciudades y en la consolidación de estructuras que demandan rigidez y resistencia mecánica (Mehta, 2000; Rivera Villarreal, 1998). No obstante, el concreto convencional también presenta limitaciones importantes, entre ellas, su elevado peso volumétrico debido al uso de agregados pétreos densos como la grava, lo que incrementa las cargas muertas y demanda diseños estructurales más robustos (García et al., 2016).

Ante este desafío, el desarrollo de concretos estructurales ligeros ha cobrado importancia, especialmente en zonas con requerimientos sísmicos, estructuras prefabricadas y construcciones en regiones remotas o de difícil acceso. Una de las estrategias más relevantes para aligerar el peso del concreto consiste en sustituir parcialmente el agregado grueso por materiales alternativos de menor densidad, como las escorias volcánicas (ACI Committee 213, 2021). En este contexto, el tezontle, una roca volcánica porosa y abundante en la región centro de México, ha demostrado ser un sustituto viable de la grava convencional, no solo por su bajo peso específico, sino por sus propiedades térmicas, acústicas y su disponibilidad regional (Ramírez-López et al., 2021; Corral-Higuera et al., 2020).

Diversas investigaciones han demostrado que una proporción controlada de sustitución de grava por tezontle —en torno al 25%— permite mantener una resistencia mecánica adecuada para aplicaciones estructurales, al tiempo que se reduce significativamente la densidad del concreto (Villafuerte-Segura et al., 2021; López, 2017). No obstante, el tezontle, al ser un material de alta porosidad y absorción de agua, introduce nuevos retos técnicos en el diseño de mezclas y, particularmente, en el proceso de curado, etapa crítica para el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto. La hidratación del cemento, esencial para la formación de los productos responsables de la resistencia (como el C-S-H), depende en gran medida de la disponibilidad continua de agua durante los primeros días de fraguado (ACI 308R-16, 2016).

Así, surge la necesidad de investigar cómo se comporta un concreto estructural modificado con tezontle bajo diferentes métodos de curado. El curado por aspersión, el curado con membrana plástica y la ausencia de curado representan escenarios reales de obra que pueden influir significativamente en el desempeño mecánico del material. Estudios recientes han

evidenciado que el tipo de curado influye directamente en la capacidad del concreto para alcanzar su resistencia de diseño, siendo el curado con membrana uno de los métodos más efectivos para conservar la humedad interna, especialmente en mezclas con agregados absorbentes (González-Bernal et al., 2023; Pawar & Kate, 2020).

Este trabajo se enfoca en evaluar la resistencia a la compresión de un concreto estructural con sustitución del 25% de agregado grueso por tezontle, considerando los tres métodos de curado mencionados. La investigación se desarrolló bajo normativas nacionales e internacionales (NMX-C-404-ONNCCE-2016; ACI 211.5R-22; ASTM C39/C39M-23), garantizando la rigurosidad experimental y la validez técnica de los resultados.

El estudio no solo busca identificar el método de curado más adecuado para concretos con tezontle, sino también aportar conocimiento técnico que promueva el uso de materiales regionales sostenibles, reducir el consumo de recursos no renovables y contribuir a una construcción más ligera, económica y ambientalmente responsable. En regiones volcánicas como el estado de Hidalgo, donde el tezontle es abundante, su aprovechamiento racional puede representar una solución efectiva para el desarrollo de infraestructura con menores costos de transporte y mejores propiedades térmicas, beneficiando tanto a sectores urbanos como rurales (Muñoz-Vargas et al., 2023; Santa Cruz, 2019).

En síntesis, esta tesis plantea una contribución significativa al estudio del concreto ligero estructural con agregados volcánicos, evaluando empíricamente cómo el tipo de curado impacta su desempeño. A partir de esta investigación, se ofrecen recomendaciones prácticas para su aplicación en obra, fortaleciendo la adopción de tecnologías constructivas más sostenibles y adaptadas al contexto mexicano.

Capítulo 1. ANTECEDENTES

Desde la antigüedad, el concreto ha sido uno de los materiales más utilizados en la construcción por su versatilidad, resistencia y facilidad de moldeado. Las primeras evidencias de su uso se remontan al año 7000 a.C., en regiones como Israel y la antigua Yugoslavia, donde se han hallado pisos elaborados con mezclas primitivas de caliza calcinada (Mehta, 2000). Sin embargo, fue durante el Imperio Romano cuando el concreto adquirió un protagonismo arquitectónico sin precedentes. Ejemplo de ello es el Panteón de Roma, construido en el año 27 a.C., cuya cúpula de 44 metros de diámetro fue edificada con un tipo de concreto ligero que incluía piedra pómez como agregado, reduciendo así la carga muerta de la estructura (Rivera Villarreal, 1998).

En la actualidad, el concreto sigue siendo esencial en la edificación de obras civiles debido a su notable resistencia a la compresión, aunque presenta deficiencias frente a otros esfuerzos como la tracción o la flexión. Estas limitaciones han llevado al desarrollo del concreto armado, el cual combina el concreto con acero para mejorar su comportamiento estructural (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019).

Uno de los principales retos del concreto convencional es su elevado peso volumétrico, consecuencia directa de los agregados utilizados, especialmente el agregado grueso, como la grava triturada. Este peso incrementa significativamente las cargas permanentes en las estructuras, lo que implica mayores esfuerzos en elementos como columnas, vigas y cimentaciones (García et al., 2016). En este sentido, el desarrollo de concretos ligeros surge como una alternativa técnica y ambientalmente viable, ya que permiten reducir la densidad del material sin comprometer su resistencia mecánica.

El concreto ligero, definido como aquel con una densidad menor a 2000 kg/m³, ha sido objeto de diversas investigaciones en los últimos años. Su aplicación se extiende desde la prefabricación de elementos no estructurales hasta estructuras de carga moderada. Uno de los enfoques más relevantes ha sido la incorporación de materiales naturales de baja densidad, como las escorias volcánicas, entre las que destaca el tezontle, ampliamente disponible en regiones del centro de México (López, Torres-Castillo & Burciaga-Díaz, 2019).

El tezontle es una roca volcánica altamente porosa, ligera y con buenas propiedades térmicas y acústicas. Estas características lo convierten en un candidato idóneo para su uso como agregado grueso en la producción de concretos ligeros. Diversos estudios han demostrado que el tezontle puede reducir hasta en un 50% la densidad del concreto, mejorando al mismo tiempo

su comportamiento térmico y acústico (Ramírez, Díaz & Lozano, 2019). No obstante, su alta porosidad también representa un desafío, ya que puede afectar negativamente la resistencia a la compresión si no se ajusta adecuadamente la dosificación del diseño de mezcla (Vilca Olivera, 2022).

En México, existen antecedentes importantes sobre el uso de escorias volcánicas como agregados en el concreto. Rivera Villarreal (1998) documentó la fabricación de concreto sin finos utilizando piedra pómez como agregado grueso, obteniendo resultados positivos en términos de peso y resistencia. Estudios más recientes han explorado la incorporación del tezontle en proporciones parciales, encontrando que una sustitución del 25% puede mantener resistencias estructurales aceptables para elementos sometidos a cargas moderadas (Villafuerte-Segura et al., 2021).

Asimismo, investigaciones realizadas en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo han evidenciado que el uso de tezontle como sustituto parcial del agregado grueso puede favorecer la auto-hidratación del concreto debido a su estructura porosa, especialmente bajo métodos de curado con membrana (Villafuerte-Segura et al., 2021). Esto no solo mejora la resistencia del concreto, sino que también permite prácticas más sostenibles, al aprovechar materiales regionales y reducir el consumo de recursos naturales no renovables.

Bajo este contexto, el presente estudio se enfoca en analizar los efectos del curado en la resistencia a la compresión de concretos elaborados con grava volcánica (tezontle), utilizando tres métodos diferentes: curado por aspersión, curado con membrana plástica y sin curado. La finalidad es identificar cuál de estos métodos proporciona un mejor desempeño mecánico a distintas edades, considerando la influencia específica que la estructura del tezontle puede tener sobre la hidratación del concreto. Este enfoque no solo permite optimizar el comportamiento estructural del concreto ligero, sino que también promueve el aprovechamiento sostenible de materiales regionales en contextos donde los recursos hídricos o energéticos pueden ser limitados.

1.1. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación tiene importancia en el contexto actual de la ingeniería civil por abordar una problemática clave en la tecnología del concreto: la optimización del proceso de curado para concretos elaborados con agregados de origen volcánico, particularmente tezontle, como sustituto del agregado grueso convencional. Esta línea de estudio es fundamental no solo por el interés en reducir el peso propio de las estructuras, sino también por su impacto en la eficiencia estructural, la durabilidad del concreto, y la posibilidad de utilizar materiales regionales de bajo impacto ambiental.

El proceso de curado es determinante en el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto, especialmente su resistencia a la compresión, ya que influye directamente en el grado de hidratación del cemento. En concretos elaborados con agregados altamente porosos como el tezontle, el tipo de curado adoptado puede tener efectos significativos en el desempeño estructural del material (ACI, 2016; Fediuk et al., 2022). Así, la presente propuesta de investigación se fundamenta en analizar cómo distintos métodos de curado (aspersión, membrana plástica y sin curado) modifican el comportamiento de concretos fabricados con tezontle, con el fin de optimizar su desempeño.

Desde la perspectiva disciplinar, esta investigación genera conocimiento técnico relevante en el área de los materiales y procesos constructivos, en particular en la caracterización de concretos ligeros regionales. Aporta evidencia experimental sobre el comportamiento del concreto frente a diversas condiciones de curado, lo cual puede orientar criterios de diseño estructural, planificación de obra y normatividad para concretos no tradicionales.

Este estudio servirá a instituciones públicas y privadas vinculadas con la edificación y la infraestructura, como desarrolladoras de vivienda social, constructoras, organismos reguladores y despachos de ingeniería estructural. También representa una herramienta formativa para instituciones académicas, al fortalecer líneas de investigación en el uso de materiales regionales y técnicas constructivas sostenibles.

Los beneficiarios incluyen tanto a los profesionales del sector de la construcción, que podrán optimizar sus diseños estructurales, como a comunidades rurales o de difícil acceso, donde el uso de concretos más ligeros y de curado eficiente puede reducir costos de transporte, facilitar la colocación y mejorar la durabilidad de las edificaciones. Además, la reducción de cargas muertas puede tener un impacto positivo en los sistemas de cimentación y en la respuesta sísmica de las estructuras.

En cuanto a la factibilidad, la investigación se sustenta en varios elementos clave: la abundante disponibilidad de tezontle en la región centro de México, especialmente en zonas volcánicas como Cuautepec, Hidalgo; la infraestructura de laboratorio disponible en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; y la experiencia previa en trabajos similares por parte del equipo académico. Asimismo, estudios recientes han demostrado que el tezontle, adecuadamente dosificado y curado, puede alcanzar resistencias suficientes para aplicaciones estructurales (Villafuerte-Segura et al., 2021; Ramírez-López et al., 2021).

En este sentido, la propuesta de investigación es viable, relevante y oportuna, y se enmarca en los objetivos de una construcción más sostenible, regionalizada y técnicamente fundamentada.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia de distintos métodos de curado (curado por membrana, curado por aspersión y sin curado) sobre la resistencia a la compresión de un concreto estructural modificado

con grava volcánica (tezontle), con el fin de identificar el tratamiento más adecuado para optimizar su desempeño mecánico a distintas edades.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar mezclas de concreto estructural con una proporción fija del 25% de sustitución de agregado grueso convencional por tezontle, con base en estudios previos que respaldan su viabilidad técnica y mecánica.
- Someter especímenes de concreto al curado mediante tres métodos distintos (membrana, aspersión y sin curado), documentando las condiciones de aplicación y conservación.
- Evaluar la resistencia a la compresión de los cilindros elaborados a los 4, 7, 14, 20, 25 y 28 días, conforme a las normas técnicas ACI 211.5-14 y NMX-C-404-ONNCCE-2016.
- Comparar el comportamiento mecánico de los especímenes según el método de curado aplicado, determinando el porcentaje de resistencia alcanzado en cada caso con respecto al diseño de mezcla.
- Identificar las ventajas técnicas y constructivas del curado con membrana para concretos con agregados volcánicos, así como sus implicaciones en el desarrollo de prácticas sostenibles en regiones con disponibilidad de materiales naturales.

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto convencional es ampliamente utilizado en la industria de la construcción debido a su elevada resistencia a la compresión, durabilidad y adaptabilidad a distintas formas constructivas. Sin embargo, presenta desventajas importantes, entre ellas su peso elevado, el cual se deriva principalmente de la naturaleza densa de sus agregados gruesos, como la grava triturada (García et al., 2016). Este peso incrementa significativamente las cargas muertas sobre los elementos estructurales, lo que exige diseños más robustos y costosos en columnas, losas y cimentaciones.

Ante esta situación, el desarrollo de concretos estructurales ligeros ha cobrado relevancia en los últimos años, particularmente aquellos que incorporan materiales alternativos como los agregados volcánicos. En regiones como el centro de México, el uso del tezontle —una escoria volcánica porosa y ligera— se presenta como una alternativa viable al agregado convencional. Estudios previos han demostrado que su incorporación puede reducir significativamente la densidad del concreto, mantener una resistencia mecánica adecuada y mejorar sus propiedades térmicas y acústicas (Ramírez et al., 2019; López et al., 2019).

No obstante, una variable crítica en el desempeño final del concreto con agregados volcánicos es el método de curado empleado. El curado influye directamente en el proceso de hidratación del cemento, en la formación de la microestructura del material y, por ende, en su resistencia a la compresión. Dado que el tezontle presenta una alta absorción de agua, los métodos de curado convencionales pueden no ser suficientes para garantizar un desarrollo óptimo de las propiedades mecánicas del concreto (Villafuerte-Segura et al., 2021).

Actualmente, existe una brecha de conocimiento respecto al efecto comparativo de distintos métodos de curado (aspersión de agua, aplicación de membrana plástica y ausencia de curado) en concretos elaborados con este tipo de agregado. La elección del sistema de curado más adecuado podría ser decisiva no solo para alcanzar las resistencias mecánicas requeridas, sino también para permitir la implementación de concretos ligeros en zonas con acceso limitado a agua o infraestructura técnica.

En este contexto, resulta necesario desarrollar investigaciones que analicen el comportamiento de concretos estructurales ligeros elaborados con tezontle bajo distintos métodos de curado, con el fin de determinar cuál de ellos permite optimizar su resistencia a la compresión a lo largo del tiempo. El conocimiento generado permitirá establecer recomendaciones prácticas y técnicas para el uso eficiente de estos materiales en aplicaciones estructurales en regiones volcánicas y con recursos limitados.

1.5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué efecto tiene el tipo de curado (por aspersión, con membrana plástica o sin curado) en la resistencia a la compresión del concreto estructural elaborado con grava volcánica (tezontle) como agregado grueso?

1.6. HIPÓTESIS

El tipo de curado aplicado influye significativamente en la resistencia a la compresión del concreto estructural elaborado con grava volcánica (tezontle); específicamente, el curado con membrana plástica y el curado por aspersión permiten alcanzar mayores valores de resistencia a edades tempranas y finales, en comparación con el concreto sin curado.

2. MARCO TEÓRICO

El concreto ligero estructural se ha consolidado como una alternativa tecnológica eficiente en el ámbito de la construcción moderna, debido a su capacidad de reducir la carga muerta en estructuras sin sacrificar el desempeño mecánico. Se caracteriza por tener una densidad seca menor a 2000 kg/m^3 y una resistencia a la compresión mayor a 17 MPa, dependiendo del diseño de mezcla y de los materiales utilizados (ACI Committee 213, 2021). Esta tipología de concreto es ideal para aplicaciones en edificaciones de gran altura, elementos prefabricados, estructuras con exigencias sísmicas o térmicas específicas, y proyectos donde la ligereza y eficiencia estructural son aspectos clave (García-González et al., 2022).

Entre los componentes que definen el comportamiento del concreto ligero, el agregado grueso tiene un papel crucial. En años recientes, diversas investigaciones han explorado la viabilidad del uso de materiales naturales de origen volcánico, como el tezontle, en la elaboración de concretos estructurales ligeros. El tezontle es una roca ígnea porosa de origen volcánico, ampliamente disponible en la región centro de México. Su baja densidad (aproximadamente $1200\text{--}1300 \text{ kg/m}^3$) y alta porosidad lo convierten en un sustituto viable para la grava convencional en aplicaciones donde se requiere reducir el peso volumétrico del concreto (Flores-Salazar et al., 2021; Villafuerte-Segura et al., 2021).

Estudios recientes han documentado que el uso de tezontle puede reducir entre un 20% y 30% la densidad del concreto, sin comprometer su resistencia mecánica cuando se aplica en estructuras sometidas a cargas moderadas. Asimismo, el tezontle presenta propiedades adicionales, como resistencia al fuego, aislamiento térmico y acústico, y una buena integración con la matriz cementante, siempre y cuando se realicen ajustes adecuados en la dosificación y en el curado (Muñoz-Vargas et al., 2023; González-Bernal et al., 2023).

No obstante, uno de los factores que más influye en el desarrollo de la resistencia del concreto con agregados porosos es el tipo de curado aplicado. El curado tiene como función conservar la humedad interna de la mezcla durante las primeras etapas del fraguado y endurecimiento, permitiendo que las reacciones de hidratación del cemento se desarrollen de forma continua y completa (ACI 308R-16, 2016). En el caso del concreto con tezontle, la capacidad de este material para absorber y retener agua puede actuar como un mecanismo de curado interno, favoreciendo la hidratación incluso en condiciones ambientales adversas (Villafuerte-Segura et al., 2021; Fediuk et al., 2022).

Diversas investigaciones han comparado métodos tradicionales de curado como la aspersión continua de agua, el uso de membranas plásticas, y el curado nulo o natural, observando que los métodos que favorecen la retención de humedad —como las membranas o el curado húmedo— tienden a mejorar la resistencia a la compresión del concreto, particularmente en edades tempranas (7 y 14 días), mientras que el concreto sin curado puede presentar reducciones de hasta el 40% en su resistencia esperada (González-Bernal et al., 2023).

Estos hallazgos son relevantes en contextos donde el suministro de agua es limitado o donde las condiciones ambientales pueden afectar el proceso de curado convencional. Por ello, el análisis comparativo entre distintos métodos de curado en concretos fabricados con tezontle no solo aporta al conocimiento técnico del comportamiento de estos materiales, sino que también representa un paso importante hacia prácticas de construcción más sostenibles y adaptadas a las condiciones locales.

En resumen, el uso del tezontle como agregado grueso en concreto ligero estructural es una alternativa prometedora en regiones volcánicas de México. Sin embargo, su comportamiento final depende en gran medida del proceso de curado aplicado. El presente estudio se enmarca en esta línea de investigación, evaluando experimentalmente el impacto del tipo de curado sobre la resistencia a la compresión del concreto modificado, contribuyendo con ello a optimizar su uso técnico y constructivo.

2.1. Normativa para el diseño de un concreto ligero

En el contexto normativo mexicano, el diseño y evaluación del concreto ligero estructural está regido principalmente por la NMX-C-404-ONNCCE-2016, la cual define al concreto ligero como aquel cuya densidad aparente seca es menor a 2000 kg/m³. Esta norma establece especificaciones y métodos de prueba para verificar las propiedades físicas y mecánicas del material, incluyendo su resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, contenido de humedad y trabajabilidad (Secretaría de Economía, 2016).

Asimismo, la norma NMX-C-212-ONNCCE-2017 proporciona criterios para la utilización de cementos con adiciones minerales, como las escorias volcánicas, en la fabricación de concretos especiales. Esta normativa especifica los requisitos físico-químicos que deben cumplir los materiales cementantes, así como los procedimientos para su caracterización en laboratorio (Secretaría de Economía, 2017).

De forma complementaria, la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-RCDF-2023) publicada en el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México, incorpora recomendaciones sobre el uso de concretos ligeros y materiales sustentables. En esta normativa se establece que el empleo de agregados no convencionales debe ir acompañado de estudios de caracterización, control de calidad y cumplimiento de los parámetros estructurales exigidos para cada tipo de edificación (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

Por otro lado, a nivel internacional, documentos como el ACI 213R-21 del American Concrete Institute ofrecen una guía detallada sobre el diseño, producción y aplicación de concretos ligeros estructurales. Este documento clasifica los agregados ligeros en función de su origen (natural, industrial o artificial), y especifica su comportamiento esperado en mezclas estructurales, incluyendo recomendaciones de diseño y curado (ACI Committee 213, 2021).

En síntesis, la normativa vigente en México y a nivel internacional proporciona un marco técnico para garantizar que los concretos ligeros cumplan con las propiedades mecánicas y de durabilidad necesarias, siempre que los materiales utilizados —como el tezontle— sean evaluados y dosificados de acuerdo con estos lineamientos. La correcta interpretación y aplicación de estas normas es esencial para asegurar el desempeño estructural de las mezclas modificadas.

2.2. Escorias volcánicas como materiales alternativos

Las escorias volcánicas son rocas ígneas con una estructura altamente porosa que se forman durante las erupciones volcánicas. Su morfología irregular y su baja densidad (alrededor de 1300 kg/m³) las convierte en materiales atractivos para la fabricación de concretos livianos. En particular, el tezontle es una escoria de uso común en la zona centro de México, cuya abundancia y bajo costo han facilitado su aplicación en diversas formas constructivas (Ramírez-López et al., 2021).

Estudios recientes han demostrado que la porosidad de estas rocas contribuye al aislamiento térmico y acústico del concreto, reduciendo su conductividad térmica sin afectar significativamente su capacidad estructural cuando se emplea en proporciones adecuadas (Corral-Higuera et al., 2020). Sin embargo, esta misma porosidad puede influir negativamente en

la durabilidad del concreto si no se controla adecuadamente la absorción de agua y la dosificación de los materiales cementantes.

La resistencia a la compresión de concretos elaborados con escorias volcánicas puede ser entre un 10% y un 30% menor en comparación con concretos convencionales, pero con una adecuada optimización de la mezcla (contenido de cemento, relación agua/cemento y aditivos), se pueden alcanzar resistencias superiores a 25 MPa, suficientes para aplicaciones estructurales moderadas (Villafuerte-Segura et al., 2021).

2.3. Incorporación de escorias volcánicas al concreto

La incorporación de agregados volcánicos al concreto ha sido explorada principalmente en dos formas: como sustituto parcial o total del agregado grueso, y como adición puzolánica en polvo. En este estudio se considera su uso como sustituto grueso (25%, 50%, 75% y 100%) de la grava triturada, con el objetivo de obtener un concreto estructural con resistencia de diseño de 250 kg/cm².

Investigaciones recientes reportan que una sustitución de hasta el 50% por tezontle permite mantener propiedades mecánicas adecuadas para uso estructural, al tiempo que reduce la densidad del concreto en más del 20% y mejora su comportamiento frente a cambios térmicos (González-Bernal et al., 2023).

El uso del tezontle también ha demostrado ser favorable en procesos de auto-hidratación, debido a su capacidad para retener agua en su estructura porosa, lo que prolonga el proceso de curado interno y mejora la resistencia final del concreto (Villafuerte-Segura et al., 2021).

No obstante, es esencial realizar un ajuste fino en el diseño de la mezcla, dado que la absorción de agua del tezontle puede provocar problemas de trabajabilidad y fraguado si no se compensa adecuadamente. La inclusión de aditivos como superplastificantes o materiales suplementarios puede ayudar a mitigar estos efectos.

2.4. Limitaciones del uso de escorias volcánicas

- Si bien las escorias volcánicas ofrecen múltiples beneficios, también presentan ciertas desventajas que deben considerarse:
- Alta absorción: su estructura porosa incrementa el requerimiento de agua de la mezcla y puede provocar problemas de consistencia si no se ajusta adecuadamente (Fediuk et al., 2022).

-
- Variabilidad geológica: la composición del tezontle puede variar entre yacimientos, afectando la homogeneidad del concreto.
 - Durabilidad reducida: en ambientes altamente agresivos, el concreto con tezontle puede presentar mayor permeabilidad, lo que reduce su vida útil si no se protege adecuadamente (Corral-Higuera et al., 2020).
 - Resistencia a la abrasión: generalmente es menor que en concretos tradicionales, por lo que su uso no es recomendado en pavimentos industriales o zonas de alto tránsito (González-Bernal et al., 2023).
 - A pesar de estas limitaciones, su correcto tratamiento en laboratorio y la aplicación de tecnologías de mejora (como el curado interno o aditivos selladores) pueden maximizar su utilidad y desempeño.

2.5. Importancia del curado en concretos con agregados volcánicos

El proceso de curado en el concreto es una etapa fundamental para garantizar el desarrollo de las propiedades mecánicas y de durabilidad, especialmente en sus primeras edades. El curado permite la continuidad de las reacciones de hidratación del cemento, evitando la pérdida prematura de humedad en la mezcla, lo que puede conducir a un fraguado incompleto o a la aparición de fisuras superficiales. Este proceso cobra mayor relevancia cuando se utilizan agregados de alta porosidad, como el tezontle, ya que estos materiales tienden a absorber una porción significativa del agua de mezclado (ACI 308R-16, 2016).

La norma NMX-C-404-ONNCCE-2016, en su enfoque hacia concretos ligeros, establece que el curado debe realizarse bajo condiciones controladas para asegurar el cumplimiento de la resistencia a compresión especificada. Asimismo, el ACI 213R-21 y el ACI 308R-16 recomiendan el uso de técnicas específicas de curado en concretos con agregados livianos, dado que estos materiales suelen comportarse como reservorios de agua interna que pueden favorecer el fenómeno de curado interno (self-curing), aunque esto no exime de aplicar un tratamiento superficial adecuado.

En estudios recientes con concretos elaborados con tezontle, se ha observado que la elección del método de curado tiene un efecto notable en la resistencia a la compresión, particularmente en las primeras etapas (7 y 14 días). Por ejemplo, el uso de membranas plásticas para evitar la evaporación superficial ha demostrado ser más eficiente que el curado por aspersión en ambientes controlados, mientras que la ausencia total de curado puede disminuir la resistencia final hasta en un 40% (Villafuerte-Segura et al., 2021; González-Bernal et al., 2023).

Los tres métodos de curado comúnmente evaluados en estos casos son:

- Curado por aspersión de agua: consiste en mantener los especímenes húmedos mediante riegos frecuentes o inmersión parcial, lo que favorece el mantenimiento de humedad en la superficie del concreto.
- Curado con membrana plástica: implica recubrir los especímenes con una lámina impermeable que impide la evaporación del agua interna de la mezcla.
- Curado natural o sin tratamiento: se refiere a dejar los especímenes al ambiente sin medidas de retención de humedad, lo cual suele ser perjudicial para concretos con agregados porosos.

Estos métodos tienen implicaciones técnicas y logísticas distintas. Mientras el curado por aspersión requiere acceso continuo a agua y personal capacitado, el uso de membranas plásticas puede ser más práctico en zonas rurales o de difícil acceso. En ambos casos, se ha comprobado que los concretos con tezontle pueden beneficiarse de estos tratamientos si se realiza una adecuada compensación del contenido de agua y una selección cuidadosa del método (Ramírez-López et al., 2021).

Además, el uso de materiales como el tezontle puede propiciar un curado interno, ya que su estructura porosa permite almacenar agua que se libera gradualmente hacia la matriz cementante durante el fraguado. Este fenómeno, si se aprovecha correctamente, puede mejorar el grado de hidratación del concreto en las capas interiores, especialmente cuando el curado superficial es limitado o deficiente (Fediuk et al., 2022).

Por tanto, el análisis del efecto del curado en concretos con agregados volcánicos no solo contribuye al conocimiento técnico de estos materiales, sino que resulta fundamental para su implementación real en obra. La selección del método de curado adecuado puede representar la diferencia entre un concreto con desempeño óptimo y otro con deficiencias críticas en su resistencia o durabilidad.

3. METODOLOGÍA

El presente capítulo describe minuciosamente la metodología experimental empleada para la elaboración, curado y evaluación de especímenes cilíndricos de concreto estructural, en los que se realizó la sustitución parcial y total del agregado grueso convencional por escoria volcánica, específicamente grava roja de tezontle. Esta investigación busca analizar el efecto de diferentes métodos de curado sobre la resistencia a la compresión del concreto, en función de las proporciones de reemplazo del agregado grueso tradicional por tezontle.

La planificación y ejecución de esta investigación se desarrolló conforme a los lineamientos establecidos en las normas técnicas aplicables, entre las que destacan la NMX-C-404-ONNCCE-2016, que regula el diseño y evaluación del concreto ligero en México, la NMX-C-414-ONNCCE-2017 para materiales cementantes hidráulicos, así como los procedimientos internacionales contenidos en la norma ACI 211.5R-22 para el diseño de mezclas de concreto y la norma ASTM C39/C39M-23 para la realización de ensayos de compresión.

El objetivo de esta fase experimental fue evaluar el comportamiento del concreto a diferentes edades, considerando la influencia del tipo de curado en su desarrollo de resistencia mecánica.

La metodología desarrollada se organizó en las siguientes etapas:

- Selección y caracterización de los materiales: Se incluyó una descripción detallada del cemento, arena, grava y tezontle, señalando sus propiedades físico-mecánicas tales como peso específico, absorción de agua, tamaño máximo nominal y forma del grano. También se registró el origen de los materiales, siendo el tezontle proveniente de bancos de extracción ubicados en Cuauhtepic de Hinojosa, Hidalgo.
- Diseño de mezcla: A través de la metodología del ACI 211.5R-22 se determinaron las proporciones de materiales necesarias para obtener 1 m³ de concreto con resistencia estructural estándar. Se realizaron ajustes por contenido de humedad y absorción, especialmente relevantes en el caso del tezontle, dada su alta porosidad. La mezcla base (0% sustitución) sirvió como referencia para comparar el desempeño de las mezclas modificadas.
- Preparación y elaboración de mezclas: En esta fase se utilizaron herramientas manuales (palas, cucharones, moldes metálicos y varilla de compactación) y equipos como una mezcladora para homogeneizar los componentes. La mezcla fue evaluada por medio del

ensayo de revenimiento conforme a la NMX-C-156-ONNCCE-2010, con el fin de verificar su trabajabilidad.

- Métodos de curado: Se emplearon tres tipos de curado diferentes: curado por aspersión continua, curado mediante envoltura con membrana plástica, y sin curado (exposición a ambiente de laboratorio). Cada método se aplicó a un subconjunto de especímenes, con el objetivo de observar las diferencias en el desarrollo de resistencia a lo largo del tiempo.
- Ensayo de resistencia a la compresión: Finalmente, los cilindros fueron sometidos a compresión axial en una prensa hidráulica modelo CONTROLS 50-C43C04, conforme a la norma ASTM C39/C39M-23. Previo al ensayo, los especímenes fueron pesados y medidos para determinar su densidad y área de carga. Se aplicaron cabezales de neopreno para asegurar una distribución uniforme del esfuerzo sobre la superficie del cilindro.
- Registro y análisis de resultados: Se registraron las cargas máximas obtenidas en los ensayos, se analizaron los modos de falla y se calculó la resistencia a la compresión. Estos datos se compararon entre las diferentes proporciones de sustitución y entre los métodos de curado utilizados, permitiendo así identificar las combinaciones más eficientes en términos de desempeño mecánico.

El enfoque de esta metodología busca garantizar la reproducibilidad de los ensayos y asegurar que los resultados obtenidos reflejen fielmente la influencia del tipo de curado y la proporción de agregado volcánico en el comportamiento estructural del concreto. Asimismo, la aplicación rigurosa de normas técnicas nacionales e internacionales otorga validez técnica y científica al estudio.

3.1. Materiales y métodos

3.1.1. Cemento

El cemento utilizado en la elaboración de los especímenes fue un cemento Portland Compuesto tipo CPC 30 R RS, el cual cumple con los requisitos establecidos en la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017, referente a las especificaciones y métodos de ensayo de cementantes hidráulicos empleados en la industria de la construcción. Este tipo de cemento es adecuado para estructuras expuestas a ambientes con presencia de sulfatos, además de ofrecer alta resistencia inicial.

Con base en el cálculo de la dosificación para la producción de los 12 especímenes cilíndricos de concreto, se determinó que se requería un total de 29.0 kg de cemento. Para ello, se utilizó un saco de cemento marca Cruz Azul de 50 kg, previamente almacenado en condiciones secas y protegidas de la radiación solar directa, dentro del laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

La elección de este material se justifica por su disponibilidad, calidad controlada y por ser uno de los cementos más utilizados en estructuras convencionales y de tipo estructural ligero. La Tabla 3.1 presenta las propiedades físico-químicas del cemento utilizado, comparándolas con los valores establecidos en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017, garantizando así su idoneidad para el diseño de mezclas con una resistencia característica de $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del cemento CPC 30 R RS (Cruz Azul)

Propiedad	Requisito según NMX-C-414	Valor obtenido (Ficha técnica)
Tipo de cemento	CPC 30 R RS	CPC 30 R RS
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	—	4,390
% Retención en tamiz 325 (45 µm)	—	2.88
Expansión por sanidad (%)	≤ 0.80	0.01
Contracción por secado (%)	≤ 2.20	—
Tiempo de fraguado inicial (min)	≥ 45	160
Tiempo de fraguado final (min)	≤ 600	245
Resistencia a la compresión (1 día, MPa)	—	16.1
Resistencia a la compresión (3 días, MPa)	≥ 20	25.5
Resistencia a la compresión (7 días, MPa)	—	29.5
Resistencia a la compresión (28 días, MPa)	30 – 50	29.7
Expansión por sulfatos (1 año)	≤ 0.10	0.05

3.1.2. Agregado fino

Para la fabricación de los especímenes de concreto, se empleó como agregado fino arena caliza natural, suministrada dentro del mismo laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Se utilizó un volumen total de 0.04016 m³. Al momento del

diseño de la mezcla, se observó que la arena presentaba un estado húmedo, consecuencia de las precipitaciones ocurridas el día anterior. Por ello, fue necesario ajustar la cantidad de agua de mezcla de acuerdo con los lineamientos establecidos en la NMX-C-404-ONNCCE-2016, que contempla las correcciones por humedad en los agregados.

La arena se utilizó sin procesos adicionales de secado artificial, y fue manipulada en su estado húmedo natural. Conforme a lo estipulado en la NMX-C-486-ONNCCE-2014, se verificó que el material cumpliera con la granulometría adecuada, clasificándose mediante el tamiz No. 4 (4.75 mm) como se especifica para agregados finos empleados en concreto hidráulico.

Las propiedades físicas del material fueron determinadas previamente y se presentan en la Tabla 3.2. Estos parámetros son fundamentales para la correcta dosificación de la mezcla, especialmente el porcentaje de absorción, el peso específico y el contenido de vacíos, que influyen directamente en la trabajabilidad y resistencia del concreto.

Tabla 3.2. Propiedades físicas de la arena caliza utilizada

Propiedad	Valor obtenido	Norma de referencia
Peso específico	2.60 g/cm ³	NMX-C-486-ONNCCE-2014
Peso unitario	1,649.13 kg/m ³	NMX-C-083-ONNCCE-2014
Contenido de vacíos	35.82 %	ASTM C29/C29M-17a
Absorción	1.75 %	ASTM C128-15
Material que pasa tamiz 4	16.01 %	NMX-C-077-ONNCCE-2004

3.1.3. Agregado grueso

El agregado grueso utilizado en esta investigación fue grava triturada de origen calizo, obtenida del mismo laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Para la fabricación de los especímenes se utilizó un volumen total de 0.05829 m³. Sin embargo, previo a su uso, se identificó que el material presentaba contaminación por residuos

orgánicos y materiales de construcción, razón por la cual fue necesario someterlo a un proceso de cribado con malla de ½" (13 mm) y limpieza manual para garantizar su calidad.

Posteriormente, se realizó el cuarteo del material sobre una superficie limpia, a temperatura promedio ambiente ($\approx 19^\circ\text{C}$), con el fin de homogenizar el lote para su caracterización y uso en el diseño de mezcla. El agregado se dejó reposar durante un día para permitir la evaporación parcial de la humedad superficial.

Las propiedades físicas del agregado grueso fueron determinadas mediante ensayos de laboratorio siguiendo la normativa aplicable, particularmente la ASTM C127-15, para el cálculo de la absorción y peso específico de agregados gruesos. Estos datos son fundamentales para ajustar la relación agua/material cementante y asegurar la trabajabilidad del concreto. La Tabla 3.3 resume las propiedades físicas del agregado pétreo, necesarias para el diseño de mezcla conforme a la metodología del ACI 211.5R-22.

Tabla 3.3. Propiedades físicas del agregado grueso (grava caliza)

Propiedad	Valor obtenido	Norma de referencia
Peso específico relativo	2.60 – 2.70	ASTM C127-15
Peso volumétrico suelto	1.45 – 1.50 t/m ³	ASTM C29/C29M-17a
Peso volumétrico compactado	1.60 t/m ³	ASTM C29/C29M-17a
Porcentaje de absorción	2.00 %	ASTM C127-15
Porcentaje que pasa el tamiz No. 200	2.00 % máx.	NMX-C-077-ONNCCE-2004
Tamaño máximo nominal	1½" (38 mm)	NMX-C-404-ONNCCE-2016

3.1.4. Escoria volcánica (Tezontle)

La escoria volcánica empleada en esta investigación corresponde al tezontle rojo, un material de origen ígneo con estructura altamente porosa y textura angular, lo que le confiere propiedades adecuadas como agregado ligero para concreto estructural. Este material fue extraído de un banco ubicado en el municipio de Cuauhtepic de Hinojosa, Hidalgo, una región con amplia actividad geológica volcánica y yacimientos naturales de este tipo de roca.

Se utilizó un volumen total de 0.01458 m³ de tezontle, el cual fue transportado en seco y posteriormente sometido a caracterización física en laboratorio. Esta incluyó la determinación de su peso específico, absorción, densidad aparente y contenido de humedad, parámetros indispensables para su correcta incorporación en el diseño de mezclas de concreto hidráulico conforme a la ACI 211.5R-22 y la NMX-C-404-ONNCCE-2016.

Dada su alta capacidad de absorción, el tezontle puede retener agua dentro de su estructura, lo que puede afectar la relación agua/cemento, si no se realizan las correcciones correspondientes. Asimismo, su textura rugosa favorece la adherencia con la pasta cementante, aunque puede comprometer ligeramente la resistencia a la compresión si se utiliza sin control granulométrico ni diseño específico.

Las propiedades físicas obtenidas del material se resumen en la Tabla 3.4. Estos valores fueron utilizados en el diseño experimental para sustituir progresivamente el agregado grueso convencional en proporciones de 25%, 50% y 100%, buscando evaluar su desempeño mecánico dentro de un concreto estructural con $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 3.4. Propiedades físicas del tezontle rojo (escoria volcánica)

Propiedad	Valor obtenido	Norma de referencia
Peso específico relativo	1.20 g/cm ³	ASTM C127-15
Peso unitario suelto	1,200 kg/m ³	ASTM C29/C29M-17a
Peso unitario compactado	1,500 kg/m ³	ASTM C29/C29M-17a
Porcentaje de absorción	5.00 %	ASTM C127-15
Humedad superficial	1.70 %	NMX-C-404-ONNCCE-2016
Tamaño máximo nominal	1" (25 mm)	NMX-C-404-ONNCCE-2016
Forma y textura superficial	Angular / Porosa	---

El uso del tezontle como agregado alternativo no solo representa una solución técnica viable, sino que también favorece la sostenibilidad en la industria de la construcción, al aprovechar recursos regionales y reducir el peso volumétrico del concreto, lo que implica menores

cargas estructurales y ahorro en cimentaciones (Ramírez-López et al., 2021; Corral-Higuera et al., 2020).

3.1.5. Absorción de agua en el agregado grueso

Como parte de la caracterización de los materiales, se determinó el porcentaje de absorción de agua en los agregados gruesos, tanto para la grava triturada convencional como para el tezontle. Este parámetro es fundamental para ajustar la dosificación de agua en el diseño de mezclas, ya que influye directamente en la relación agua/cemento, afectando la trabajabilidad y resistencia del concreto.

El procedimiento se realizó conforme a lo establecido en la norma ASTM C127-15, la cual describe el método para determinar la densidad, densidad relativa (peso específico) y absorción de agua en agregados gruesos. El muestreo de los materiales se llevó a cabo siguiendo los lineamientos de la ASTM D75/D75M-14, que especifica la forma correcta de obtener muestras representativas y el uso del tamiz de 4.75 mm (No. 4) para separar el material de interés.

Una vez seleccionadas las muestras, se procedió a un lavado suave con agua limpia utilizando tamiz metálico de 3.75 mm (No. 6), con el fin de eliminar impurezas, polvo y materiales finos adheridos a la superficie de los agregados.

Posteriormente, las muestras fueron secadas en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C durante 24 horas, hasta alcanzar peso constante. Tras el secado, se dejaron reposar a temperatura ambiente durante 3 horas y se sumergieron completamente en agua potable por un periodo de 24 horas, asegurando su saturación.

Transcurrido este tiempo, se retiraron del agua y se secaron superficialmente con un paño húmedo para eliminar el exceso de agua libre. A continuación, se realizaron las pesadas correspondientes con una báscula digital para obtener:

- Masa en condición saturada
- Masa sumergida en agua
- Masa secada al horno

Con estos datos, se aplicaron las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3.1. Densidad relativa

$$\rho_{Relativa} = \frac{Masa\ secada\ al\ horno}{masa\ seca\ saturada - masa\ aparente\ en\ agua}$$

Ecuación 3.2. Porcentaje de absorción

$$Absorcion\ \% = \left(\frac{Masa\ saturada - masa\ secada\ al\ horno}{masa\ secada\ al\ horno} \right) \times 100$$

Donde:

- Masa secada al horno: Masa en estado seco después del horneado (g)
- Masa saturada: Masa después de 24 horas de inmersión (g)
- Masa sumergida en agua: Masa aparente del agregado en agua (g)

Este procedimiento se aplicó de forma paralela tanto para la grava como para el tezontle. Los resultados fueron utilizados para corregir la cantidad de agua en el diseño de mezcla, garantizando así la precisión en la relación agua/material cementante, especialmente importante en concretos con agregados de alta absorción como el tezontle.

3.1.6. Diseño de mezcla

El diseño de la mezcla se llevó a cabo conforme a la metodología propuesta en la norma ACI 211.5R-22, considerando una resistencia a la compresión objetivo de $f'_c = 250\text{ kg/cm}^2$, valor comúnmente utilizado para elementos estructurales en proyectos de vivienda y obra pública, según lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-RCDF, 2023).

Para este estudio se plantearon dos tipos de mezclas:

- Mezcla convencional, compuesta por cemento Portland CPC 30 R RS, arena caliza como agregado fino, y grava triturada caliza como agregado grueso.
- Mezcla modificada, en la cual se sustituyó parcialmente el 25% del volumen del agregado grueso por tezontle rojo de origen volcánico. La selección de esta proporción se basó en estudios previos que demostraron mejoras en la resistencia a la compresión al utilizar sustituciones parciales de agregados tradicionales por materiales porosos (López, 2017).

Las propiedades físicas de los materiales utilizados se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Propiedades de los agregados utilizados

Propiedad	Arena	Grava	Tezontle
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1,660	1,577	1,200
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1,770	1,677	1,500
Peso específico (kg/m ³)	2,750	2,610	1,200
% de absorción	5.70 %	2.80 %	5.00 %
Humedad superficial	2.50 %	1.70 %	1.70 %
Módulo de fineza	2.30	6.70	6.70
Tamaño máximo nominal	N.A.	1½"	1"

La ecuación de sustitución de agregados se aplicó según ACI 211.5R-22, considerando el reemplazo del 25% del volumen de grava por tezontle (ecuaciones 3.3 y 3.4):

Ecuación 3.3. Porción de grava sustituida
 $\text{Peso } \alpha = (A.G.01 \times 25) / 100$

Ecuación 3.4. Peso efectivo del agregado alternativo
 $\text{Peso Tezontle} = A.G.01 - \text{Peso } \alpha$

Donde:

A.G.01: Peso del agregado grueso convencional (grava)

Peso α : Porción de grava sustituida

Peso Tezontle: Peso efectivo del agregado alternativo

Una vez obtenidas las proporciones corregidas de agregados, se calcularon las correcciones por humedad y se ajustó la cantidad de agua efectiva, lo cual permitió definir las proporciones exactas de cada material para la fabricación de 1 m³ de concreto.

3.1.7. Elaboración de la mezcla

La preparación de la mezcla se realizó en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Se empleó cemento Portland Compuesto tipo CPC 30 R RS conforme a NMX-C-414-ONNCCE-2017. Los agregados fueron clasificados de acuerdo con NMX-C-486-ONNCCE-2014, y se utilizó agua potable proveniente de la red municipal.

Previo a su incorporación, los agregados gruesos fueron cribados con malla de $\frac{1}{2}$ " para eliminar impurezas, y posteriormente sometidos a un proceso de cuarteo sobre superficie limpia para asegurar la representatividad de la muestra (Figura 3.1).



Figura 3.1. Cuarteo de agregados gruesos

Los materiales fueron mezclados en una revolvedora de eje horizontal con capacidad para un saco de cemento (50 kg). El orden de introducción de los materiales se realizó conforme a la secuencia recomendada: 1) parte del agregado grueso, 2) agregado fino, 3) cemento, 4) agua y, finalmente, el resto del agregado grueso, permitiendo una mezcla homogénea (Figura 3.2).



Figura 3.2. Mezclado de componentes

Se verificó la consistencia de la mezcla mediante el ensayo de revenimiento utilizando el cono de Abrams conforme a NMX-C-156-ONNCCE-2020, obteniéndose un revenimiento de 12 cm (Figura 3.3).



Figura 3.3. Ensayo de revenimiento

3.1.8. Curado de especímenes

El curado del concreto es una etapa crítica en el desarrollo de sus propiedades mecánicas y de durabilidad, ya que influye directamente en la hidratación del cemento y en la formación de la microestructura interna del material. El control de humedad y temperatura durante los primeros días posteriores al vaciado es esencial para alcanzar la resistencia esperada. En esta investigación, se evaluó el comportamiento de concretos estructurales ligeros con incorporación

de tezontle bajo tres métodos de curado diferentes, con el propósito de determinar la influencia del tratamiento de curado sobre la resistencia a la compresión a distintas edades. La selección de los métodos se basó en las recomendaciones de la norma ACI 308R-16 y de la normativa ecuatoriana NEC-SE-HH (2015), considerando tanto condiciones controladas como escenarios que simulan la realidad constructiva en campo.

El proceso de curado se llevó a cabo conforme a la ACI 308R-16 y NEC-SE-HH (2015), aplicando tres métodos distintos con el objetivo de evaluar su efecto en el desarrollo de la resistencia mecánica del concreto:

1. Curado por aspersión:

Los especímenes fueron almacenados en un tanque cerrado cubierto con plástico y rociados con agua potable mediante un aspersor de 1.20 m de altura con caudal de 0.04 a 1.3 m³/h. La temperatura promedio del agua fue de 11 °C (Figura 3.4).



Figura 3.4. Sistema de aspersión para curado húmedo

2. Curado con membrana plástica:

Los cilindros fueron envueltos en película de polietileno transparente de 0.10 mm de espesor, colocados verticalmente en contenedores plásticos para evitar pérdida de humedad (Figura 3.5).



Figura 3.5. Cilindros envueltos en membrana plástica

3. Curado a temperatura ambiente (sin curado):

Los especímenes fueron almacenados en un área protegida dentro del laboratorio, sin contacto con la radiación solar directa, simulando condiciones reales de obra sin aplicación de curado.

Cada método se aplicó a 12 especímenes, y para cada grupo se programaron ensayos a las edades de 4, 7, 14, 20, 25 y 28 días.

3.1.9. Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es uno de los parámetros fundamentales para la evaluación del desempeño estructural del concreto, ya que constituye la propiedad mecánica más representativa para validar su calidad y aptitud en elementos portantes. Este ensayo permite cuantificar la capacidad del material para soportar cargas axiales sin sufrir fallas estructurales, y es indispensable para verificar si el concreto cumple con los requerimientos normativos establecidos en el diseño. En el presente estudio, los especímenes elaborados con distintas proporciones de tezontle como agregado grueso fueron sometidos a ensayos de compresión axial a edades definidas (4, 7, 14, 20, 25 y 28 días), de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM C39/C39M-23. Este procedimiento permitió identificar la evolución de la resistencia en función del tipo de curado aplicado y del tiempo de maduración del concreto.

Los cilindros fueron pesados y sus dimensiones registradas antes del ensayo. Se realizó el cabeceo con placas de neopreno y se colocaron en una prensa hidráulica marca CONTROLS, modelo 50-C43C04, conforme a la norma ASTM C39/C39M-23 (Figura 3.6).



Figura 3.6. Ensayo de resistencia a compresión en prensa hidráulica

El valor de carga máxima (kN) aplicado en el ensayo fue convertido a resistencia a compresión (kg/cm²) dividiendo entre el área efectiva del espécimen.

4. Resultados y discusión

Esta sección presenta los resultados obtenidos a partir del diseño experimental propuesto, así como el análisis crítico del comportamiento del concreto estructural elaborado con una proporción 75:25 de sustitución de grava por tezontle, bajo tres métodos distintos de curado: aspersión, membrana y ambiente natural. El objetivo fue evaluar cómo cada sistema de curado afecta el desarrollo de la resistencia a la compresión en distintas edades, considerando una mezcla diseñada para alcanzar un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$.

4.1. Proporciones del diseño de mezcla

Como parte fundamental del desarrollo experimental, el diseño de la mezcla constituye el punto de partida para evaluar el desempeño mecánico del concreto modificado con tezontle. En esta etapa se establecieron las cantidades exactas de cada componente, considerando las propiedades físicas de los materiales y las correcciones por humedad y absorción, especialmente relevantes debido a la alta porosidad del tezontle. A partir de estas proporciones, se produjeron las mezclas que permitieron fabricar los especímenes ensayados en esta investigación.

La Tabla 4.1 muestra las cantidades resultantes del diseño de mezcla conforme a la metodología ACI 211.5R-22, ajustadas para incluir un 25% de sustitución del agregado grueso por tezontle. Las proporciones reflejan los ajustes por peso específico, absorción y humedad de cada material.

Tabla 4.1. Promedio de resistencias en especímenes curados con aspersores.

Material	Peso (kg)	Proporción
Cemento	360.27	1.00
Arena	602.68	1.67
Grava	930.74	2.58
Tezontle	142.65	0.039
Agua	213.00	0.59

Este diseño permitió mantener la trabajabilidad y la consistencia del concreto dentro de los parámetros establecidos por la norma NMX-C-156-ONNCCE-2020, logrando un revenimiento de 12 cm, adecuado para elementos estructurales convencionales.

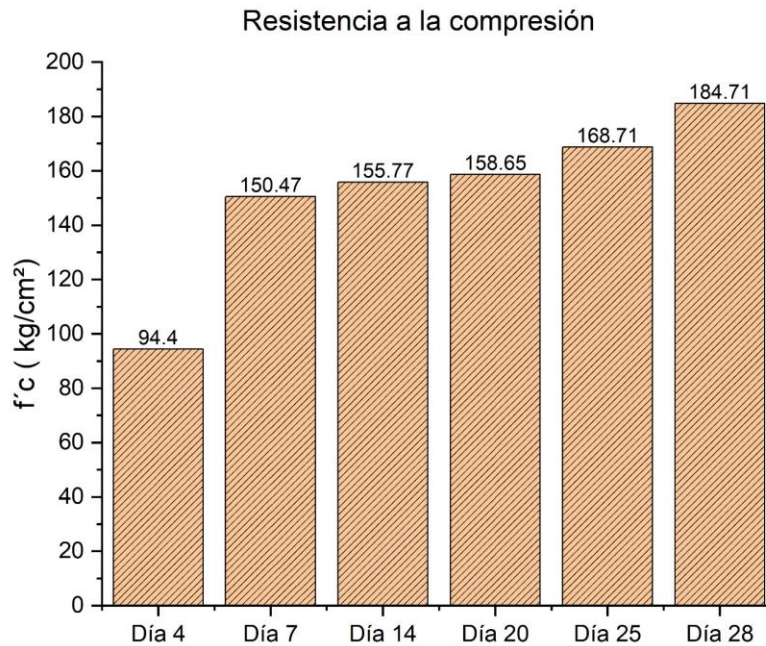
4.2. Ensaye de cilindros curados por aspersión

Una vez elaborados los especímenes, se procedió a aplicar los distintos métodos de curado para evaluar su efecto en la resistencia del concreto. El primero de estos fue el curado por aspersión, un procedimiento ampliamente utilizado en campo por su simplicidad y bajo costo. Este sistema busca mantener una humedad constante en la superficie del concreto mediante rociado continuo, favoreciendo la hidratación del cemento durante los primeros días críticos del fraguado. A continuación, se presentan los resultados obtenidos bajo este método (tabla 4.2).

Tabla 4.2. Promedio de resistencias en especímenes curados con aspersores.

Edad (días)	$f'c$ (kg/cm²)	(%) con base al diseño de 250 (kg/cm²)
4	94.4	37.76
7	150.47	60.19
14	155.77	62.31
20	158.65	63.46
25	168.71	67.47
28	184.71	73.88

Los resultados muestran un desarrollo progresivo de la resistencia a lo largo del tiempo (Gráfica 4.1). Aunque se alcanzó el 73.88% del $f'c$ a los 28 días, este valor está por debajo del umbral recomendado para concreto estructural, lo cual sugiere una hidratación incompleta.



Gráfica 4.1. Resistencias promedio en especímenes curados con aspersión

El exceso de agua superficial pudo haber saturado las porosidades del tezontle, impidiendo una óptima interacción cemento-agua en las capas internas del concreto (Villafuerte-Segura et al., 2021). Como señala Pawar y Kate (2020), el control de humedad en concretos con agregados porosos debe ser cuidadoso, ya que un exceso puede diluir la pasta cementante o crear zonas débiles.

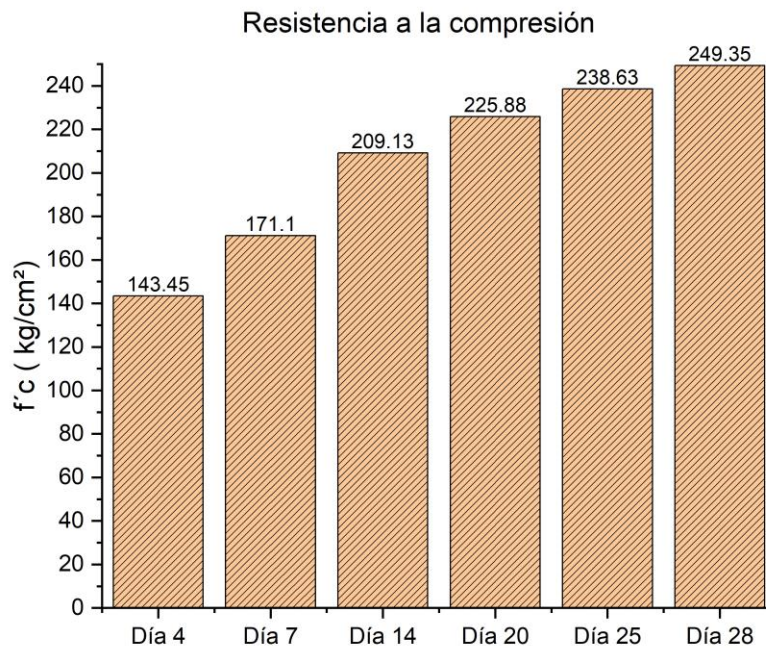
4.3. Ensayo de cilindros curados con membrana

El segundo método aplicado fue el curado mediante membrana plástica, el cual consiste en envolver los especímenes con una película que impide la evaporación del agua contenida en el concreto. Este sistema busca garantizar que la hidratación interna se desarrolle de manera eficiente, lo cual resulta especialmente útil en concretos con agregados porosos como el tezontle. A continuación, se muestran los resultados obtenidos por este método (tabla 4.3), destacando su influencia en la evolución de la resistencia a lo largo del tiempo.

Tabla 4.3. Promedio de resistencia en especímenes curados con membrana.

Edad (días)	$f'c$ (kg/cm ²)	(%) con base al diseño de 250 (kg/cm ²)
4	143.45	57.38
7	171.10	68.44
14	209.13	83.65
20	225.88	90.35
25	238.63	95.45
28	249.35	99.74

La evolución de la resistencia fue constante y superó el 90% del $f'c$ a los 20 días, alcanzando el valor esperado a los 28 días (Gráfica 4.2). Esto cumple con lo estipulado por las Normas Técnicas Complementarias para estructuras de concreto (RCDF, 2023).



Gráfica 4.2. Resistencias promedio en especímenes curados con membrana.

La membrana permitió una hidratación prolongada al evitar la pérdida de agua interna, lo cual favoreció la reacción química entre el agua y el cemento, incluso en presencia de tezontle (Aragón, 2015; Hassan et al., 2019). Estos resultados confirman estudios previos que indican que el curado con membrana mejora el desempeño de concretos con agregados ligeros (González-Bernal et al., 2023).

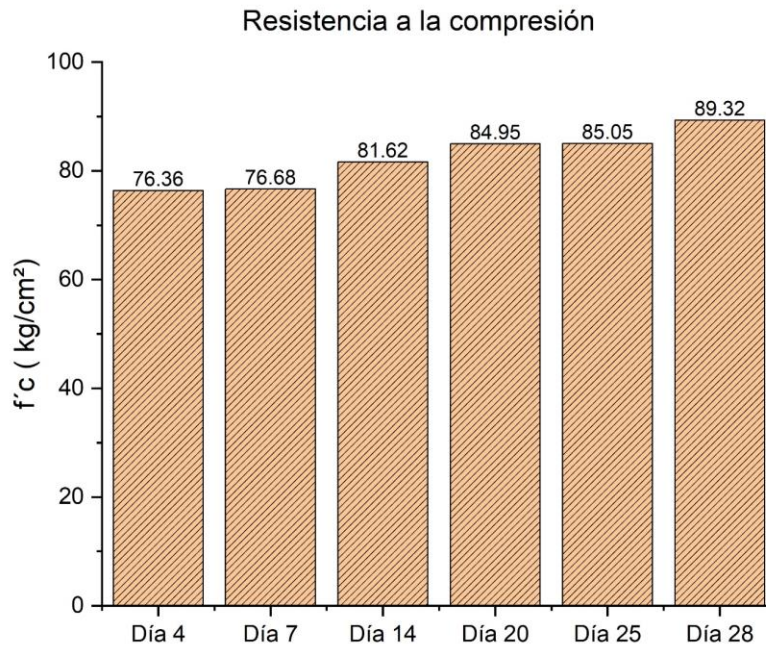
4.4. Ensaye de cilindros en condiciones ambientales

Con el propósito de contrastar los efectos de los sistemas de curado controlado, también se evaluó el comportamiento del concreto expuesto a condiciones ambientales sin ningún tratamiento adicional de conservación de humedad. Este escenario simula una situación común en obras donde no se aplican métodos adecuados de curado, lo que permite analizar las consecuencias de una hidratación deficiente, especialmente en materiales con alta capacidad de absorción. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en estos especímenes (tabla 4.4).

Tabla 4.4. Promedio de resistencia en especímenes sometidos a condiciones ambientales.

Edad (días)	$f'c$ (kg/cm²)	(%) con base al diseño de 250 (kg/cm²)
4	76.36	30.54
7	76.68	30.67
14	81.62	32.65
20	84.95	33.98
25	85.05	34.02
28	89.32	35.73

La resistencia se mantuvo baja y constante durante todo el periodo (Gráfica 4.3), sin superar el 36% del $f'c$ esperado.

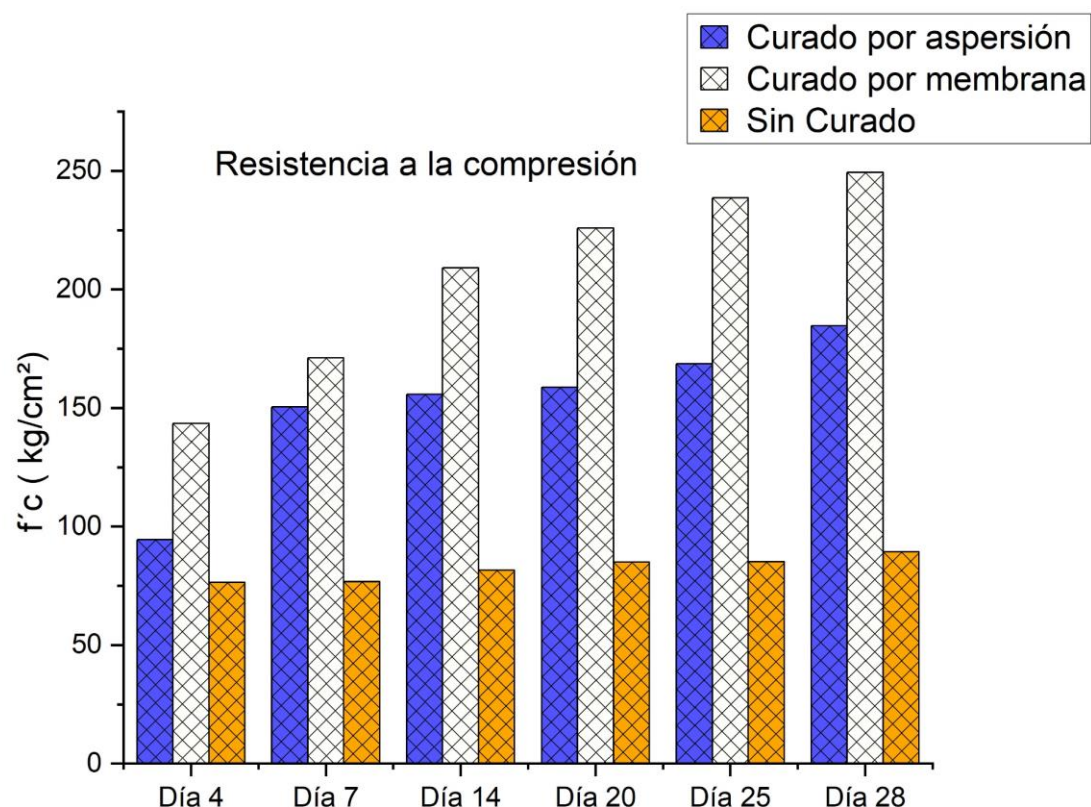


Gráfica 4.3. Resistencias promedio en especímenes sin curado.

La exposición directa provocó una evaporación prematura del agua de mezcla, impidiendo una hidratación adecuada del cemento. Como destaca Rodríguez (2016), este efecto es más crítico en concretos con agregados absorbentes, ya que la falta de curado impide la liberación paulatina de agua desde el agregado hacia la pasta cementante.

4.5. Comparación entre métodos de curado

Para facilitar el análisis integral del desempeño de los concretos evaluados, se realizó una comparación directa entre los resultados obtenidos bajo cada método de curado. Esta comparación permite identificar cuál de los sistemas proporciona mejores condiciones para el desarrollo de la resistencia en concretos modificados con tezontle, así como verificar el cumplimiento de los estándares normativos nacionales e internacionales. En esta sección se analizan las diferencias más significativas y se interpretan sus implicaciones técnicas (Gráfica 4.4).



Gráfica 4.4. Resistencias promedio de los distintos sistemas de curado.

Con base en los resultados obtenidos a lo largo de los ensayos de compresión, se realizó una comparación sistemática entre los tres métodos de curado empleados: aspersión, membrana plástica y exposición en condiciones ambientales. Esta comparativa tuvo como propósito analizar, por un lado, el desarrollo de la resistencia a la compresión de los especímenes en distintas edades; y por otro, contrastar los porcentajes obtenidos con los valores de referencia establecidos por la norma ASTM C1074-19, que sugiere las tasas de ganancia esperadas para concretos convencionales bajo condiciones de curado óptimas (ASTM, 2019).

- **Curado con membrana:**

Este método fue el que reportó los mejores resultados mecánicos, alcanzando un 99.74% de la resistencia de diseño ($f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$) a los 28 días. Desde los primeros 4 días, los especímenes curados con membrana mostraron un desarrollo acelerado y sostenido de resistencia, lo cual indica una hidratación continua y efectiva del cemento.

Este comportamiento se debe a que la membrana actúa como una barrera física que impide la evaporación del agua superficial, manteniendo condiciones óptimas de humedad interna para favorecer la reacción cemento-agua (ACI Committee 308, 2016). La eficacia de este método es aún más notoria en concretos con agregados de alta porosidad, como el tezontle, donde la retención de humedad es clave para la maduración adecuada del material (Hassan et al., 2019).

- **Curado por aspersión:**

Aunque este método proporcionó un entorno húmedo constante durante el proceso de fraguado, la resistencia alcanzada a los 28 días fue de 184.71 kg/cm², equivalente al 73.88% de la resistencia de diseño. Si bien la progresión de la resistencia fue continua, los valores no cumplieron con los niveles normativos establecidos por el ACI 301-20 ni por las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2023). Se considera que la eficacia de este método pudo verse comprometida debido a una sobresaturación en las oquedades del tezontle, lo cual limita la retención efectiva de agua dentro del material y reduce la eficiencia de la hidratación interna (Villafuerte-Segura et al., 2021). Además, las condiciones ambientales variables pueden afectar la uniformidad del curado por aspersión, lo cual explica la dispersión relativa observada en los valores obtenidos.

- **Curado en condiciones ambientales:**

Los especímenes que no fueron sometidos a ningún tipo de tratamiento de conservación de humedad mostraron el desempeño más deficiente, con una resistencia máxima de apenas 89.32 kg/cm² (35.73% de la resistencia de diseño) al día 28. Esta baja resistencia se asocia directamente a la deshidratación prematura del concreto, lo que impidió una hidratación adecuada del cemento. En este escenario, la porosidad del tezontle jugó un papel adverso, ya que facilitó la pérdida acelerada de humedad interna, comprometiendo la continuidad del proceso de fraguado (Santa Cruz, 2019). Tal comportamiento evidencia la importancia crítica del curado, especialmente en concretos con agregados ligeros y de alta absorción.

Al contrastar los resultados obtenidos con los valores teóricos propuestos por la norma ASTM C1074 y la ACI 301-20, se confirma que únicamente el curado con membrana fue capaz de seguir de manera cercana el perfil de ganancia de resistencia esperado para un concreto estructural. En particular, este método alcanzó más del 57% de su resistencia a los 4 días y superó el 90% a los 25 días, lo cual respalda su idoneidad técnica. Por el contrario, los métodos de aspersión y exposición ambiental no lograron cumplir con los estándares requeridos, destacando así la relevancia de implementar un sistema de curado eficiente y controlado en concretos modificados con agregados volcánicos.

4.6. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten evidenciar el comportamiento mecánico del concreto estructural ligero modificado con escoria volcánica (tezontle) en función del método de curado aplicado. En términos generales, se confirma que el tezontle, cuando se emplea como sustituto parcial del agregado grueso convencional en una proporción del 25%, representa una alternativa técnica viable y ambientalmente favorable, al reducir el peso volumétrico del concreto y aprovechar un material de origen regional, abundante y de bajo costo (López et al., 2019; Hassan et al., 2019).

Desde el punto de vista mecánico, el desempeño de los especímenes curados con membrana plástica fue significativamente superior. A los 28 días, estos cilindros alcanzaron el 99.74% de la resistencia de diseño ($f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$), evidenciando una hidratación eficiente durante todo el periodo de maduración. Este resultado se explica por la capacidad del sellado con membrana para evitar la pérdida prematura de humedad, creando un microambiente favorable para la continuidad de la reacción de hidratación del cemento (ACI Committee 308, 2016; Aragón, 2015). Esta condición es especialmente importante en concretos elaborados con agregados de alta porosidad, como el tezontle, que tienden a absorber agua rápidamente, pero también pueden favorecer la auto-hidratación interna si la humedad se conserva en el sistema (Santa Cruz, 2019; Villafuerte-Segura et al., 2021).

En contraste, el curado por aspersión, aunque mostró una progresión sostenida de la resistencia, no logró alcanzar los parámetros normativos establecidos. El hecho de que se haya mantenido un ambiente húmedo externo no garantizó que la humedad se conservara eficazmente dentro del concreto. De hecho, la sobresaturación de las cavidades del tezontle pudo haber generado un efecto contraproducente, limitando la retención útil de agua en la matriz y diluyendo la pasta cementante en sus primeras edades (Rodríguez, 2016). Esta situación sugiere que el método de curado por aspersión debe emplearse con especial precaución cuando se trabaja con agregados volcánicos de alta absorción.

Por su parte, los especímenes expuestos sin ningún tratamiento de curado presentaron el desempeño más bajo, alcanzando apenas un 35.73% de la resistencia esperada a los 28 días. Estos bajos valores se atribuyen a un proceso de endurecimiento prematuro, producto de la evaporación acelerada del agua de mezcla en las primeras horas después del vaciado. Este fenómeno impidió que se completara la hidratación del cemento, lo que derivó en una resistencia mecánica insuficiente y heterogénea. Además, las condiciones ambientales fluctuantes del laboratorio pudieron haber intensificado los efectos negativos sobre la maduración del concreto (García-González et al., 2022; Pawar & Kate, 2020).

Cabe destacar que el tezontle, como agregado volcánico de naturaleza porosa y textura rugosa, aporta beneficios adicionales al concreto, tales como una mejor adherencia con la pasta cementante, un menor peso volumétrico y una mayor capacidad de aislamiento térmico (Flores-Salazar et al., 2021). Sin embargo, su incorporación exige un control estricto del diseño de mezcla, especialmente en lo referente a la relación agua/cemento y al método de curado, ya que de ello depende su desempeño estructural a largo plazo.

Los resultados refuerzan la hipótesis de que el curado con membrana es el método más eficaz para asegurar un adecuado desarrollo de la resistencia mecánica en concretos modificados con tezontle. Este tipo de curado favorece una hidratación continua, reduce el riesgo de fisuración por retracción plástica y optimiza el aprovechamiento de la porosidad del agregado ligero. A la luz de estos hallazgos, se

recomienda el uso de curado con membrana como estrategia preferente en aplicaciones estructurales donde se utilicen agregados volcánicos, particularmente en climas secos o cálidos donde la pérdida de humedad superficial puede ser acelerada.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación permitió evaluar de forma integral el impacto de distintos métodos de curado sobre la resistencia a la compresión del concreto estructural elaborado con una sustitución parcial del 25% de agregado grueso convencional por tezontle rojo, una escoria volcánica de origen regional. Los resultados obtenidos permiten confirmar la viabilidad técnica y constructiva del uso de tezontle como componente alternativo en mezclas de concreto ligero, siempre que se acompañe de una adecuada selección del método de curado.

En primer lugar, se demostró que el método de curado con membrana plástica es el más eficiente para garantizar el desarrollo mecánico del concreto modificado. A los 28 días, los especímenes sometidos a este tratamiento alcanzaron el 99.74% de la resistencia de diseño ($f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$), superando los criterios mínimos establecidos en normativas como el ACI 301-20 y el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (RCDF, 2023). La envoltura con membrana impidió la evaporación superficial del agua, permitiendo una hidratación continua y uniforme, especialmente relevante en concretos con agregados de alta porosidad como el tezontle (ACI 308R-16, 2016; Hassan et al., 2019).

En contraste, el curado por aspersión, si bien mantuvo condiciones externas húmedas, no logró garantizar una retención suficiente de humedad en el interior de la mezcla. El exceso de agua superficial pudo haber generado una saturación de las oquedades del tezontle, reduciendo su capacidad de actuar como reservorio de curado interno. Como consecuencia, la resistencia a los 28 días alcanzó solo el 73.88% de la esperada, lo cual no satisface los estándares para uso estructural en obras civiles convencionales (Pawar & Kate, 2020; Villafuerte-Segura et al., 2021).

Por otro lado, los especímenes expuestos a condiciones ambientales sin curado mostraron el desempeño más deficiente, con una resistencia máxima de apenas 35.73% del f'_c . Este resultado pone en evidencia la importancia crítica del curado adecuado en concretos con agregados volcánicos, ya que la evaporación prematura del agua de mezcla impidió el desarrollo adecuado de la microestructura cementante. Estos hallazgos reafirman lo establecido por la literatura técnica, que advierte sobre la pérdida acelerada de resistencia y durabilidad en concretos sin curado, especialmente aquellos con agregados absorbentes (Rodríguez, 2016; Santa Cruz, 2019).

Adicionalmente, el estudio confirmó que el tezontle rojo, debido a su estructura porosa, textura angular y bajo peso específico, puede actuar como un agente de curado interno, favoreciendo la hidratación paulatina del cemento cuando se emplean métodos que conservan la humedad (como la membrana plástica). Esta propiedad aporta ventajas significativas en contextos con disponibilidad limitada de agua o en regiones donde el control del curado en obra es difícil de garantizar.

Desde una perspectiva ambiental y económica, el uso de tezontle representa una estrategia favorable para la sostenibilidad en la construcción, al reducir la extracción de gravas naturales, minimizar las cargas muertas en las estructuras y promover el uso de recursos regionales (Corral-Higuera et al., 2020; Ramírez-López et al., 2021). Sin embargo, su implementación exige una correcta caracterización física del material, ajustes precisos en la dosificación y, especialmente, la adopción de un método de curado que maximice su potencial como agregado ligero.

Finalmente, esta investigación aporta evidencia experimental que puede servir como base para futuras propuestas de actualización normativa y para el desarrollo de lineamientos técnicos en la implementación de concretos ligeros con agregados volcánicos. Se recomienda, con base en estos resultados, el uso preferente del curado con membrana plástica en obras que incorporen tezontle como agregado, especialmente en zonas áridas o con recursos limitados, donde la eficiencia del curado resulta crítica para garantizar la calidad estructural del concreto.

BIBLIOGRAFÍA

ACI Committee 213. (2021). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete (ACI 213R-21). American Concrete Institute.

ACI Committee 308. (2016). Guide to External Curing of Concrete (ACI 308R-16). American Concrete Institute.

Aragón, G. (2015). Manual del concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).

ASTM International. (2019). ASTM C1074-19: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2023). ASTM C39/C39M-23: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA.

Corral-Higuera, R., Peláez-Cruz, J., Gutiérrez-Padilla, M., & Acuña-Aguilar, J. (2020). Estudio de la resistencia térmica de concretos elaborados con tezontle como agregado. *Revista ALCONPAT*, 10(1), 1–12.

Fediuk, R., Smoliakov, A., & Lesovik, V. (2022). Influence of porous aggregates on strength and curing of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 56(2), 1020–1028.

Flores-Salazar, A., Rojas-Valencia, M., & Salinas-Velasco, M. (2021). Sustainable concrete with volcanic scoria for structural applications. *Construction and Building Materials*, 302, 124228.

García, J. A., Pérez, L. E., & Herrera, G. M. (2016). Comportamiento mecánico del concreto ligero estructural en zonas sísmicas. *Ingeniería Civil y Ambiental*, 9(2), 45–52.

García-González, J. A., Hernández-Bautista, J., & Luna-Hernández, J. (2022). Evaluación de métodos de curado en concreto ligero estructural. *Ingeniería Constructiva*, 11(1), 33–42.

Gobierno de la Ciudad de México. (2023). Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-RCDF). Secretaría de Obras y Servicios.

González-Bernal, J., Rodríguez-Jiménez, C., & Figueroa-Morales, M. (2023). Efecto del curado en concretos ligeros con agregados volcánicos. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 19(1), 87–99.

Hassan, M., Nasir, A., & Ahmed, A. (2019). Effectiveness of curing methods on compressive strength of concrete with lightweight aggregates. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(2), 245–256.

López, M. (2017). Evaluación del uso de tezontle como sustituto de grava en mezclas de concreto estructural. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

López, M., Torres-Castillo, R., & Burciaga-Díaz, O. (2019). Propiedades físico-mecánicas del concreto con agregado de tezontle. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(2), 145–153.

Mehta, P. K. (2000). *Concrete: Structure, Properties and Materials*. Prentice-Hall.

Muñoz-Vargas, H., Villafuerte-Segura, R., & Santa Cruz, A. (2023). Influencia del curado en concreto estructural con tezontle. *Memorias del Congreso de Ingeniería Aplicada*, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Pawar, S. D., & Kate, N. R. (2020). Comparative study of curing methods on strength of concrete with lightweight aggregates. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 9(8), 231–237.

Ramírez, H., Díaz, C., & Lozano, J. (2019). Comportamiento del concreto ligero con tezontle como agregado grueso. *Revista de Ingeniería Civil*, 29(3), 51–59.

Ramírez-López, R., Villalobos, J. R., & Salgado, M. (2021). Evaluación física y mecánica del tezontle para su uso como agregado. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería UASLP*, 15(2), 75–84.

Rivera Villarreal, R. (1998). *Tecnología del concreto*. Editorial Limusa.

Rodríguez, A. M. (2016). Efectos del curado en concretos con adiciones minerales. *Ingeniería Estructural*, 10(4), 117–124.

Santa Cruz, A. (2019). Uso de agregados volcánicos en mezclas de concreto para vivienda rural. *Boletín Técnico de Ingeniería Civil*, 8(1), 33–42.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2019). Normas para diseño de estructuras de concreto. Dirección General de Servicios Técnicos.

Secretaría de Economía. (2016). NMX-C-404-ONNCCE-2016: Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico – Clasificación de los Concretos Ligeros Estructurales. ONNCCE.

Secretaría de Economía. (2017). NMX-C-414-ONNCCE-2017: Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Ensayo. ONNCCE.

Villafuerte-Segura, R., Muñoz-Vargas, H., & Hernández, E. (2021). Estudio comparativo del comportamiento del concreto con tezontle bajo distintos métodos de curado. *Revista de Ingeniería Civil y Construcción Sustentable*, 5(2), 99–111.

ANEXOS



Designation: C1283 – 15 (Reapproved 2021)

Standard Practice for Installing Clay Flue Lining¹

This standard is issued under the fixed designation C1283; 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.

1. Scope

1.1 This practice covers the minimum requirements for installing clay flue lining for residential concrete or masonry chimneys.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are mathematical conversions to SI units that are provided for information only and are not considered 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.*

1.4 *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.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- C24 Test Method for Pyrometric Cone Equivalent (PCE) of Fireclay and High-Alumina Refractory Materials
- C27 Classification of Fireclay and High-Alumina Refractory Brick
- C55 Specification for Concrete Building Brick
- C90 Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units
- C99/C99M Test Method for Modulus of Rupture of Dimension Stone
- C129 Specification for Nonloadbearing Concrete Masonry Units
- C170/C170M Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee C04 on Vitrified Clay Pipe and is the direct responsibility of Subcommittee C04.20 on Methods of Test and Specifications.

Current edition approved April 1, 2021. Published April 2021. Originally approved in 1994. Last previous edition approved in 2015 as C1283 – 15. DOI: 10.1520/C1283-15R21.

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

- C199 Test Method for Pier Test for Refractory Mortars
- C216 Specification for Facing Brick (Solid Masonry Units Made from Clay or Shale)
- C270 Specification for Mortar for Unit Masonry
- C315 Specification for Clay Flue Liners and Chimney Pots
- C652 Specification for Hollow Brick (Hollow Masonry Units Made From Clay or Shale)
- C896 Terminology Relating to Clay Products

3. Terminology

3.1 *General*—Terminology C896 should be used for clarification of definitions in this practice.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *chimney connector*—tubular unit or pipe used to convey products of combustion from a heating or cooking appliance to the chimney.

3.2.2 *flue*—passageway within a chimney through which products of combustion are conveyed.

3.2.3 *flue liner*—manufactured tubular nonloadbearing fired clay unit, normally used for conveying hot gases in chimneys.

3.2.4 *masonry chimney*—vertical structure constructed of brick, concrete, concrete masonry units, or stone, which contains one or more flues, and conveys products of combustion from a heat source or cooking appliance.

3.2.5 *smoke chamber*—section of a fireplace above the throat and below the flue, which is an area of transition from the shape of the throat to the shape of the flue.

3.2.6 *thimble*—manufactured tubular nonloadbearing fired clay unit normally used to connect the chimney connector from an appliance through the wall of the chimney to the flue.

4. Footings and Foundations

4.1 Footings for masonry chimneys shall be constructed of concrete or solid masonry at least 12 in. (305 mm) thick, and it shall extend at least 6 in. (150 mm) beyond the face of the foundation or support wall on all sides. Footings shall be founded below frost depth on natural undisturbed earth or engineered fill. In areas not subjected to freezing, footings shall be founded at least 12 in. (305 mm) below finished grade.

4.2 The foundation shall be placed, with respect to adjacent structures existing or anticipated, to minimize the possibility of

damage by construction operations or by transmission of additional loads to the supporting soils.

4.3 Concrete footings and foundations shall conform to local building codes.

4.3.1 In the absence of a local building code, concrete with a minimum 28 day compressive strength of 3000 psi (21 MPa) shall be used.

4.4 Where a chimney or fireplace is added to the outside of the exterior wall of an existing structure, the following shall apply:

4.4.1 The new footing shall be installed at the same level or below the existing footing, provided the level is below the frost line and the new footing is placed on soil with adequate bearing capability.

4.4.2 The existing drainage provision shall not be obstructed.

5. Chimney Construction

5.1 *Materials:*

5.1.1 *Flue Linings*—Specification **C315**.

5.1.2 *Refractory Mortar*—Test Method **C24** (cone 10) and Test Method **C199** (medium duty and water insoluble).

5.1.3 *Concrete Block*—Specification **C90** or Specification **C129**.

5.1.4 *Brick*—Specification **C55** or Specification **C216**, Grade SW.

5.1.5 *Mortar*—Specification **C270**.

5.1.6 *Firebrick*—Classification **C27**.

5.1.7 *Natural Stone*—Test Method **C170/C170M** or Test Method **C99/C99M**.

5.2 The chimney consists of a flue liner and the chimney wall. When used to vent a fireplace, the chimney is constructed directly on the smoke chamber.

5.3 The flue lining shall start from a point not less than 8 in. (205 mm) below the entrance of the lowest chimney connector.

5.4 Flue liners shall be installed, each flue liner carefully bedded on the previous one, using water insoluble refractory mortar complying with Test Method **C199** (medium duty). All joints of flue liners shall be 1/16 in. (1.6 mm) to 1/8 in. (3.2 mm) thick, and struck flush so as to produce a straight, smooth, fully aligned flue. Liners shall be placed in such a manner as to minimize ledges or steps within the flue passageway.

5.5 Flue liners shall be maintained by filling any voids in the interior, or hot face, with medium duty water insoluble refractory mortar conforming to Test Method **C199**.

5.6 Flue liners shall be surrounded by masonry on all sides but shall not be bonded to the surrounding masonry. The flue liner shall contact the chimney wall only as necessary for support and alignment in order to permit the flue liner to expand and contract freely. The separation of the flue liner from the surrounding concrete or masonry shall not exceed the wall thickness of the flue liner. Where seismic reinforcing requires the space between the flue liner and the chimney wall to be grouted solid, the flue shall be wrapped with ceramic fiber paper capable of withstanding temperatures of 2100°F to prevent the flue liner from bonding to the chimney walls.

5.7 The flue lining shall extend the entire height of the chimney. The lining shall be carried up as vertically as possible. When offsets are necessary, their slopes shall be no flatter than 30° from vertical.

5.8 When more than one flue is contained in a chimney, a separation shall be provided between adjacent flues. The separation shall be solid masonry wythes (partitions) not less than 4 in. (100 mm) nominal thickness and bonded into the chimney walls.

5.9 Adjustments to the liner size or shape shall be made with a masonry saw.

5.9.1 When fabricating custom size flue liners, the aspect ratio shall not exceed 2:1 and the vertical joint shall be sealed with refractory mortar as required in **5.4**.

5.10 Openings in the flue liner for chimney connectors shall be manufactured or machine cut.

5.11 Chimney walls shall be constructed of concrete or solid masonry units at least 4 in. (100 mm) nominal thickness.

5.11.1 Products for chimney wall masonry construction are those (concrete, concrete masonry units, brick or stone) that are at least 75 % solid or grouted solid and which meet the requirements of Specification **C55**, Specification **C90**, Specification **C216** Grade SW, or Specification **C652**.

5.11.2 Cast in place concrete chimneys must be designed by an engineer.

5.12 The chimney shall be adequately anchored to the building to provide stability against wind and seismic loads. In seismic design categories, building codes may require additional anchoring or reinforcements.

5.13 The mortar in all joints exposed to weather shall be compacted and well tooled.

5.14 Masonry chimneys shall extend 3 ft (0.92 m) above the highest point of the structure where chimneys pass through a roof of a building and at least 2 ft (0.61 m) above any location of any structure within 10 ft (3.1 m) (measured horizontally from the vertical centerline chimney line).

6. Clearances

6.1 The minimum air space clearance between interior masonry chimneys and combustible materials shall be 2 in. (51 mm). Any chimney with at least one interior wall shall be treated as interior.

6.2 The minimum air space clearance between exterior masonry chimneys and combustible materials shall be 1 in. (25 mm).

6.3 Exposed combustible trim and the edges of sheathing materials, such as wood siding and flooring, shall be permitted to abut the masonry chimney provided the chimney walls abutting the combustibles are constructed of solid masonry a minimum of 8 in. (205 mm) thick.

6.4 All spaces between chimneys and floors, ceilings or roofs through which chimneys pass shall be filled with non-combustible insulation or fireblocked with noncombustible material. The fireblocking of spaces between chimneys and wood joists, beams, or headers shall be self-supporting or be

placed on strips of metal or metal lath laid across the spaces between combustible material and the chimney.

7. Openings For Chimney Connections

7.1 The chimney connection shall be made by either a metal or clay thimble. The thimble shall be installed on a $\frac{1}{4}$ in. (6.4 mm) per foot slope toward the appliance. This is to allow any liquid creosote to drain back into the appliance for reburning.

7.2 A minimum of 12 in. (305 mm) of solid masonry, or a combination of 4 in. (100 mm) solid masonry and 2 in. (51 mm) air space shall be provided between clay thimbles and combustible materials.

7.3 The thimble shall pass through the flue lining and be flush with the inside of the flue lining or butted to the outside of the flue liner. The joint between the thimble and the flue lining shall be sealed with a refractory mortar.

7.4 The opening for a flue pipe connection shall be positioned to maintain the clearances from combustible construction, as specified in Section 6.

7.5 The stovepipe shall be positioned so that horizontal movement will not cause it to back out of the thimble or protrude into the flue.

8. Chimney Caps

8.1 All masonry chimneys shall have a chimney cap that slopes a minimum of 10° downward from the flue liner to the edge of the chimney cap (see Fig. 1).

8.2 Chimney caps shall overhang the chimney wall by a minimum of 2 in. (51 mm).

8.3 Chimney caps are of the following types and construction:

8.3.1 Precast or cast-in-place concrete caps shall be a minimum of 2 in. (51 mm) in thickness, shall have a drip slot on the underside at least $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm) away from the

chimney wall, and shall be reinforced with a minimum of $\frac{1}{2}$ in. (13 mm) mesh galvanized hardware cloth located halfway into the filled form.

8.3.2 Metal chimney caps must lap down the chimney wall at least 4 in. (100 mm) and a noncombustible resilient sealant shall be used between the metal cap and the flue liner and between the base of the metal cap and the chimney.

8.3.3 Stone caps shall be a minimum of 2 in. (51 mm) in thickness and shall have a drip slot on the underside at least $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm) away from the chimney wall.

8.4 Chimney caps shall be separated from the flue lining by a bond break, and this separation shall be sealed with a noncombustible resilient sealant to prevent water entering the chimney. This is a maintenance joint and should be checked and renewed as needed (see Fig. 1).

8.5 Clay flue linings shall extend above the chimney cap by not more than 4 in. (100 mm).

8.6 Where a clay chimney pot is installed on a masonry chimney, the chimney pot shall comply with the requirements of Specification C315.

9. Special Conditions

9.1 Special features to mitigate any problem relating to condensation shall be permitted in the construction of chimneys.

9.1.1 Flue liners with joints that prevent leakage of condensation shall be permitted. Socketed and overlapping joints manufactured as an integral part of the flue liner are acceptable.

9.1.2 A condensate drain installed at the base of the chimney shall be permitted.

10. Keywords

10.1 chimney; chimney caps; clay; fireplace; flue liner; flue lining; masonry; venting

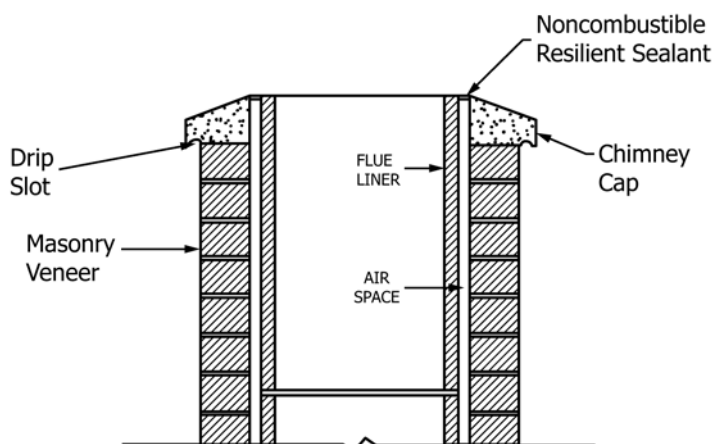


FIG. 1 Chimney Cap

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/>



Designation: C31/C31M – 25a

Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field¹

This standard is issued under the fixed designation C31/C31M; 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 practice covers procedures for making and curing cylinder and beam specimens from representative samples of fresh concrete for a construction project.

1.2 This practice is not intended for making specimens from concrete not having measurable slump or requiring other sizes or shapes of specimens.

1.3 This practice is not applicable to lightweight insulating concrete or controlled low strength material (CLSM).

NOTE 1—Test Method C495/C495M covers the preparation of specimens and the determination of the compressive strength of lightweight insulating concrete. Test Method D4832 covers procedures for the preparation, curing, transporting and testing of cylindrical test specimens of CLSM.

1.4 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.

1.5 *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—Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to exposed skin and tissue upon prolonged exposure.²)*

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

1.7 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standard-*

ization 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.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- C94/C94M Specification for Ready-Mixed Concrete
- C125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C138/C138M Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete
- C143/C143M Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
- C172/C172M Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete
- C173/C173M Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method
- 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
- C330/C330M Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete
- C403/C403M Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance
- C470/C470M Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically
- C495/C495M Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete
- C511 Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes
- C617/C617M Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens
- C1064/C1064M Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete

¹ This practice 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 Feb. 15, 2025. Published March 2025. Originally approved in 1920. Last previous edition approved in 2025 as C31/C31M–25. DOI: 10.1520/C0031_C0031M-25A.

² See Section on Safety Precautions, Manual of Aggregate and Concrete Testing, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02.

³ 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



- C1077** Practice for Agencies Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Testing Agency Evaluation
- C1611/C1611M** Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete
- C1758/C1758M** Practice for Fabricating Test Specimens with Self-Consolidating Concrete
- D4832** Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Cylindrical Test Specimens

3. Terminology

3.1 Definitions:

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

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *acceptance test specimens, n*—standard-cured test specimens intended for evaluating whether the supplied concrete complies with the specification.

3.2.2 *field curing, n*—storing test specimens in the field under an environmental temperature and moisture environment similar to the in-place concrete.

3.2.3 *initial curing, n*—the storage of test specimens in the field after casting and before transporting the specimens to the laboratory.

3.2.3.1 *Discussion*—Initial curing covers the time period from molding to transporting the test specimens.

3.2.4 *initial standard-curing temperature, n*—temperature of the environment surrounding the specimen during initial standard curing.

3.2.4.1 *Discussion*—The environment surrounding standard-cured test specimens may be air, water, or damp sand. The temperature of the environment surrounding standard-cured test specimen might not be the same as the concrete temperature.

3.2.5 *standard curing, n*—storing test specimens in an environment of a specified temperature range, and under conditions that control the loss of moisture from the test specimens while the test specimens are in the field and while in the laboratory.

3.2.5.1 *Discussion*—Standard curing is intended to reduce the influence of variations by standardizing the temperature and moisture environment on the strength development of test specimens. Standard curing includes requirements for the curing environment while the test specimens are in the field (10.1.2) and while the test specimens are in the laboratory (10.1.3).

4. Significance and Use

4.1 This practice provides standardized requirements for making, and curing test specimens in the field. This practice also provides requirements for transporting test specimens to the laboratory, and for curing test specimens in the laboratory. Depending on their purpose, test specimens are either standard-cured, or field-cured.

4.2 Uses of the test results of standard-cured test specimens include the following purposes:

4.2.1 Acceptance testing for specified concrete strength,

NOTE 2—Specification **C94/C94M** requires compressive-strength test specimens for acceptance to be standard-cured.

4.2.2 Checking adequacy of mixture proportions for concrete strength, and

4.2.3 Quality control.

4.3 Uses of test results of field-cured test specimens include the following purposes:

4.3.1 Estimation of the in-place concrete strength,

4.3.2 Comparison with test results of standard-cured specimens or with test results from various in-place test methods,

4.3.3 Adequacy of curing and protection of concrete in the structure,

4.3.4 Form or shoring removal time requirements, or

4.3.5 Post-tensioning.

5. Apparatus

5.1 *Molds, General*—Molds for specimens or fastenings thereto in contact with the concrete shall be made of steel, cast iron, or other nonabsorbent material, nonreactive with concrete containing portland or other hydraulic cements. Molds shall hold their dimensions and shape under all conditions of use. Molds shall be watertight during use as judged by their ability to hold water poured into them. Provisions for tests of water leakage are given in the Test Methods for Elongation, Absorption, and Water Leakage section of Specification **C470/C470M**. A suitable sealant, such as heavy grease, modeling clay, or microcrystalline wax shall be used where necessary to prevent leakage through the joints. Positive means shall be provided to hold base plates firmly to the molds. Reusable molds shall be lightly coated with mineral oil or a suitable nonreactive form release material before use.

5.2 *Cylinder Molds*—Molds for casting concrete test specimens shall conform to the requirements of Specification **C470/C470M**. Cardboard cylinder molds shall not be used for standard-cured specimens.

5.3 *Beam Molds*—Beam molds shall be of the shape and dimensions required to produce the specimens stipulated in **6.2**. The inside surfaces of the molds shall be smooth. The sides, bottom, and ends shall be at right angles to each other and shall be straight and true and free of warp. Maximum variation from the nominal cross section shall not exceed 3 mm [$\frac{1}{8}$ in.] for molds with depth or breadth of 150 mm [6 in.] or more. Molds shall produce specimens at least as long but not more than 2 mm [$\frac{1}{16}$ in.] shorter than the required length in **6.2**.

5.4 *Tamping Rod*—A round, smooth, straight, steel rod with a diameter conforming to the requirements in **Table 1**. The length of the tamping rod shall be at least 100 mm [4 in.] greater than the depth of the mold in which rodding is being

TABLE 1 Tamping Rod Diameter Requirements

Diameter of Cylinder or Width of Beam mm [in.]	Diameter of Rod mm [in.]
<150 [6]	10 ± 2 [$\frac{3}{8}$ ± $\frac{1}{16}$]
≥150 [6]	16 ± 2 [$\frac{5}{8}$ ± $\frac{1}{16}$]



performed, but not greater than 600 mm [24 in.] in overall length. The rod shall have the tamping end or both ends rounded to a hemispherical tip of the same diameter as the rod.

5.5 *Vibrators*—External and internal vibrators, if used, shall meet the requirements found in Practice C192/C192M.

5.6 *Mallet*—A mallet with a rubber or rawhide head weighing $0.6 \text{ kg} \pm 0.2 \text{ kg}$ [$1.25 \text{ lb} \pm 0.50 \text{ lb}$] shall be used.

5.7 *Placement Tools*—of a size large enough so each amount of concrete obtained from the sampling receptacle is representative and small enough so concrete is not spilled during placement in the mold. For placing concrete in a cylinder mold, the acceptable tool is a scoop. For placing concrete in a beam mold, either a shovel or scoop is permitted.

5.8 *Finishing Tools*—a handheld float or a trowel.

5.9 *Slump Apparatus*—The apparatus for measurement of slump shall conform to the requirements of Test Method C143/C143M.

5.10 *Sampling Receptacle*—The receptacle shall be a suitable heavy gauge metal pan, wheelbarrow, or flat, clean nonabsorbent board of sufficient capacity to allow easy remixing of the entire sample with a shovel or trowel.

5.11 *Air Content Apparatus*—The apparatus for measuring air content shall conform to the requirements of Test Methods C173/C173M or C231/C231M.

5.12 *Temperature Measuring Devices*—The temperature measuring devices shall conform to the applicable requirements of Test Method C1064/C1064M.

6. Testing Requirements

6.1 *Cylindrical Specimens*—Compressive or splitting-tensile-strength specimens shall be cylinders cast and allowed to set in an upright position. The cylinder diameter shall be at least 3 times the nominal maximum size of the coarse aggregate. The length of the cylinder shall be twice the diameter of the cylinder. If the nominal maximum size of the aggregate is 37.5 mm [$1\frac{1}{2}$ in.] or larger, acceptance test specimens for compressive strength shall be 150 mm by 300 mm [6 in. by 12 in.] cylinders. If the nominal maximum size of the aggregate is less than 37.5 mm [$1\frac{1}{2}$ in.], acceptance test specimens for compressive strength shall be either 150 mm by 300 mm [6 in. by 12 in.] cylinders or 100 mm by 200 mm [4 in. by 8 in.] cylinders.

NOTE 3—See 7.2 for concrete containing coarse aggregate larger than 50 mm [2 in.] nominal maximum size.

NOTE 4—If molds in SI units are required and not available, molds of equivalent size in inch-pound units should be permitted. If molds in inch-pound units are required and not available, molds of equivalent size in SI units should be permitted.

TABLE 2 Minimum Cross-Sectional Dimension of Beams

Nominal Maximum Aggregate Size (NMAS)	Minimum Cross-Sectional Dimension
$\leq 25 \text{ mm}$ [1 in.]	100 mm by 100 mm [4 in. by 4 in.]
25 mm [1 in.] < NMAS $\leq 50 \text{ mm}$ [2 in.]	150 mm by 150 mm [6 in. by 6 in.]

6.2 *Beam Specimens*—Flexural strength specimens shall be beams of concrete cast and hardened in the horizontal position. The length shall be at least 50 mm [2 in.] greater than three times the depth as tested. The ratio of width to depth as molded shall not exceed 1.5.

6.2.1 The minimum cross-sectional dimension of the beam shall be as stated in Table 2. Unless otherwise specified, the standard beam shall be 150 mm by 150 mm [6 in. by 6 in.] in cross section.

6.2.2 When the nominal maximum size of the coarse aggregate exceeds 50 mm [2 in.], the concrete sample shall be treated by wet sieving through a 50 mm [2 in.] sieve as described in Practice C172/C172M.

6.2.3 The same specimen size shall be used for comparing results and for mixture qualification and acceptance testing.

NOTE 5—The modulus of rupture can be determined using different specimen sizes. However, measured modulus of rupture generally increases as specimen size decreases.^{4,5} The strength ratio for beams of different sizes depends primarily on the maximum size of aggregate.⁶ Experimental data obtained in two different studies have shown that for maximum aggregate size between 19.0 mm and 25.0 mm [$\frac{3}{4}$ in. and 1 in.], the ratio between the modulus of rupture determined with a 150 mm by 150 mm [6 in. by 6 in.] and a 100 mm by 100 mm [4 in. by 4 in.] may vary from 0.90 to 1.07⁴ and for maximum aggregate size between 9.5 mm and 37.5 mm [$\frac{3}{8}$ in. and $1\frac{1}{2}$ in.], the ratio between the modulus of rupture determined with a 150 mm by 150 mm [6 in. by 6 in.] and a 115 mm by 115 mm [4.5 in. by 4.5 in.] may vary from 0.86 to 1.00.⁵

6.3 *Field Technicians*—The field technicians making and curing specimens for acceptance testing shall meet the personnel qualification requirements of Practice C1077.

7. Sampling Concrete

7.1 Sample the concrete in accordance with Practice C172/C172M after all adjustments, including water and admixture additions, have been made.

7.2 If the nominal maximum size of the coarse aggregate exceeds 50 mm [2 in.], wet sieve the concrete sample through a 50 mm [2 in.] sieve as described in Practice C172/C172M.

7.3 Record the identification of the sample with respect to the location of the concrete represented and the time of casting.

8. Fresh Concrete Tests

8.1 Perform the following tests for each sample of concrete from which specimens are made for acceptance testing for strength:

⁴ Tanesi, J.; Ardani, A. Leavitt, J. "Reducing the Specimen Size of Concrete Flexural Strength Test (AASHTO T97) for Safety and Ease of Handling," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2342, Transportation Research Board of National Academies, Washington, D.C., Carrasquillo, P.M. and Carrasquillo, R. L. "Improved Concrete Quality Control Procedures Using Third Point Loading", *Research Report 119-1F*, Project 3-9-87-1119, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, November 1987.

⁵ Carrasquillo, P.M. and Carrasquillo, R. L. "Improved Concrete Quality Control Procedures Using Third Point Loading", *Research Report 119-1F*, Project 3-9-87-1119, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, November 1987.

⁶ Bazant, Z. and Novak, D. "Proposal for Standard Test of Modulus of Rupture of Concrete with its Size Dependence," *ACI Materials Journal*, January-February 2001.

8.1.1 *Slump or Slump Flow*—After remixing the sample in the receptacle, measure and record the slump or slump flow in accordance with Test Method **C143/C143M** or Test Method **C1611/C1611M**, respectively.

8.1.2 *Air Content*—Determine and record the air content in accordance with either Test Method **C173/C173M** or Test Method **C231/C231M**. The concrete used in performing the air content test shall not be used in fabricating test specimens.

8.1.3 *Temperature*—Determine and record the temperature in accordance with Test Method **C1064/C1064M**.

NOTE 6—Some specifications may require the measurement of the unit weight of concrete. The volume of concrete produced per batch may be desired on some projects. Also, additional information on the air content measurements may be desired. Test Method **C138/C138M** is used to measure the unit weight, yield, and gravimetric air content of freshly mixed concrete.

9. Casting Specimens

9.1 *Place of Casting*—Cast specimens on a level, rigid surface, free of vibration and other disturbances. Cast specimens as near as practicable to the specimens' storage location.

9.2 *Self-Consolidating Concrete*—If casting a specimen of self-consolidating concrete, use the mold filling procedure in Practice **C1758/C1758M** instead of the procedures in 9.3 (for cylinders) and 9.4 (for beams). After filling the mold, finish the specimen in accordance with 9.6, without further consolidation.

9.3 *Casting Cylinders*—Select the proper tamping rod from 5.4 and Table 1 or the proper vibrator from 5.5. Determine the method of consolidation from Table 3, unless another method is specified. If the method of consolidation is rodding, determine requirements from Table 4. If the method of consolidation is vibration, determine requirements from Table 5. Select a scoop of the size described in 5.7. While placing the concrete in the mold, move the scoop around the perimeter of the mold opening to ensure an even distribution of the concrete with minimal segregation. Each layer of concrete shall be consolidated as required. In placing the final layer, add an amount of concrete that will fill the mold after consolidation.

9.4 *Casting Beams*—Select the proper tamping rod from 5.4 and Table 1 or proper vibrator from 5.5. Determine the method of consolidation from Table 3, unless another method is specified. If the method of consolidation is rodding, determine the requirements from Table 4. If the method of consolidation is vibration, determine the requirements from Table 5. Determine the number of roddings per layer, one for each 14 cm² [2 in.²] of the top surface area of the beam. Select a placement tool as described in 5.7. Using the scoop or shovel, place the concrete in the mold to the height required for each layer. Place the concrete so that it is uniformly distributed within each layer with minimal segregation. Each layer shall be consolidated as

TABLE 4 Requirements for Consolidation by Rodding

Specimen Type and Size	Number of Layers of Approximately Equal Depth	Number of Roddings per Layer
Cylinders:		
Diameter, mm [in.]		
100 [4]	2	25
150 [6]	3	25
225 [9]	4	50
Beams:		
Width, mm [in.]		
100 [4] to 200 [8]	2	see 9.4
>200 [8]	3 or more equal depths, each not to exceed 150 mm [6 in.].	see 9.4

TABLE 5 Requirements for Consolidation by Vibration

Specimen Type and Size	Number of Layers	Number of Vibrator Insertions per Layer	Approximate Depth of Layer, mm [in.]
Cylinders:			
Diameter, mm [in.]			
100 [4]	2	1	one-half depth of specimen
150 [6]	2	2	one-half depth of specimen
225 [9]	2	4	one-half depth of specimen
Beams:			
Width, mm [in.]			
100 [4] to 200 [8]	1	see 9.5.2	depth of specimen
over 200 [8]	2 or more	see 9.5.2	200 [8] as near as practicable

required. In placing the final layer, add an amount of concrete that will fill the mold after consolidation.

9.5 *Consolidation*—The methods of consolidation for this practice are rodding or internal vibration.

9.5.1 *Rodding*—Place the concrete in the mold in the required number of layers of approximately equal volume. Rod each layer uniformly over the cross section with the rounded end of the rod using the required number of strokes. Rod the bottom layer throughout its depth. In rodding this layer, use care not to damage the bottom of the mold. For each upper layer, allow the rod to penetrate through the layer being rodded and into the layer below approximately 25 mm [1 in.]. After each layer is rodded, tap the outsides of the mold 10 to 15 times with the mallet to close any holes left by rodding and to release any large air bubbles that may have been trapped. Use an open hand to tap cylinder molds that are susceptible to denting or other permanent distortion if tapped with a mallet. After tapping, spade each layer of the concrete along the sides and ends of beam molds with a trowel or other suitable tool. Underfilled molds shall be adjusted with representative concrete during consolidation of the top layer. Overfilled molds shall have excess concrete removed.

NOTE 7—The tapping force should be sufficient to close holes left by the rod (or vibrator). A higher tapping force will be needed for stiffer concrete mixtures. Specimens in plastic molds usually require a lighter tapping force than specimens in metal molds.

TABLE 3 Method of Consolidation Requirements

Slump, mm [in.]	Method of Consolidation
≥25 [1]	rodding or vibration
< 25 [1]	vibration

9.5.2 Vibration—Maintain a uniform duration of vibration for the particular kind of concrete, vibrator, and specimen mold involved. Continue vibration only long enough to achieve proper consolidation of the concrete (see **Note 8**). Fill the molds and vibrate in the required number of approximately equal layers. Place all the concrete for each layer in the mold before starting vibration of that layer. If using an internal vibrator, insert the vibrator slowly, then slowly withdraw the vibrator. Do not allow the internal vibrator to rest on the bottom or sides of the mold. When placing the final layer, avoid overfilling by more than 6 mm [$\frac{1}{4}$ in.].

NOTE 8—The duration of vibration required will depend upon the workability of the concrete and the effectiveness of the vibrator. Usually, sufficient vibration has been applied as soon as the surface of the concrete has become relatively smooth and large air bubbles cease to break through the top surface. Generally, no more than 5 s of vibration should be required for each insertion to adequately consolidate concrete with a slump greater than 75 mm [3 in.]. Longer times may be required for lower slump concrete, but the vibration time should rarely have to exceed 10 s per insertion.

9.5.2.1 Cylinders—The number of insertions of the vibrator per layer is given in **Table 5**. When more than one insertion per layer is required distribute the insertion uniformly within each layer. Allow the vibrator to penetrate through the layer being vibrated, and into the layer below, about 25 mm [1 in.]. After each layer is vibrated, tap the outsides of the mold at least 10 times with the mallet, to close holes that remain and to release entrapped air voids. Use an open hand to tap molds that are susceptible to denting or other permanent distortion if tapped with a mallet.

9.5.2.2 Beams—Insert the vibrator at intervals not exceeding 150 mm [6 in.] along the center line of the long dimension of the specimen. For specimens wider than 150 mm [6 in.], use alternating insertions along two lines. Allow the shaft of the vibrator to penetrate into the bottom layer about 25 mm [1 in.]. After each layer is vibrated, tap the outsides of the mold 10 to 15 times with the mallet to close any holes left by vibrating and to release any large air bubbles that may have been trapped. (See **Note 7**.)

9.6 Finishing—Perform all finishing with the minimum manipulation necessary to produce a flat even surface that is level with the rim or edge of the mold and that has no depressions or projections larger than 3.3 mm [$\frac{1}{8}$ in.].

9.6.1 Cylinders—After consolidation, finish the top surfaces by striking them off with the tamping rod where the consistency of the concrete permits or with a handheld float or trowel. If desired, cap the top surface of freshly made cylinders with a thin layer of stiff portland cement paste which is permitted to harden and cure with the specimen. See section on Capping Materials of Practice **C617/C617M**.

9.6.2 Beams—After consolidation of the concrete, use a handheld float or trowel to strike off the top surface to the required tolerance to produce a flat, even surface.

9.7 Identification—Mark the specimens to positively identify them and the concrete they represent. Use a method that will not alter the top surface of the concrete. Do not mark the removable caps. Upon removal of the molds, mark the test specimens to retain their identities.

10. Curing

10.1 Standard Curing—Standard curing is the curing method used when the specimens are made and cured for the purposes stated in **4.2**.

10.1.1 Storage—The supporting surface on which specimens are stored shall be level to within 20 mm/m [$\frac{1}{4}$ in./ft.]. If specimens are not made in the location where they will receive initial curing, move the specimens to the initial-curing location no later than 15 min after casting operations for that sample have been completed. If a specimen in a single-use mold is moved, support the bottom of the mold. If the top surface of a specimen is disturbed during movement to the place of initial storage, refinish the surface.

NOTE 9—Some single-use molds, such as cylinder molds constructed of sheet metal or treated cardboard, may be permanently distorted if moved without proper support. Using a large trowel or a hand to support the bottom of these molds are acceptable means to prevent permanent deformation. It is acceptable to slightly tilt the mold to facilitate lifting and supporting the mold. If a cover is to be placed on the top of a specimen, the cover should be placed on the specimen after moving the specimen to the initial-curing location to ensure the required finish of the top surface of the specimen. For example, if a specimen will be stored in water for initial curing, it would be appropriate to perform a final check of the surface finish prior to placing the cover and setting the specimen into the water.

10.1.2 Initial Standard Curing—Store standard-cured test specimens for a period up to 48 h after molding to maintain the specified temperature and moisture conditions described in **10.1.2.1** and **10.1.2.2**.

NOTE 10—Generally, just covering the specimens is not sufficient to maintain the environment required for initial standard curing.

10.1.2.1 For concrete mixtures with a specified compressive strength less than 40 MPa [6000 psi], maintain the initial standard-curing temperature between 16 °C and 27 °C [60 °F and 80 °F]. For concrete mixtures with a specified compressive strength of 40 MPa [6000 psi] or greater, maintain the initial standard-curing temperature between 20 °C and 26 °C [68 °F and 78 °F]. Shield test specimens from direct exposure to sunlight and, if used, radiant heating devices. Record the minimum temperature and maximum temperatures achieved for each set of test specimens during the initial standard-curing period.

NOTE 11—A satisfactory temperature environment can be created during the standard curing of the specimens by one or more of the following procedures: (1) use of ventilation; (2) use of ice; (3) use of cooling devices; or (4) use of heating devices such as electrical resistance heaters or light bulbs. Other suitable methods may be used provided the temperature requirements are met.

NOTE 12—Early-age strength test results may be lower if specimens are stored at temperatures lower than the specified range. At later ages, strength test results may be lower if specimens are exposed to initial curing temperatures higher than the specified range.

10.1.2.2 Store the specimens in an environment that controls the loss of moisture.

NOTE 13—A satisfactory moisture environment can be created during the initial standard curing of the specimens by one or more of the following procedures: (1) immerse test specimens with plastic lids in water; (2) store test specimens in a container or enclosure; (3) place test specimens in damp sand pits; (4) cover test specimens with plastic lids; (5)

place test specimens inside plastic bags; or (6) cover specimens with wet fabric.

NOTE 14—Immersion in water may be the easiest method to maintain required moisture and temperature conditions during initial standard curing.

10.1.3 Final Curing:

NOTE 15—Specification **C330/C330M** allows an alternative method, if specified, for curing compressive-strength specimens of structural concrete containing lightweight aggregate.

10.1.3.1 *Cylinders*—Upon completion of initial curing and within 30 min after removing the molds, cure specimens with free water maintained on their surfaces at all times at a temperature of $23.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$73.5\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 3.5\text{ }^{\circ}\text{F}$] using water storage tanks or moist rooms complying with the requirements of Specification **C511**, except when capping with sulfur mortar capping compound and immediately prior to testing. When capping with sulfur mortar capping compound, the ends of the cylinder shall be dry enough to preclude the formation of steam or foam pockets under or in cap larger than 6 mm [$\frac{1}{4}$ in.] as described in Practice **C617/C617M**. For a period not to exceed 3 h immediately prior to test, standard-curing temperature is not required provided free moisture is maintained on the cylinders and ambient temperature is between $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$68\text{ }^{\circ}\text{F}$ and $86\text{ }^{\circ}\text{F}$].

10.1.3.2 *Beams*—Beams are to be cured the same as cylinders (see 10.1.3.1) except that the beams shall be stored in water saturated with calcium hydroxide at $23.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$73.5\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 3.5\text{ }^{\circ}\text{F}$] at least 20 h prior to testing. Drying of the surfaces of the beam shall be prevented between removal from water storage and completion of testing.

NOTE 16—Relatively small amounts of surface drying of flexural specimens can induce tensile stresses in the extreme fibers that will markedly reduce the indicated flexural strength.

10.2 *Field Curing*—Field curing is the curing method used for the specimens made and cured as stated in 4.3.

10.2.1 *Cylinders*—Store cylinders in or on the structure as near to the point of deposit of the concrete represented as possible. Protect all surfaces of the cylinders from the elements in as near as possible the same way as the formed work. Provide the cylinders with the same temperature and moisture environment as the structural work. Test the specimens in the moisture condition resulting from the specified curing treatment. To meet these conditions, specimens made for the purpose of determining when a structure is capable of being put in service shall be removed from the molds at the time of removal of form work.

10.2.2 *Beams*—As nearly as practicable, cure beams in the same manner as the concrete in the structure. Remove the specimens from their molds $48\text{ h} \pm 4\text{ h}$ after casting operations for that sample have been completed. Store specimens representing pavements or slabs on ground by placing them on the

ground as cast, with their top surfaces up exposed to the specified curing treatment. Store specimens representing structure concrete as near the point in the structure they represent as possible, and afford them the same temperature protection and moisture environment as the structure. At the end of the curing period leave the specimens in place exposed to the weather in the same manner as the structure. Remove all beam specimens from field storage and store in water saturated with calcium hydroxide at $23.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$73.5\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 3.5\text{ }^{\circ}\text{F}$] for $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$ immediately before time of testing to ensure uniform moisture condition from specimen to specimen. Observe the precautions given in 10.1.3.2 to guard against drying between time of removal from curing to testing.

11. Transportation of Specimens to Laboratory

11.1 Prior to transporting, cure and protect specimens as required in Section 10. Specimens shall not be transported until at least 8 h after final set. (See Note 17). During transporting, protect the specimens with suitable cushioning material to prevent damage from jarring. During cold weather, protect the specimens from freezing with suitable insulation material. Prevent moisture loss during transportation by wrapping the test specimens in plastic, wet burlap, by surrounding them with damp sand, or tight fitting plastic caps on plastic molds. Transportation time shall not exceed 4 h.

NOTE 17—Setting time may be measured by Test Method **C403/C403M**.

12. Report

12.1 Report the following information to the laboratory that will test the specimens:

- 12.1.1 Specimen identification,
- 12.1.2 Serial number of delivery ticket, if available,
- 12.1.3 Location of concrete represented by the samples,
- 12.1.4 Date, time and name of individual making specimens,
- 12.1.5 Slump or slump flow, air content, and concrete temperature, test results and results of any other tests on the fresh concrete, and any deviations from referenced standard test methods, and

12.1.6 *Curing Method*—For standard-curing method, report the initial curing method with maximum and minimum temperatures and final curing method. For field-curing method, report the location where stored, manner of protection from the elements, temperature and moisture environment, and time of removal from molds.

13. Keywords

13.1 beams; casting samples; concrete; curing; cylinders; testing



SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this practice since the last issue, C31/C31M–25, that may impact the use of this practice. (Approved February 15, 2025.)

- (1) Revised 6.2.1 and 6.2.3.
- (2) Practice C192/C192M was added to Section 2, Referenced Documents.
- (3) Removed ACI 309R from Section 2, Referenced Documents.
- (4) Revised 5.5 and 9.5.2.
- (5) Removed previous note Note 4 and renumbered subsequent notes.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this practice since the last issue, C31/C31M–24c, that may impact the use of this practice. (Approved February 1, 2025.)

- (1) Revised 9.5.1 and 9.5.2.2.
- (2) Added Note 7.
- (3) Deleted previous 10.3.
- (4) Added Note 15.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this practice since the last issue, C31/C31M–24b, that may impact the use of this practice. (Approved December 1, 2024.)

- (1) Revised 3.2.3 and 9.1.
- (2) Removed former Note 3.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this practice since the last issue, C31/C31M–24a, that may impact the use of this practice. (Approved June 1, 2024.)

- (1) Revised 10.1.2.1.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this practice since the last issue, C31/C31M–24, that may impact the use of this practice. (Approved April 1, 2024.)

- (1) Revised titles of Section 9, Table 4 and Table 5.
- (2) Revised 9.2, 9.3, Note 13, 10.1.1, 10.1.2.2, and 12.1.4.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this practice since the last issue, C31/C31M–23, that may impact the use of this practice. (Approved February 1, 2024.)

- (1) 9.2 was added. Former 9.2.1 and 9.3.1 were removed

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/>



Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate¹

This standard is issued under the fixed designation C29/C29M; 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 the determination of bulk density (“unit weight”) of aggregate in a compacted or loose condition, and calculated voids between particles in fine, coarse, or mixed aggregates based on the same determination. This test method is applicable to aggregates not exceeding 125 mm [5 in.] in nominal maximum size.

NOTE 1—Unit weight is the traditional terminology used to describe the property determined by this test method, which is weight per unit volume (more correctly, mass per unit volume or density).

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard, as appropriate for a specification with which this test method is used. An exception is with regard to sieve sizes and nominal size of aggregate, in which the SI values are the standard as stated in Specification E11. Within the text, 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.*

1.4 *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 C09.20 on Aggregates.

Current edition approved Oct. 1, 2023. Published October 2023. Originally approved in 1920. Last previous edition approved in 2017 as C29/C29M – 17a. DOI: 10.1520/C0029_C0029M-23

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- 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
- C670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials
- C702/C702M Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size
- C1077 Practice for Agencies Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Testing Agency Evaluation
- D75/D75M Practice for Sampling Aggregates
- E11 Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves

2.2 AASHTO Standard:

- T19/T19M Method of Test for Unit Weight and Voids in Aggregate³

3. Terminology

3.1 *Definitions*—The terms used in this test method are defined in Terminology C125.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *voids, n*—in unit volume of aggregate, the space between particles in an aggregate mass not occupied by solid mineral matter.

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

³ Available from American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 444 N. Capitol St., NW, Suite 249, Washington, DC 20001, <http://www.transportation.org>.

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

3.2.1.1 *Discussion*—Voids within particles, either permeable or impermeable, are not included in voids as determined by this test method.

4. Significance and Use

4.1 This test method is often used to determine bulk density values that are necessary for use for many methods of selecting proportions for concrete mixtures.

4.2 The bulk density also may be used for determining mass/volume relationships for conversions in purchase agreements. However, the relationship between degree of compaction of aggregates in a hauling unit or stockpile and that achieved in this test method is unknown. Further, aggregates in hauling units and stockpiles usually contain absorbed and surface moisture (the latter affecting bulking), while this test method determines the bulk density on a dry basis.

4.3 A procedure is included for computing the percentage of voids between the aggregate particles based on the bulk density determined by this test method.

5. Apparatus

5.1 *Balance*—A balance or scale accurate to within 0.05 kg [0.1 lb] or to within 0.1% 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 measure empty to the mass of the measure plus its contents at 1920 kg/m³ [120 lb/ft³].

5.2 *Tamping Rod*—A round, plain steel rod with a diameter of 16 mm ± 2 mm [$\frac{5}{8}$ in. ± $\frac{1}{16}$ in.]. The length of the tamping rod shall be at least 100 mm [4 in.] greater than the depth of the measure or mold in which rodding is being performed, but not greater than 750 mm [30 in.] in overall length (see **Note 2**). The rod shall have the tamping end, or both ends, rounded to a hemispherical tip of the same diameter as the rod. The rod shall be straight over its length to a tolerance of 0.5 % of its length.

5.3 *Measure*—A cylindrical container made of steel or other suitable metal that complies with the requirements of this section, preferably provided with handles. The measure shall be watertight and sufficiently rigid to retain its form under rough usage. The measure shall have a height at least 80 % and not more than 150 % of the diameter. The capacity of the measure shall conform to the limits in **Table 1** for the aggregate size to be tested. The thickness of metal in the measure shall be as described in **Table 2**. The top rim shall be smooth and plane

TABLE 1 Capacity of Measures

Nominal Maximum Size of Aggregate		Capacity of Measure ^A	
mm	in.	m ³ [L]	ft ³
12.5	$\frac{1}{2}$	0.0028 [2.8]	$\frac{1}{10}$
25.0	1	0.0093 [9.3]	$\frac{1}{3}$
37.5	$1\frac{1}{2}$	0.014 [14]	$\frac{1}{2}$
75	3	0.028 [28]	1
100	4	0.070 [70]	$2\frac{1}{2}$
125	5	0.100 [100]	$3\frac{1}{2}$

^A The indicated size of measure shall be used to test aggregates of a nominal maximum size equal to or smaller than that listed. The actual volume of the measure shall be at least 95 % of the nominal volume listed.

TABLE 2 Requirements for Measures

Units	Capacity of Measure	Thickness of Metal, min		
		Bottom	Upper 38 mm or 1½ in. of wall ^A	Remainder of wall
SI	Less than 11 L	5.0 mm	2.5 mm	2.5 mm
	11 to 42 L, incl	5.0 mm	5.0 mm	3.0 mm
	over 42 to 80 L, incl	10.0 mm	6.4 mm	3.8 mm
	over 80 to 133 L, incl	13.0 mm	7.6 mm	5.0 mm
Inch-pound	Less than 0.4 ft ³	0.20 in.	0.10 in.	0.10 in.
	0.4 ft ³ to 1.5 ft ³ , incl	0.20 in.	0.20 in.	0.12 in.
	over 1.5 to 2.8 ft ³ , incl	0.40 in.	0.25 in.	0.15 in.
	over 2.8 to 4.0 ft ³ , incl	0.50 in.	0.30 in.	0.20 in.

^A The added thickness in the upper portion of the wall may be obtained by placing a reinforcing band around the top of the measure.

within 0.3 mm [0.01 in.] and shall be parallel to the bottom within 0.5° (see **Note 2**). The interior wall of the measure shall be a smooth and continuous surface.

NOTE 2—The top rim is satisfactorily plane if a 0.3 mm [0.01 in.] feeler gage cannot be inserted between the rim and a piece of 6 mm [$\frac{1}{4}$ in.] or thicker plate glass laid over the measure. The top and bottom are satisfactorily parallel if the slope between pieces of plate glass in contact with the top and bottom does not exceed 0.87 % in any direction.

5.3.1 Measures larger than nominal 28 L [1 ft³] capacity shall be made of steel.

5.4 *Shovel or Scoop*—A shovel or scoop of convenient size for filling the measure with aggregate.

5.5 Equipment for Measuring Volume of Measure:

5.5.1 *Plate Glass*—A piece of plate glass, at least 6 mm [$\frac{1}{4}$ in.] thick and at least 25 mm [1 in.] larger than the diameter of the measure to be calibrated.

5.5.2 *Grease*—A supply of water-pump, chassis, or similar grease.

5.5.3 *Thermometer*—A thermometer having a range of at least 10 °C to 32 °C [50 °F to 90 °F] and that is readable to at least 0.5 °C [1 °F].

5.5.4 *Balance*—A balance as described in **5.1**.

6. Sampling

6.1 Obtain the sample in accordance with Practice **D75/D75M**, and reduce to test sample size in accordance with Practice **C702/C702M**.

7. Test Sample

7.1 The size of the test sample shall be between 125 % and 200 % of the quantity required to fill the measure, and shall be handled in a manner to avoid segregation.

7.2 Dry the aggregate sample to constant mass in an oven at 110 °C ± 5 °C [230 °F ± 10 °F]. The sample is considered to be at constant mass when the difference in mass between two consecutive weighings taken one hour apart is less than 0.1% of the last weighing.

NOTE 3—Alternative means of drying are sometimes chosen for quick determinations where rapid results are desired or if an oven is not available. Alternative drying methods should not cause fracturing of particles or chemical breakdown of the aggregate. Use of alternative drying methods does not conform with this test method.

8. Determination of Volume of Measure

8.1 Determine the volume of the measure upon initial use and subsequently at a frequency not to exceed twelve months, or whenever there is reason to question the accuracy of the volumetric capacity of the measure. If required, retain a record of volume determination in accordance with Practice C1077.

8.2 Determine the mass of the plate glass and measure the nearest 0.05 kg [0.1 lb].

8.3 Place a thin layer of grease on the rim of the measure to prevent leakage of water from the measure.

8.4 Fill the measure with water that is at room temperature and cover with the plate glass in such a way as to eliminate bubbles and excess water. Remove any water that may have overflowed onto the measure or plate glass.

8.5 Determine the mass of the water, plate glass, and measure to the nearest 0.05 kg [0.1 lb].

8.6 Measure the temperature of the water to the nearest 0.5 °C [1 °F] and determine its density from Table 3, interpolating if necessary.

TABLE 3 Density of Water

Temperature		kg/m ³	lb/ft ³
°C	°F		
15.6	60	999.01	62.366
18.3	65	998.54	62.336
21.1	70	997.97	62.301
23.0	73.4	997.54	62.274
23.9	75	997.32	62.261
26.7	80	996.59	62.216
29.4	85	995.83	62.166

8.7 Calculate the volume, V , of the measure, as described in 10.3.

NOTE 4—For the calculation of bulk density, the volume of the measure in SI units should be expressed in cubic metres, or the factor as 1/m³. However, for convenience the size of the measure may be expressed in litres.

9. Procedure

9.1 Determine and record the mass of the empty measure to the nearest 0.05 kg [0.1 lb].

9.2 To determine the compacted bulk density of aggregates having a nominal maximum size of 37.5 mm [1½ in.] or less, consolidate the sample in the measure using *Method A—Rodding*; use *Method B—Jigging* for aggregates having a nominal maximum size greater than 37.5 mm [1½ in.] and not exceeding 125 mm [5 in.]. To determine the loose bulk density of the aggregate, when stipulated, fill the measure by *Method C—Shoveling*.

9.2.1 Method A—Rodding:

9.2.1.1 Fill the measure one-third full and level the surface with the fingers. Rod the layer of aggregate with 25 strokes of the tamping rod evenly distributed over the surface. Fill the measure two-thirds full and again level and rod as above. Finally, fill the measure to overflowing and rod again in the manner previously mentioned. Level the surface of the aggregate

with the fingers or a straightedge in such a way that any slight projections of the larger pieces of the coarse aggregate approximately balance the larger voids in the surface below the top of the measure.

9.2.1.2 In rodding the first layer, do not allow the rod to strike the bottom of the measure forcibly. In rodding the second and third layers, use vigorous effort, but not more force than to cause the tamping rod to penetrate to the previous layer of aggregate.

NOTE 5—In rodding the larger sizes of coarse aggregate, it may not be possible to penetrate the layer being consolidated, especially with angular aggregates. The intent of the procedure will be accomplished if vigorous effort is used.

9.2.2 Method B—Jigging:

9.2.2.1 Fill the measure in three approximately equal layers as described in 9.2.1.1, compacting each layer by placing the measure on a firm base, such as a cement-concrete floor, raising the opposite sides alternately about 50 mm [2 in.], and allowing the measure to drop in such a manner as to hit with a sharp, slapping blow. The aggregate particles, by this procedure, will arrange themselves in a densely compacted condition. Compact each layer by dropping the measure 50 times in the manner described, 25 times on each side. Level the surface of the aggregate with the fingers or a straightedge in such a way that any slight projections of the larger pieces of the coarse aggregate approximately balance the larger voids in the surface below the top of the measure.

9.2.3 Method C—Shoveling:

9.2.3.1 Fill the measure to overflowing by means of a shovel or scoop, discharging the aggregate from a height not to exceed 50 mm [2 in.] above the top of the measure. Exercise care to prevent, so far as possible, segregation of the particle sizes of which the sample is composed. Level the surface of the aggregate with the fingers or a straightedge in such a way that any slight projections of the larger pieces of the coarse aggregate approximately balance the larger voids in the surface below the top of the measure.

9.3 Determine and record the mass of the measure plus its contents to the nearest 0.05 kg [0.1 lb].

10. Calculation

10.1 *Bulk Density*—Calculate the bulk density as follows:

$$M = (G - T)/V \quad (1)$$

where:

M = bulk density of the aggregate, kg/m³ [lb/ft³],
 G = mass of the aggregate plus the measure, kg [lb],
 T = mass of the measure, kg [lb],
 V = volume of the measure, m³ [ft³]

10.1.1 The bulk density determined by this test method is for aggregate in an oven-dry condition. If the bulk density in terms of saturated-surface-dry (SSD) condition is desired, use the exact procedure in this test method, and then calculate the SSD bulk density using the following formula:

$$M_{SSD} = M[1 + (A/100)] \quad (2)$$

where:

M_{SSD} = bulk density in SSD condition, kg/m³ [lb/ft³], and

A = % absorption, determined in accordance with Test Method **C127** or Test Method **C128**.

10.2 Void Content—Calculate the void content in the aggregate using the bulk density determined by either the rodding, jigging, or shoveling procedure, as follows:

$$\% \text{ Voids} = 100[(S \times W) - M]/(S \times W) \quad (3)$$

where:

M = bulk density of the aggregate, kg/m^3 [lb/ft^3],
 S = bulk specific gravity (dry basis) as determined in accordance with Test Method **C127** or Test Method **C128**, and
 W = density of water, 998 kg/m^3 [62.3 lb/ft^3].

10.3 Volume of Measure—Calculate the volume of a measure as follows:

$$V = (H - P)/D \quad (4)$$

where:

V = volume of the measure, m^3 [ft^3]
 H = mass of the water, plate glass, and measure, kg [lb]
 P = mass of the plate glass and measure, kg [lb]
 D = density of the water for the measured temperature, kg/m^3 [lb/ft^3]

11. Report

11.1 Report the results for the bulk density to the nearest 10 kg/m^3 [1 lb/ft^3] as follows:

- 11.1.1 Bulk density consolidated by *Method A—Rodding*, or
- 11.1.2 Bulk density consolidated by *Method B—Jigging*, or
- 11.1.3 Loose bulk density by *Method C—Shoveling*.

11.2 Report the results for the void content to the nearest 1 % as follows:

- 11.2.1 Voids in aggregate consolidated by *Method A—Rodding*, %, or
- 11.2.2 Voids in aggregate consolidated by *Method B—Jigging*, %, or
- 11.2.3 Voids in loose aggregate by *Method C—Shoveling*, %.

12. Precision and Bias

12.1 The following estimates of precision for this test method are based on results from the AASHTO Materials Reference Laboratory (AMRL) Proficiency Sample Program, with testing conducted using this test method and AASHTO Method T 19/T19M. There are no significant differences between the two test methods. The data are based on the analyses of more than 100 paired test results from 40 to 100 laboratories.

12.2 Coarse Aggregate (bulk density):

12.2.1 Single-Operator Precision—The single-operator standard deviation has been found to be 14 kg/m^3 [0.88 lb/ft^3] (1s). Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on similar material should not differ by more than 40 kg/m^3 [2.5 lb/ft^3] (d2s).

12.2.2 Multilaboratory Precision—The multilaboratory standard deviation has been found to be 30 kg/m^3 [1.87 lb/ft^3] (1s). Therefore, results of two properly conducted tests from two different laboratories on similar material should not differ by more than 85 kg/m^3 [5.3 lb/ft^3] (d2s).

12.2.3 These numbers represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice **C670**. The precision estimates were obtained from the analysis of AMRL proficiency sample data for bulk density by rodding of normal weight aggregates having a nominal maximum aggregate size of 25.0 mm [1 in.], and using a 14 L [$\frac{1}{2} \text{ ft}^3$] measure.

12.3 Fine Aggregate (bulk density):

12.3.1 Single-Operator Precision—The single-operator standard deviation has been found to be 14 kg/m^3 [0.88 lb/ft^3] (1s). Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on similar material should not differ by more than 40 kg/m^3 [2.5 lb/ft^3] (d2s).

12.3.2 Multilaboratory Precision—The multilaboratory standard deviation has been found to be 44 kg/m^3 [2.76 lb/ft^3] (1s). Therefore, results of two properly conducted tests from two different laboratories on similar material should not differ by more than 125 kg/m^3 [7.8 lb/ft^3] (d2s).

12.3.3 These numbers represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice **C670**. The precision estimates were obtained from the analysis of AMRL proficiency sample data for loose bulk density from laboratories using a 2.8-L [$\frac{1}{10} \text{ ft}^3$] measure.

12.4 No precision data on void content are available. However, as the void content in aggregate is calculated from bulk density and bulk specific gravity, the precision of the voids content reflects the precision of these measured parameters given in **12.2** and **12.3** of this test method and in Test Methods **C127** and **C128**.

12.5 Bias—The procedure in this test method for measuring bulk density and void content has no bias because the values for bulk density and void content can be defined only in terms of a test method.

13. Keywords

13.1 aggregates; bulk density; coarse aggregate; density; fine aggregate; unit weight; voids in aggregates



SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C29/C29M – 17a, that may impact the use of this test method. (Approved October 1, 2023.)

(1) Revised 8.7.

(3) Revised 10.3.

(2) Revised 10.1.

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/>