



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

Título del Trabajo:

Formulación y evaluación de un acelerante líquido de fraguado a base de polvo de
basalto para concreto estructural

Nombre del autor:

Ángel Díaz Contreras Funes

Director: Dr. Luis Daimir López León
Codirector: Dr. Francisco Javier Olguín Coca

Fecha:

27/06/2025



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

Mineral de la Reforma, Hgo., a 27 de junio de 2025

Número de control: ICBI-D/1178/2025

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 del egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Ángel Díaz Contreras Funes**, quien presenta el trabajo de titulación "**Formulación y evaluación de un acelerante líquido de fraguado a base de polvo de basalto para concreto estructural**", 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: Dr. Luis Daimir López León

Secretario: Dr. Francisco Javier Olguín Coca

Vocal: Mtra. Valeria Volpi León

Suplente: Mtro. Juan Carlos Yee Armenta

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, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

*Con profundo afecto y cariño a:
Mis padres y mi familia*

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a todas las personas que me han apoyado a lo largo de mi desarrollo profesional.

Primeramente, quiero agradecer a mi familia, por sus invaluable consejos y su apoyo en momentos de necesidad. Especialmente a mis padres, Leyla y Josué, quienes me han apoyado en cada etapa de mi vida sin condición alguna. Mi hermano, Alan, con el cual siempre he disfrutado de grandes momentos de felicidad.

Asimismo, quiero agradecer a mis amigos dentro y fuera de la universidad, principalmente a mi amigo Angel, por brindarme su amistad y acompañarme en cada paso que la vida nos pone.

A mis profesores de la carrera, quienes confiaron en mí y me dieron la oportunidad de aprender, en especial al ingeniero Luis Francisco Bravo, quien, más que un profesor, ha demostrado ser un amigo invaluable que me ha enseñado el valor de la entrega y la dedicación.

A mi director de tesis, el Dr. Luis Daimir López León, por confiar en mí y brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo, por compartir su conocimiento, sus consejos y su amistad.

A Maria, por motivarme, darme todo su amor y comprensión en cada momento.

A mis mascotas, las cuales me han acompañado silenciosamente durante largas noches de trabajo y darme paz cuando más la necesitaba.

A todos ustedes, gracias.

Índice de Contenido

Agradecimientos.....	1
Glosario de términos	7
Resumen	9
Abstract.....	10
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	11
1.1 Introducción	12
1.2 Antecedentes.....	13
1.3 Justificación	15
1.4 Objetivo general	17
1.5 Objetivos específicos.....	17
1.6 Planteamiento del problema.....	17
1.7 Pregunta de investigación	19
1.8 Hipótesis.....	19
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	20
2.1 Conceptos básicos	21
2.1.1 Concreto.....	21
2.1.2 Cemento.....	25
2.1.3 Agua.....	28
2.1.4 Agregados.....	28
2.1.5 Relación agua/cemento.....	30
2.1.6 Fraguado del concreto.....	31
2.1.7 Endurecimiento del concreto	32
2.2 Propiedades del concreto	33
2.2.1 Propiedades del concreto en estado fresco	33

2.2.2	<i>Propiedades del concreto endurecido</i>	34
2.2.3	<i>Factores que influyen en la resistencia mecánica</i>	35
2.3	<i>Aditivos para concreto</i>	36
2.3.1	<i>Clasificación de los aditivos</i>	36
2.3.2	<i>Aditivos acelerantes</i>	37
2.3.3	<i>Acelerantes convencionales y sus limitaciones</i>	38
2.3.4	<i>Recomendaciones normativas sobre uso de acelerantes</i>	40
2.4	<i>Uso de materiales alternativos en concreto</i>	41
2.4.1	<i>Economía circular y sostenibilidad en la construcción</i>	41
2.4.2	<i>Aprovechamiento de residuos industriales</i>	42
2.4.3	<i>Efecto de los residuos minerales sobre la hidratación del cemento</i>	44
2.5	<i>Polvo de basalto como material alternativo</i>	45
2.5.1	<i>Origen y características del basalto</i>	45
2.5.2	<i>Generación de polvo de basalto como residuo industrial</i>	46
2.5.3	<i>Composición química del polvo de basalto</i>	47
2.5.4	<i>Propiedades reactivas del polvo de basalto</i>	48
2.5.5	<i>Aplicaciones previas del polvo de basalto en concreto</i>	49
2.6	<i>Contexto normativo</i>	49
2.6.1	<i>ASTM C403: Determinación del tiempo de fraguado</i>	49
2.6.2	<i>ASTM C39 y NMX-C-083: Ensayo de resistencia a compresión</i>	50
2.6.3	<i>ACI 211.1: Diseño de mezclas de concreto</i>	52
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA		55
3.1.	<i>Caracterización del basalto para uso en acelerante líquido de fraguado</i>	56
3.1.1	<i>Muestreo de residuos de basalto</i>	56
3.1.2	<i>Procedimiento de pulverización del basalto</i>	57
3.1.3	<i>Análisis químico y morfológico del polvo de basalto</i>	58
3.1.4	<i>Consideraciones para su aplicación como acelerante</i>	60

3.2 Formulación del acelerante líquido de fraguado a base de polvo de basalto activado	61
3.2.1 Preparación del medio activador	61
3.2.2 Dispersión del polvo de basalto.....	62
3.2.3 Agitación y activación	62
3.2.4 Estabilización y almacenamiento	62
3.3 Ensayo de resistencia a la compresión del concreto estructural modificado con acelerante líquido a base de basalto	63
3.3.1 Diseño de mezclas y condiciones experimentales	63
3.3.2 Elaboración de especímenes	65
3.3.3 Curado de especímenes	66
3.3.4 Procedimiento del ensayo de compresión.....	66
3.3.5 Ensayo de fraguado inicial y final del concreto con acelerante líquido de basalto.....	67
3.3.5.1 Preparación de especímenes	68
3.3.5.2 Procedimiento de ensayo	68
3.3.6 Justificación del enfoque metodológico	68
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	70
4.1 Resultados del ensayo de fraguado	71
4.2 Resistencia a la compresión.....	71
4.2.1 Desempeño del sistema sin acelerante.....	73
4.2.2 Desempeño del sistema con acelerante de basalto	74
CONCLUSIONES.....	76
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS	85

Índice de Figuras

Figura 2.1.1. Ejemplo de la aplicación del concreto ligero. Fuente: (Galistar, 2019)	22
Figura 2.1.2. Ejemplo del concreto romano utilizado en el Coliseo Romano. Fuente: (ArchDaily, 2013).....	26
Figura 2.1.6. Curva de resistencia con relación a los días de nacimiento del cemento portland. Fuente: (Teorías del Hormigón, 2014).....	32
Figura 2.3.3. Daño en el concreto armado a causa de la corrosión en el acero de refuerzo. Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto (1992).	39
Figura 2.5.1. Piedra de basalto de color oscuro, con cavidades originadas por gases volcánicos. Fuente: Flickr, 2010.	46
Figura 2.5.2. Polvo de roca basáltica generado como subproducto industrial. Fuente: MyShrooms, 2020.	47
Figura 2.5.3. Ensayo de carbonatación en concreto utilizando fenolftaleína como indicador de pH. Fuente: Estudio de carbonatación en concreto elaborado con residuo minero, 2018.....	49
Figura 3.1.2 a) Máquina de abrasión de Los Ángeles b) Tamiz No. 200.....	58
Figura 3.1.3: Microfotografía del basalto: a) resultado del microanálisis general SEM-EDS), b) Imagen general SEM.	60

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Tipos de concreto y sus características. Fuente: (NTC, 2023).	23
Tabla 2.2. Propiedades de los agregados y su función en el concreto. Fuente: (Yam, 2003).	29
Tabla 3.1.3 Composición química ajustada del polvo de basalto	59
Tabla 3.2. Parámetros de diseño de mezcla de concreto.....	64
Tabla 3.3. Dosificación de concreto con y sin acelerante líquido de polvo de basalto ..	65
Tabla 4.1. Tiempos de fraguado inicial y final del concreto	71
Tabla 4.2. Resultados de resistencia a la compresión (tres especímenes por sistema) del concreto con y sin acelerante líquido de basalto a diferentes edades de curado.	72

Glosario de términos

ACI (American Concrete Institute):

Instituto estadounidense que desarrolla normas y recomendaciones técnicas para el diseño, mezcla y ensayo del concreto.

Adición mineral:

Material fino, natural o residual, que se incorpora a la mezcla de concreto para modificar sus propiedades físicas, químicas o mecánicas.

Aditivo acelerante:

Producto químico o mineral agregado al concreto durante el mezclado para reducir el tiempo de fraguado e incrementar la ganancia temprana de resistencia.

ASTM (American Society for Testing and Materials):

Organización internacional que establece normas técnicas para materiales, productos, sistemas y servicios, ampliamente utilizada en la industria de la construcción.

Basalto:

Roca ígnea de origen volcánico, rica en minerales como sílice, hierro y magnesio. Puede ser utilizada como agregado o como adición en forma de polvo.

Carbonatación:

Proceso químico en el que el dióxido de carbono reacciona con la pasta de cemento endurecido, reduciendo el pH y potencialmente afectando la durabilidad del concreto.

Concreto estructural:

Tipo de concreto diseñado con propiedades mecánicas suficientes para soportar cargas estructurales en edificaciones e infraestructuras.

Fraguado:

Etapas inicial en la hidratación del cemento en la cual la mezcla pierde plasticidad y comienza a endurecer.

NMX (Norma Mexicana):

Normas oficiales desarrolladas en México por organismos como el ONNCCE, que regulan los procedimientos y especificaciones técnicas de materiales y procesos.

ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación):

Entidad mexicana encargada de desarrollar normas técnicas en la industria de la construcción.

Polvo de basalto:

Residuos finos generados durante la explotación de canteras de basalto, que pueden ser utilizados como adición o reactivo en materiales cementantes.

Relación a/c (agua/cemento):

Proporción entre la cantidad de agua y de cemento en una mezcla de concreto. Es un parámetro clave que afecta la resistencia y durabilidad del concreto.

Resistencia a compresión:

Capacidad de un material, como el concreto, para resistir fuerzas que tienden a reducir su tamaño. Se mide en unidades de presión como kg/cm² o MPa.

Sostenibilidad:

Capacidad de un sistema o proceso para mantenerse a largo plazo sin agotar recursos naturales ni generar impactos negativos significativos en el ambiente.

Tiempo de fraguado:

Duración necesaria para que el concreto comience y termine su proceso de endurecimiento inicial, medido comúnmente por métodos como la penetración de aguja (ASTM C403).

Trabajabilidad:

Facilidad con la que una mezcla fresca de concreto puede ser manipulada, colocada y compactada sin segregación.

Nucleación:

Es la formación inicial de cristales durante la hidratación del cemento; cuando este se mezcla con agua, comienza una reacción química que produce compuestos hidratados como el silicato cálcico hidratado (C-S-H), responsable del endurecimiento del concreto.

Resumen

En este estudio se formuló y evaluó un acelerante líquido de fraguado a base de polvo de basalto, un residuo industrial derivado de la explotación de roca volcánica. La propuesta busca reducir los tiempos de fraguado del concreto estructural sin comprometer sus propiedades mecánicas, al mismo tiempo que promueve el aprovechamiento de residuos minerales bajo un enfoque de sostenibilidad e innovación en materiales.

La metodología incluyó la caracterización físico-química del polvo de basalto, la preparación del aditivo en ácido cítrico monohidratado como medio acuoso y su incorporación en mezclas de concreto estructural con una resistencia de diseño de 250 kg/cm². Se elaboraron especímenes cilíndricos para evaluar la resistencia a compresión a edades de 7, 14, 21 y 28 días, conforme a las normas ASTM C39/C39M-23 y NMX-C-083-ONNCCE-2014. Se utilizó un diseño experimental comparativo entre mezclas con y sin aditivo.

Los resultados demostraron que el acelerante líquido formulado favoreció el desarrollo temprano de la resistencia mecánica, destacando incrementos significativos a los 7 y 14 días, sin afectar negativamente la resistencia final a los 28 días. Asimismo, se observó una mejora en la trabajabilidad del concreto y una reducción efectiva en el tiempo de fraguado.

Se concluye que el uso del polvo de basalto activado como acelerante líquido representa una alternativa técnicamente viable y alineada con los principios de desarrollo sostenible, especialmente útil en proyectos donde se requiere optimizar los tiempos de ejecución sin comprometer el desempeño estructural del concreto.

Abstract

This study involved the formulation and evaluation of a liquid setting accelerator made from basalt powder; an industrial by-product derived from volcanic rock quarrying. The main objective was to reduce the setting time of structural concrete without compromising its mechanical properties, while also promoting the reuse of mineral waste within a sustainability and innovative materials framework.

The methodology included the physical and chemical characterization of the basalt powder, the preparation of the accelerator in an aqueous medium, and its incorporation into structural concrete mixes with a design strength of 250 kg/cm². Cylindrical specimens were cast to assess compressive strength at 7, 14, 21, and 28 days, following ASTM C39/C39M-23 and NMX-C-083-ONNCCE-2014 standards. A comparative experimental design was used to analyze mixtures with and without the additive.

The results showed that the formulated liquid accelerator significantly enhanced early-age mechanical strength, particularly at 7 and 14 days, without adversely affecting the 28-day compressive strength. Additionally, improved workability and a noticeable reduction in setting time were observed in the mixes with the additive.

It is concluded that the use of activated basalt powder as a liquid accelerator is a technically viable and environmentally aligned strategy. It offers a promising solution for accelerating concrete construction processes without compromising structural performance, especially in projects that demand greater efficiency and sustainability.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En la actualidad, la industria de la construcción enfrenta desafíos cruciales relacionados con la sostenibilidad ambiental, la eficiencia energética y la durabilidad de los materiales. La creciente necesidad de estructuras resilientes y de rápido montaje ha impulsado la búsqueda de nuevas tecnologías que optimicen el desempeño del concreto, uno de los materiales más empleados a nivel global (Yang & He, 2023).

Entre las exigencias más comunes en obras de infraestructura moderna se encuentra la aceleración del fraguado del concreto, lo cual es especialmente útil en entornos de prefabricación o en climas fríos, donde los tiempos de curado suelen extenderse. Para tal fin, se utilizan aditivos acelerantes que permiten reducir el tiempo requerido para que el concreto alcance su resistencia inicial. No obstante, muchos acelerantes disponibles comercialmente, como los formulados con cloruro de calcio, presentan problemas asociados a la corrosión del acero de refuerzo en el concreto armado, lo cual compromete la vida útil de la estructura (Li, Lv & Wei, 2023). Como respuesta, se han explorado otras formulaciones, como las basadas en nitratos o formiatos, aunque estas presentan altos costos y baja disponibilidad regional (Dobiszewska & Beycioğlu, 2020).

Por otra parte, el manejo de residuos derivados de la industria extractiva representa un reto ambiental significativo. El polvo de basalto, subproducto generado durante la trituración de roca volcánica, es un residuo que actualmente tiene poco aprovechamiento a gran escala. No obstante, investigaciones recientes han demostrado que este material posee una composición rica en óxidos de silicio, aluminio, calcio y hierro, que pueden reaccionar favorablemente durante las etapas iniciales de hidratación del cemento, contribuyendo a un fraguado más rápido y a un desarrollo temprano de resistencia mecánica (Dobiszewska & Beycioğlu, 2020; Li et al., 2023).

Además, estudios han evaluado el uso de polvo y fibras de basalto como adiciones al concreto, encontrando beneficios como una mejora en la resistencia a compresión, reducción de la permeabilidad y aumento en la durabilidad frente a

ambientes agresivos (Chen et al., 2020). Estos hallazgos respaldan el potencial del polvo de basalto como componente activo en formulaciones de aditivos acelerantes, al mismo tiempo que se promueve la valorización de residuos y se minimiza el uso de productos químicos convencionales.

En este contexto, la presente investigación plantea la formulación de un acelerante líquido de fraguado a partir de polvo de basalto activado en medio acuoso, evaluando su efecto sobre el comportamiento mecánico del concreto estructural. El objetivo es desarrollar un aditivo de bajo costo, ecológicamente viable y técnicamente eficiente que contribuya a la mejora del concreto en aplicaciones estructurales críticas, especialmente en proyectos con requerimientos de fraguado rápido o producción industrializada.

1.2 Antecedentes

El concreto es el material de construcción más empleado a nivel mundial debido a su versatilidad, durabilidad y bajo costo relativo. Su uso masivo se extiende desde edificaciones residenciales hasta grandes obras de infraestructura. No obstante, una de sus limitaciones más comunes radica en el lento desarrollo de resistencia mecánica, especialmente en las primeras edades de curado, lo cual puede representar un obstáculo en proyectos que requieren una rápida puesta en servicio o retiro temprano de moldes (Moawad et al., 2023; Istuque et al., 2023).

Para solventar esta problemática, la industria ha recurrido a la incorporación de aditivos químicos acelerantes, los cuales buscan modificar la cinética de hidratación del cemento Portland. El objetivo principal de estos aditivos es promover la formación temprana de productos hidratados como el gel C-S-H (silicato cálcico hidratado) y la etringita, acortando así el tiempo de fraguado y acelerando el desarrollo de resistencia (Wang et al., 2022). El cloruro de calcio (CaCl_2) ha sido ampliamente utilizado como acelerante por su alta eficiencia; sin embargo, está limitado en aplicaciones estructurales debido a su potencial para inducir corrosión en el acero de refuerzo (Dinh & Anh, 2023).

Ante estas restricciones, se han explorado alternativas como acelerantes a base de nitratos, formiatos, aluminatos y compuestos orgánicos. Si bien estos

aditivos eliminan el riesgo de corrosión, presentan como desventajas su alto costo y su limitada disponibilidad en ciertas regiones geográficas (Zhang et al., 2022). Por lo tanto, la búsqueda de aditivos sostenibles, de bajo impacto ambiental y provenientes de recursos naturales o subproductos industriales ha cobrado gran relevancia en el contexto de la construcción verde y la economía circular.

En este marco, el polvo de basalto —residuo fino resultante del procesamiento y trituración de roca volcánica— emerge como un material con alto potencial para aplicaciones cementantes. Su composición química está dominada por óxidos de silicio, aluminio, hierro, calcio y magnesio, elementos que han demostrado ser activos en procesos de hidratación y nucleación cuando se activan en medios acuosos (Ghanem et al., 2024; Youness et al., 2024).

Estudios recientes han revelado que el polvo de basalto puede actuar como microrelleno, mejorando la compacidad de la matriz cementante, reduciendo la porosidad del concreto y aumentando la resistencia mecánica y la durabilidad frente a agentes agresivos (Kostrzewa-Demczuk et al., 2023). En investigaciones experimentales se ha observado que, bajo condiciones ligeramente ácidas o alcalinas, este material libera iones metálicos que aceleran la formación de productos cementantes, reduciendo significativamente los tiempos de fraguado sin necesidad de añadir cloruros ni productos sintéticos (Youness et al., 2024).

Históricamente, el empleo de materiales de origen volcánico en la construcción no es nuevo. Desde la antigua Roma, las cenizas volcánicas (puzolanas naturales) fueron utilizadas como adición activa al cemento para mejorar su durabilidad, como lo demuestra la resistencia de estructuras como el Panteón de Roma. En la actualidad, el basalto ha sido utilizado también para fabricar refuerzos poliméricos (GFRP), morteros geopoliméricos y como componente mineral activo en mezclas cementantes (Sarıdemir et al., 2022).

En el caso particular de México, el basalto es un recurso ampliamente disponible en entidades como Hidalgo, Estado de México, Puebla, Tlaxcala y Veracruz, lo que facilita su recolección y valorización. Sin embargo, su uso como aditivo acelerante en forma líquida aún no ha sido ampliamente documentado ni aprovechado industrialmente. Su activación en medio acuoso, mediante agentes

orgánicos como el ácido cítrico, puede facilitar la liberación controlada de los iones reactivos —presentes en los óxidos metálicos— que favorezcan la hidratación del cemento.

Con base en estos antecedentes, esta investigación propone la formulación de un acelerante líquido de fraguado a partir de polvo de basalto activado, como una alternativa innovadora, técnica y ambientalmente viable. El objetivo es evaluar su efecto en el comportamiento del concreto estructural, analizando tanto el tiempo de fraguado como el desarrollo de resistencia a la compresión en distintas edades, promoviendo con ello una solución de bajo impacto ambiental y alto rendimiento para aplicaciones de prefabricación y construcción rápida.

1.3 Justificación

El desarrollo de aditivos que aceleren el fraguado del concreto responde a una necesidad técnica apremiante en la industria de la construcción, especialmente en proyectos que requieren rápidas liberaciones de cimbras, aplicaciones en climas fríos o trabajos de reparación donde el tiempo es un factor crítico. Los acelerantes convencionales, como el cloruro de calcio, han demostrado ser eficaces en la reducción de los tiempos de fraguado; sin embargo, su uso en concreto reforzado está restringido debido a su efecto corrosivo sobre las armaduras metálicas (Ghanem et al., 2024). Este factor compromete la durabilidad a largo plazo de las estructuras, lo que ha motivado la búsqueda de alternativas seguras y ambientalmente viables.

El polvo de basalto, un subproducto del procesamiento de roca volcánica, representa una oportunidad para formular acelerantes con base en materiales disponibles localmente y con una huella ambiental reducida. Este residuo es particularmente rico en óxidos de calcio (CaO), hierro (Fe_2O_3), silicio (SiO_2) y magnesio (MgO), elementos que pueden participar activamente en los procesos de hidratación del cemento (Kostrzewa-Demczuk et al., 2023). Investigaciones han demostrado que, al ser finamente dividido, el polvo de basalto actúa no solo como relleno físico, sino también como un agente que acelera la formación de productos

hidratados, mejorando tanto el fraguado como la microestructura del concreto (Youness et al., 2024; Liu et al., 2021).

En la actualidad, la mayoría de los estudios sobre este material se centran en su uso como adición sólida o mineral suplementario; sin embargo, su transformación en un aditivo líquido representa un campo escasamente explorado. La elaboración de un acelerante líquido a partir de polvo de basalto activado en solución permitiría una incorporación más homogénea en la mezcla de concreto, garantizando una mejor dispersión y reacción química en etapas tempranas (Moawad et al., 2023). Este enfoque también permite ajustar la formulación en función de variables como el pH, la concentración iónica y el grado de solubilización de los minerales activos.

Desde el enfoque ambiental, el aprovechamiento del polvo de basalto está alineado con los principios de economía circular y reducción del impacto ecológico. Al transformar un residuo industrial en un insumo de valor agregado, se contribuye a disminuir la generación de desechos, reducir la extracción de materias primas vírgenes y mitigar las emisiones indirectas de CO₂ asociadas a la producción de aditivos químicos tradicionales (Gupta & Kua, 2022). Además, su abundancia en regiones volcánicas de México, como Hidalgo, Puebla, Veracruz y el Estado de México, asegura su disponibilidad y viabilidad logística para un uso extendido en la industria nacional de la construcción (Dinh & Anh, 2023).

Por otro lado, la implementación de un acelerante líquido de origen mineral no requiere modificaciones significativas en los procesos constructivos convencionales. Este tipo de aditivo puede ser fácilmente dosificado en planta o en obra, con un control más preciso sobre su proporción y efecto, lo que resulta ideal tanto para proyectos de gran escala como para aplicaciones específicas, como la prefabricación o las construcciones con alta rotación de encofrado.

En este contexto, el presente estudio busca contribuir al desarrollo de materiales cementantes más eficientes, seguros y sostenibles, mediante la formulación y evaluación de un acelerante líquido a base de polvo de basalto. La propuesta combina aspectos de innovación tecnológica con beneficios ambientales y operativos, lo que justifica su pertinencia y su potencial para generar conocimiento

aplicable tanto en la práctica profesional como en futuras líneas de investigación científica.

1.4 Objetivo general

Formular y evaluar un acelerante líquido de fraguado elaborado a partir de polvo de basalto como residuo industrial, con el fin de reducir los tiempos de fraguado del concreto estructural sin comprometer sus propiedades mecánicas.

1.5 Objetivos específicos

- ❖ Caracterizar física y químicamente el polvo de basalto residual, a fin de determinar su composición mineralógica y evaluar su potencial como insumo para la formulación de aditivos acelerantes.
- ❖ Formular un acelerante líquido de fraguado mediante la activación del polvo de basalto en medio acuoso, considerando su concentración óptima y condiciones de aplicación.
- ❖ Evaluar la resistencia a compresión del concreto estructural con y sin la incorporación del acelerante líquido a base de basalto, a las edades de 7, 14, 21 y 28 días, conforme a las normas ASTM C39/C39M-23 y NMX-C-083-ONNCCE-2014.
- ❖ Comparar el desempeño mecánico del concreto modificado con el acelerante formulado frente a una mezcla control sin aditivos, estableciendo su efecto sobre el desarrollo de resistencia a corto y mediano plazo.

1.6 Planteamiento del problema

En la actualidad, la industria de la construcción enfrenta desafíos relacionados con la sostenibilidad y la eficiencia de los materiales empleados en obra. Uno de los aspectos críticos es el tiempo de fraguado del concreto, ya que en proyectos de producción acelerada —como la prefabricación o el colado masivo en climas fríos—, se requiere reducir significativamente el tiempo entre la colocación y

el endurecimiento del material. Tradicionalmente, esto se logra mediante el uso de aditivos acelerantes. Sin embargo, muchos de los acelerantes comerciales están compuestos por sales de cloruro, como el cloruro de calcio, que pueden inducir procesos de corrosión en el acero de refuerzo y comprometer la durabilidad del concreto estructural (Ghanem et al., 2024; Gupta & Kua, 2022).

Como alternativa, se han desarrollado aditivos a base de nitratos, formiatos o materiales de origen orgánico. Aunque estos compuestos reducen el riesgo de corrosión, su alto costo y limitada disponibilidad regional restringen su uso en contextos de bajo presupuesto o en zonas con limitada infraestructura industrial (Kosmtka et al., 1992; Gupta & Kua, 2022). Al mismo tiempo, el concepto de economía circular ha promovido el aprovechamiento de residuos industriales con propiedades potencialmente activas, tal como ocurre con el polvo de basalto, un subproducto generado durante la trituración de esta roca volcánica ampliamente disponible en México.

El polvo de basalto presenta una composición rica en óxidos metálicos (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , FeO , entre otros), que puede favorecer la hidratación del cemento y actuar como acelerante en ciertas condiciones. Sin embargo, su aplicación directa como aditivo aún no ha sido suficientemente evaluada desde un enfoque experimental estructurado que considere tanto el desempeño mecánico del concreto como el impacto ambiental del residuo (Youness et al., 2024; Molaes-Cervantes et al., 2024).

A nivel institucional y regional, este estudio cobra especial relevancia, ya que permitiría aprovechar un residuo local abundante como el polvo de basalto para sustituir parcial o totalmente aditivos comerciales, reduciendo costos, mitigando impactos ambientales y promoviendo el desarrollo tecnológico local. Esta investigación busca responder a la necesidad de materiales más eficientes, accesibles y sostenibles en el contexto de la construcción estructural.

1.7 Pregunta de investigación

¿De qué manera influye un acelerante líquido formulado a partir de polvo de basalto residual en el tiempo de fraguado y en el comportamiento mecánico a compresión del concreto estructural, en comparación con mezclas convencionales sin aditivo?

1.8 Hipótesis

La incorporación de un acelerante líquido formulado a partir de polvo de basalto activado reduce significativamente los tiempos de fraguado del concreto estructural y mejora su resistencia mecánica a edades tempranas, sin afectar negativamente su resistencia final.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos básicos

Dentro de este apartado se abarcarán las limitaciones del presente estudio, además de conocer los conceptos básicos que engloban el proceso experimental y que servirán de apoyo para su entendimiento.

2.1.1 Concreto

El concreto es un bien creado por el hombre que funge como material de construcción, y se obtiene en base a una mezcla heterogénea compuesta por cemento, agregados finos —como la arena—, agregados gruesos —como la grava—, a la cual se le añade agua para su curado y endurecimiento, teniendo como resultado una masa sólida semejante a una roca. (de Guzmán & D.S, 2001). Esta mezcla, una vez endurecida, forma un cuerpo sólido capaz de resistir esfuerzos de compresión, razón por la cual se emplea en una gran variedad de elementos estructurales como columnas, losas, cimentaciones y muros. A pesar de su alta resistencia a compresión, presenta una baja resistencia a la tracción, por lo que generalmente se refuerza con acero, formando el denominado concreto reforzado (Neville, 2012).

Actualmente, existen diversos tipos de concretos, los cuales son utilizados de manera específica, por ejemplo, el concreto ligero (ver Figura 2.1), el cual es utilizado en obras donde se necesita una alta fluidez de mezcla.

Cada obra presenta diferentes características y complejidades, por lo cual los concretos deberán de satisfacer estas necesidades de manera eficiente y satisfactoria.



Figura 2.1.1. Ejemplo de la aplicación del concreto ligero. Fuente: (Galistar, 2019)

Las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto mencionan quince tipos de concreto: Concreto autocompactante, concreto bajo en carbono, concreto con adiciones recicladas, concreto con agregado plástico artificial, concreto con cemento alternativo, concreto de alta resistencia (CAR), concreto de ultra alto desempeño (CUAD), concreto lanzado, concreto ligero, concreto masivo, concreto para impresión digital (Impresión 3D), concreto polimérico, concreto reforzado con fibras, concreto reforzado con materiales poliméricos reforzado con fibras, concreto con agregado reciclado (NTC, 2023). En la tabla 2.1, se muestran los tipos de concreto y sus características.

Tabla 2.1. Tipos de concreto y sus características. Fuente: (NTC, 2023).

Tipos de Concretos	Características
Concreto Autocompactante	Aquel que, por efecto de una dosificación adecuada, así como por aditivos superplastificantes y modificadores de viscosidad, se compacta por su propio peso.
Concreto Bajo en Carbono	Son aquellos que, en el proceso de fabricación de materia prima para el concreto, muestra una reducción de al menos 30% en la emisión de dióxido de carbono comparado con un concreto de referencia.
Concreto con Adiciones Recicladas	Es aquel al que se le adiciona material triturado como materia prima del concreto (caucho triturado, desecho electrónico triturado, PET triturado, entre otros.)
Concreto con Agregado Plástico Artificial	Es aquel que reemplaza parcialmente al agregado grueso o fino por material plástico reciclado.
Concreto con Cemento Alternativo	Es aquel que reemplaza total o parcialmente al cemento portland en ciertas aplicaciones.
Concreto de Alta Resistencia	Son aquellos que desarrollan resistencias a compresión mayores a 700 kg/cm^2 y menores a 1000 kg/cm^2 .
Concreto de Ultra Alto Desempeño	Son aquellos que desarrollan resistencias a compresión mayores a 1000 kg/cm^2 y menores a 2500 kg/cm^2 .

Concreto Lanzado	Se coloca el concreto por medios neumáticos a alta velocidad en capas delgadas sobre la superficie a ser recubierta.
Concreto Ligero	Aquel cuyo peso volumétrico en estado fresco sea menor a 1900 kg/m ³ .
Concreto Masivo	Cualquier volumen de concreto cuya combinación de los elementos a colar conduzca a esfuerzos térmicos no deseados, agrietamiento, reacciones químicas nocivas o disminución de la resistencia a largo plazo.
Concreto para Impresión Digital	Es el colocado capa por capa sin el uso de algún molde de soporte ni vibración mediante un proceso mecánico que consta de una impresora digital de concreto.
Concreto Polimérico	Es la mezcla de agregados y resinas sin cemento portland que endurece por polimerización.
Concreto Reforzado con Fibras	Incluye en su composición fibras distribuidas aleatoriamente en la masa de concreto. Su aplicación puede ser estructural o no estructural.
Concreto Reforzado con Materiales Poliméricos Reforzado con Fibras	Aquel que está reforzado con barras de un material compuesto para el refuerzo interno del concreto.
Concreto con Agregado Reciclado	Concretos fabricados con agregado grueso reciclado proveniente de la trituración de residuos de concreto

Actualmente, el concreto es el material de construcción más utilizado a nivel mundial debido a su versatilidad, disponibilidad de materias primas, facilidad de conformado y costo relativamente bajo. Sin embargo, su desempeño está altamente influenciado por factores como la relación agua/cemento, el tamaño y tipo de los agregados, la calidad del curado y el uso de aditivos o materiales suplementarios cementantes (Zhao et al., 2022).

En los últimos años, se ha promovido la incorporación de residuos industriales, materiales puzolánicos y aditivos funcionales como parte de una estrategia de sostenibilidad y durabilidad en la industria del concreto. Estos avances buscan optimizar el rendimiento mecánico, mejorar la durabilidad frente a agentes agresivos y reducir la huella ambiental del proceso constructivo (Istuque et al., 2023; Ghanem et al., 2024).

Particular atención ha recibido la modificación del concreto a través de aditivos químicos que alteran su comportamiento en estado fresco y endurecido. En este contexto, los acelerantes de fraguado cumplen un papel fundamental, ya que permiten reducir significativamente el tiempo de endurecimiento y puesta en servicio, lo cual es clave en prefabricados, obras urgentes o construcciones en climas fríos (Moawad et al., 2023).

2.1.2 Cemento

El cemento desde la antigüedad ha sido bastante utilizado por diversas civilizaciones, principalmente por la civilización romana (Ver Figura 2.2). El cemento tipo portland fue patentado por Joseph Aspdin en 1824 y desde entonces se ha convertido en el material por excelencia para la construcción de cualquier obra civil debido a su gran versatilidad y durabilidad.



Figura 2.1.2. Ejemplo del concreto romano utilizado en el Coliseo Romano.

Fuente: (ArchDaily, 2013).

El cemento portland es un material pulverulento de origen mineral, que actúa como agente aglomerante en la elaboración de concreto. Este se crea a partir de la calcinación de piedra caliza acompañada de arcillas a 1500°, de este proceso se le denomina “Clínker”. El Clínker produce dos silicatos de calcio, un aluminato de calcio y un ferroaluminato de calcio, además de algunas formas de sulfato de calcio provenientes de la adición de yeso al clínker para regular su fraguado (Sharp & J.H., 2006).

Dentro de México, la NMX-C-414-ONNCCE-2017 “Industria de la Construcción – Cementantes Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Ensayo” designa los tipos de cementos que se fabrican nacional o extranjera y se comercializan en territorio nacional, cementos que se clasifican según sus compuestos (NMX-C-414-ONCCE-2017, 2018):

- A.** CPO: Cemento Portland Ordinario.
- B.** CPP: Cemento Portland Puzolánico.

-
- A.** CPEG: Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno.
 - B.** CPC: Cemento Portland Compuesto.
 - C.** CPS: Cemento Portland con Humo de Sílice.
 - D.** CEP: Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno.

Igualmente, en la norma se dividen los cementos con base a ciertas características especiales, las cuales pueden ser:

- A.** RS: Resistente a Sulfatos.
- B.** BRA: Baja Reactividad Álcali agregado.
- C.** BCH: Bajo Calor de Hidratación.
- D.** B: Blanco.

Cabe recalcar que cada tipo de cemento y sus características especiales pueden estar adicionados a clases resistentes: 20, 30, 30R, 40 y 40R —resistencias de entre 200 y 400 kg/cm²—. La letra “R” señala la resistencia especificada que deben de cumplir a los tres días.

En la norma estadounidense ASTM C 150, se clasifica el cemento portland en ocho tipos de cementos, los cuales tienen una función en específico que depende de cada proyecto u obra, como son (ASTM, 2007):

- A.** Tipo I: Sencillo.
- B.** Tipo IA: Sencillo con Entrada de Aire.
- C.** Tipo II: Resistente a Sulfatos o a Calor Moderado de Hidratación.
- D.** Tipo IIA: Resistente a Sulfatos o a Calor Moderado de Hidratación con Entrada de Aire.
- E.** Tipo III: Alta Resistencia Inicial.
- F.** Tipo IIIA: Alta Resistencia Inicial con Entrada de Aire.
- G.** Tipo IV: Con Calor bajo de Hidratación.
- H.** Tipo V: Alta Resistencia a Sulfatos.

Estos cementos pueden ser designados a través de una clasificación mixta, lo que indica que un cemento es capaz de cumplir con los requisitos señalados de los tipos indicados —Tipo I/II, por ejemplo—, y puede ser utilizado para el uso de cualquiera de los tipos.

Todos estos tipos de cementos respetan la composición principal de Clinker y yeso (Neville, 2013; Mehta & Monteiro, 2014).

2.1.3 Agua

El agua cumple un papel fundamental en la elaboración del concreto, ya que es el medio a través del cual se inicia la hidratación del cemento, proceso que permite el fraguado y endurecimiento del sistema cementante. Químicamente, el agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O) y tiene la capacidad de disolver una amplia variedad de compuestos, por lo que se le conoce como “disolvente universal”.

El exceso o deficiencia de agua puede afectar el fraguado, la resistencia, la retracción y la permeabilidad del concreto, de ahí que su dosificación deba ser controlada con precisión.

2.1.4 Agregados

Son materiales pétreos que se pueden obtener de dos fuentes: en depósitos de origen natural —como montañas, ríos, playas, entre otros— y como producto de trituración de rocas. Los agregados son divididos en función a su tamaño, existen los agregados finos, los cuales deben de tener partículas mayores a 60μm y menores a 5 mm, y también existen los agregados gruesos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta 125 mm. Según (Yam et al., 2003), el peso específico de los agregados puede influir en el peso unitario del concreto, dividiéndose en:

1. Liger.
2. Normal.
3. Pesado.

La resistencia de los agregados no maneja un papel en la resistencia del concreto debido a que la partícula del concreto suele ser más fuerte que la matriz y la zona de transición, sin embargo, otras propiedades como el tamaño, la forma, textura de superficie y mineralogía pueden afectar el concreto en ciertos grados

diferentes, la tabla 2.2 muestra estas propiedades y su papel en la resistencia del concreto.

Tabla 2.2. Propiedades de los agregados y su función en el concreto.

Fuente: (Yam, 2003).

Propiedad del Agregado	Función en la Mezcla de Concreto
Absorción	La capacidad de absorción que los agregados tienen influye directamente en la trabajabilidad de la mezcla, su consistencia, entre otros.
Tamaño del agregado	Si el agregado es grande, la pasta de concreto debe de cubrir más área de agregados, reduciendo su fluidez.
Forma del agregado	Tiene incidencia sobre la trabajabilidad del concreto fresco.
Granulometría en agregados gruesos	Son aquellos agregados gruesos que pueden afectar las porciones relativas de los agregados, así como la relación agua/cemento, la trabajabilidad y la durabilidad del cemento. Esto debido a que un agregado muy grueso vuelve muy rígida a la mezcla.
Módulo de Finura en agregados finos	Aquellas arenas que superen el módulo de finura de 3.1 crean una mezcla poco trabajable, faltando cohesión entre sus componentes, elevando el consumo de cemento para equilibrar la mezcla. Por el contrario, cuando el módulo de finura es menor a 2.2, se crean mezclas de concreto pastosas, además de

	reducir la resistencia del concreto, aumentando la posibilidad de agrietamiento tipo contracción por secado.
Contenido excesivo de materiales finos en agregados gruesos	Este puede provocar problemas similares a los que suele causar un módulo de finura menor a 2.2 en el concreto. Por medio de la prueba de pérdida por lavado se puede saber este contenido, expresado como porcentaje de la mezcla total.
Porosidad	Esta propiedad potencia la adherencia entre los elementos de la mezcla de concreto, aumentando su resistencia.

Los agregados tienen un papel fundamental dentro del concreto, su implementación inadecuada puede afectar negativamente el rendimiento, la durabilidad y resistencia del concreto, comprometiendo su aplicación.

2.1.5 Relación agua/cemento

La relación agua/cemento (a/c) del concreto se define como la proporción entre la masa de agua y la masa de cemento en una mezcla. Esta relación afecta tanto la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco como su resistencia y durabilidad en estado endurecido, ya que, una gran relación de agua/cemento (≥ 0.6) involucra un descenso de la resistencia del material a causa de un mayor volumen de espacios generados por el agua libre. Por el contrario, una relación agua/cemento pobre (≤ 0.45) produce mezclas de concretos densos, menos porosos y más resistentes a agentes corrosivos, sin embargo, puede dificultar su trabajabilidad y maniobrabilidad, comprometiendo su aplicación *in situ* (Madrigal et al., 2012).

El equilibrio adecuado entre trabajabilidad y resistencia se logra optimizando la relación a/c y utilizando aditivos como reductores de agua o modificadores reológicos. Además, al diseñar concretos con adiciones como polvo de basalto, es necesario evaluar cómo estas partículas finas afectan la demanda de agua de la mezcla y su efecto sobre la hidratación del cemento (Youness et al., 2024).

2.1.6 Fraguado del concreto

El término se refiere al proceso que existe en el concreto al endurecerse a causa de las reacciones químicas entre el cemento y el agua, marcando el fin de su trabajabilidad y plasticidad e iniciando el desarrollo de su resistencia (Neville, 2013; Mehta & Monteiro, 2014).

Desde un punto de vista químico, el fraguado se asocia principalmente a la hidratación del aluminato tricálcico (C_3A) y del silicato tricálcico (C_3S), cuyas reacciones producen compuestos como la etringita y el gel C-S-H, generando un entrelazado progresivo de productos que reduce la movilidad de las partículas (Zhao et al., 2022). El fraguado se divide generalmente en dos etapas:

- ❖ **Fraguado Inicial:** Indica el momento en que la mezcla comienza a endurecer y deja de ser trabajable.
- ❖ **Fraguado Final:** Indica el momento en que el concreto ha adquirido rigidez suficiente para soportar cargas leves sin deformarse.

En la figura 2.1.6 se presenta la curva resistencia a la compresión con relación al proceso de endurecimiento.

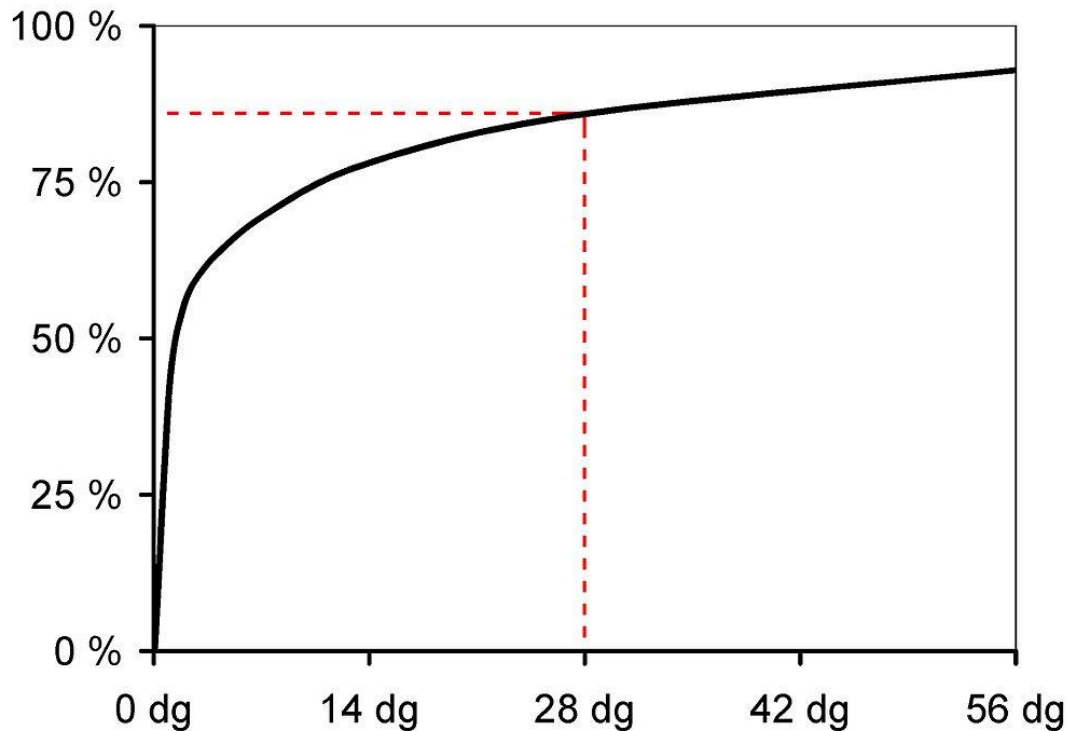


Figura 2.1.6. Curva de resistencia con relación a los días de nacimiento del cemento portland. Fuente: (Teorías del Hormigón, 2014).

El fraguado es un parámetro clave en el control de calidad del concreto y está estandarizado en normativas como la ASTM C191 y la NMX-C-177-ONNCCE, que especifican los métodos para determinar el tiempo de fraguado del cemento por medio de la aguja de Vicat.

Factores como la temperatura, la relación agua/cemento, el tipo de cemento y el uso de aditivos químicos pueden modificar significativamente los tiempos de fraguado. Acelerantes como los nitratos, formiatos o el polvo de basalto activado pueden reducir estos tiempos, lo cual es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere una puesta en servicio rápida o en condiciones climáticas frías (Moawad et al., 2023; Youness et al., 2024).

2.1.7 Endurecimiento del concreto

El endurecimiento o también llamado rigidización del concreto es la pérdida progresiva de su consistencia plástica a causa de las reacciones químicas

tempranas de hidratación que inician una vez se realiza la mezcla y aumentan tras el fraguado (Neville, 2013; Mehta & Monteiro, 2014).

El proceso inicia inmediatamente después del fraguado final y se extiende durante días, semanas o incluso meses, dependiendo de las condiciones de curado, el tipo de cemento y la presencia de aditivos. El principal producto responsable del endurecimiento es el gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H), cuya formación gradual rellena los poros capilares, disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia a compresión y tracción del concreto (Neville, 2012; Ghanem et al., 2024).

El endurecimiento puede dividirse en dos etapas:

1. Etapa temprana: Aquella en la que se desarrolla la resistencia inicial y es fundamental para el desencofrado y manipulación de elementos estructurales.
2. Etapa de endurecimiento a largo plazo: Asegura la durabilidad y el desempeño mecánico a lo largo de la vida útil de la estructura.

La incorporación de aditivos como el polvo de basalto en formulaciones líquidas ha demostrado tener un efecto positivo sobre la velocidad de endurecimiento, debido a su capacidad para actuar como nucleador de productos hidratados y a su contenido de óxidos metálicos que promueven la hidratación del cemento (Youness et al., 2024; Ghanem et al., 2024). Este comportamiento es especialmente deseable en aplicaciones de concreto de fraguado rápido o en prefabricados estructurales.

2.2 Propiedades del concreto

2.2.1 Propiedades del concreto en estado fresco

El concreto en estado fresco se refiere a la mezcla aún no endurecida de cemento, agua, agregados y, en algunos casos, aditivos. Sus propiedades determinan la facilidad con la que puede ser manejado, transportado, colocado y compactado sin pérdida significativa de homogeneidad. Entre sus características principales destacan la trabajabilidad, la consistencia —medida por el

revenimiento—, la segregación, la exudación y el tiempo de fraguado (Pacheco, 2017; Mehta & Monteiro, 2014).

La trabajabilidad se define como la facilidad de colocación del concreto con el mínimo de pérdida por segregación. Esta propiedad es crucial para asegurar que la mezcla pueda fluir adecuadamente dentro del molde o encofrado, rodeando adecuadamente las armaduras sin generar vacíos. El revenimiento, evaluado mediante la prueba del cono de Abrams según la norma ASTM C143, es un indicador directo de la consistencia y fluidez del concreto fresco.

La segregación ocurre cuando los componentes más pesados del concreto —agregados gruesos— tienden a separarse de la pasta de cemento, afectando la homogeneidad y resistencia de la mezcla. La exudación, por su parte, es la salida de agua libre a la superficie de la mezcla, lo cual puede generar debilidad en la interfase agregado-matriz y fisuras por retracción plástica (Zhao et al., 2022).

El uso de aditivos minerales finos, como el polvo de basalto, puede mejorar la cohesión de la mezcla y reducir tanto la exudación como la segregación al actuar como material de relleno y modificador reológico (Ghanem et al., 2024).

2.2.2 Propiedades del concreto endurecido

Una vez que el concreto ha fraguado y se ha completado el proceso de hidratación en niveles significativos, se considera en estado endurecido. En esta condición, el material desarrolla propiedades que permiten su uso estructural, como la resistencia mecánica, y la estabilidad dimensional.

La resistencia a compresión es la propiedad mecánica más representativa del concreto y la más utilizada para su clasificación y control de calidad. Sin embargo, el concreto también posee una resistencia moderada a tracción, flexión y corte, propiedades que dependen en gran medida de la calidad de los agregados, el tipo de cemento y el grado de curado (Neville, 2012; Pacheco, 2017).

Otras propiedades importantes del concreto endurecido incluyen:

- A.** Impermeabilidad: Capacidad para resistir el ingreso de agua o agentes agresivos; influida por la porosidad y microestructura.

-
- B.** Resistencia térmica: Capacidad de conservar sus propiedades bajo cambios de temperatura.
 - C.** Durabilidad: Resistencia frente a la acción de ambientes agresivos, como cloruros, sulfatos, ciclos de congelación y descongelación o ataque ácido.

Estudios recientes han demostrado que la incorporación de adiciones minerales finas, como el polvo de basalto activado, mejora la densidad del concreto, disminuye su porosidad y favorece la formación de productos hidratados como el C-S-H, incrementando así la resistencia mecánica y la durabilidad frente a ambientes agresivos (Youness et al., 2024; Istuque et al., 2023).

2.2.3 Factores que influyen en la resistencia mecánica

La resistencia del concreto está limitada principalmente en la relación agua/cemento, sin embargo, factores como la geometría, velocidad de aplicación y condición de humedad pueden tener un efecto importante en su resistencia (Neville, 2013; Mehta & Monteiro, 2014).

Otros factores que inciden de forma significativa en la resistencia del concreto incluyen:

- A.** Compactación y vibrado: Eliminan vacíos e incrementan la densidad de la mezcla.
- B.** Curado: Promueve la hidratación continua del cemento; su ausencia puede reducir la resistencia final en más del 50 %.
- C.** Tamaño y forma de los agregados: Afectan la zona de transición interfacial y la homogeneidad.
- D.** Temperatura ambiental: Influye en la cinética de hidratación.
- E.** Uso de aditivos: Tanto químicos como minerales pueden modificar el desarrollo de resistencia.

En este sentido, el uso de polvo de basalto como aditivo mineral ha mostrado resultados prometedores en la mejora de la microestructura del concreto, al actuar como nucleador de productos hidratados y fomentar un fraguado más uniforme y

rápido, lo que repercute en un aumento de la resistencia temprana (Ghanem et al., 2024; Moawad et al., 2023).

2.3 Aditivos para concreto

2.3.1 Clasificación de los aditivos

Los aditivos son sustancias incorporadas en pequeñas cantidades durante el mezclado del concreto —en proporciones no superiores al 5 % respecto al peso del cemento—, con el fin de modificar o mejorar una o más de sus propiedades en estado fresco o endurecido. Su uso se ha consolidado como una estrategia clave en la tecnología del concreto para adecuarlo a condiciones específicas de obra, ambientales o de desempeño (Neville, 2012; Mehta & Monteiro, 2014).

Los aditivos permiten mejorar la trabajabilidad, controlar el fraguado, incrementar la resistencia mecánica temprana, reducir la permeabilidad, mejorar la durabilidad frente a agentes agresivos, controlar la expansión por reacción álcali-sílice, y facilitar la colocación del concreto bajo temperaturas extremas o en elementos densamente armados (Istuque et al., 2023).

Los aditivos pueden clasificarse de acuerdo con dos criterios principales: su composición química y su función en el concreto. Según su composición, pueden estar formulados a base de:

- A.** Sales solubles: Cloruros, nitratos, formiatos y carbonatos.
- B.** Surfactantes: Modifican la tensión superficial de la mezcla.
- C.** Polímeros solubles: Lignosulfonatos y policarboxilatos.
- D.** Materiales minerales: Se incluyen materiales puzolánicos o finos reactivos como la sílice, el metacaolín o el polvo de basalto micronizado.

En función de su efecto en la mezcla, los aditivos se agrupan en categorías funcionales reconocidas por normas como la ASTM C494 y la NMX-C-255-ONNCCE:

- A.** Reductores de agua (superplastificantes).
- B.** Retardantes del fraguado.
- C.** Acelerantes del fraguado y de la resistencia inicial.

-
- D. Incluidores de aire.
 - E. Inhibidores de corrosión.
 - F. Aditivos impermeabilizantes.
 - G. Modificadores de viscosidad y reología.

Cada uno de estos tipos responde a requerimientos específicos de diseño y ejecución de obras de concreto, y su uso debe estar cuidadosamente controlado para evitar interacciones negativas entre componentes (Moawad et al., 2023).

2.3.2 Aditivos acelerantes

Los aditivos acelerantes son aquellos que reducen el tiempo de fraguado y/o aceleran el desarrollo de resistencia mecánica inicial del concreto, sin afectar negativamente su comportamiento a largo plazo. Su acción se basa en la modificación de la cinética de hidratación del cemento, particularmente en las primeras horas tras el mezclado, promoviendo la formación temprana de productos hidratados como el C-S-H y la etringita (Neville, 2012; Mehta & Monteiro, 2014).

Desde el punto de vista químico, los acelerantes funcionan mediante la disolución y activación de los iones presentes en el cemento, como el calcio (Ca^{2+}), el silicato (SiO_4^{4-}) y el aluminato (AlO_4^{5-}), alterando el pH del sistema y facilitando la nucleación de cristales hidratados. Esto acelera el fraguado inicial y mejora la cohesión de la pasta cementante en etapas tempranas (Zhao et al., 2022).

Tradicionalmente, se han utilizado sales como el cloruro de calcio (CaCl_2) por su efectividad en condiciones frías; sin embargo, su uso está restringido en concreto reforzado debido a su capacidad para inducir corrosión en el acero. Por esta razón, se han desarrollado alternativas sin cloruros, como los nitratos, formiatos, aluminatos y aditivos orgánicos o minerales (Moawad et al., 2023).

En este contexto, investigaciones recientes han mostrado que materiales finos ricos en óxidos metálicos, como el polvo de basalto, pueden actuar como acelerantes de fraguado ecológicos, especialmente cuando se activan en medios ligeramente ácidos o alcalinos. Estos materiales promueven la formación de núcleos de hidratación, aceleran el fraguado sin comprometer la durabilidad, y representan

una alternativa sostenible frente a los acelerantes químicos tradicionales (Youness et al., 2024; Ghanem et al., 2024).

El desarrollo de acelerantes líquidos a base de minerales volcánicos, como el propuesto en esta investigación, responde tanto a necesidades técnicas como a criterios ambientales, al reutilizar un residuo de la industria extractiva en una aplicación de valor agregado para el concreto estructural.

2.3.3 Acelerantes convencionales y sus limitaciones

A lo largo de los años, los aditivos químicos han sido ampliamente utilizados para modificar las propiedades del concreto tanto en estado fresco como endurecido. No obstante, su aplicación en proyectos estructurales enfrenta ciertas limitaciones, especialmente cuando se combinan distintos tipos de aditivos sin una adecuada compatibilidad, lo cual puede comprometer la trabajabilidad, el tiempo de fraguado y la resistencia final del material (Neville, 2013; Mehta & Monteiro, 2014). Estas incompatibilidades pueden derivar en reacciones no deseadas, segregación, reducción de la adherencia entre componentes o incluso fallas prematuras del concreto.

En el caso específico de los aditivos acelerantes, su objetivo principal es reducir el tiempo de fraguado y acelerar el desarrollo de resistencia mecánica en las primeras edades, lo cual es especialmente útil en ambientes fríos, aplicaciones prefabricadas y obras de emergencia. Sin embargo, los acelerantes más eficaces históricamente, como el cloruro de calcio (CaCl_2), presentan una importante desventaja: su alta capacidad para inducir procesos de corrosión en el acero de refuerzo del concreto armado. Aunque estos compuestos son efectivos al modificar la cinética de hidratación del cemento y mejorar temporalmente la resistencia mecánica, a largo plazo degradan las armaduras internas, generando expansión, fisuración, pérdida de sección transversal del acero y desprendimiento del recubrimiento de concreto (Ramachandran et al., 2002; Ghanem et al., 2024) (ver figura 2.3.3).



Figura 2.3.3. Daño en el concreto armado a causa de la corrosión en el acero de refuerzo. Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto (1992).

Como respuesta a estas limitaciones, se han desarrollado acelerantes libres de cloruros, cuya composición se basa en nitratos, formiatos, aluminatos y aditivos orgánicos. Estos compuestos reducen significativamente el riesgo de corrosión y son aceptables para uso estructural, incluso en condiciones expuestas a agentes agresivos. Sin embargo, su implementación se ve obstaculizada por su alto costo, baja disponibilidad en algunas regiones y la necesidad de control estricto durante su dosificación, lo cual limita su adopción en obras masivas o en contextos de recursos limitados (Kosmatka et al., 1992; Gupta & Kua, 2022; Zhang et al., 2022).

Frente a este panorama, se abre una oportunidad para el desarrollo de acelerantes alternativos formulados a partir de materiales naturales o subproductos industriales que ofrezcan un balance entre rendimiento técnico, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica. El polvo de basalto, por su composición rica en óxidos de silicio, calcio, aluminio y hierro, ha demostrado ser un candidato prometedor para este propósito, especialmente cuando se activa en soluciones acuosas levemente acidificadas (Youness et al., 2024; Ghanem et al., 2024).

2.3.4 Recomendaciones normativas sobre uso de acelerantes

El uso de aditivos acelerantes en mezclas de concreto está regulado por diversas normas técnicas que buscan asegurar su eficacia, compatibilidad y seguridad estructural. La norma ASTM C494/C494M-24, publicada por ASTM International (2024), establece las especificaciones estándar para los aditivos químicos en el concreto, incluyendo los acelerantes de fraguado y resistencia. Esta normativa enfatiza la necesidad de ensayar previamente cualquier aditivo antes de su uso en obra, ya que dichos productos pueden modificar significativamente las propiedades reológicas, mecánicas y de durabilidad del concreto. Además, la norma indica que debe verificarse que el producto utilizado en obra sea exactamente el mismo que fue ensayado previamente en laboratorio, tanto en términos de marca como de lote de fabricación, a fin de garantizar resultados consistentes.

Por su parte, la norma mexicana NMX-C-255-ONNCCE-2013, emitida por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), establece criterios para la clasificación y requisitos de los aditivos químicos destinados al concreto y mortero. Entre sus disposiciones destaca la obligación de registrar detalladamente en bitácora de obra el tipo de aditivo utilizado, su dosificación, método de aplicación y condiciones ambientales al momento del mezclado. Este registro tiene como objetivo facilitar la trazabilidad de la mezcla y detectar posibles fallos relacionados con el uso incorrecto de aditivos.

Asimismo, tanto ASTM como ONNCCE desaconsejan el uso simultáneo de múltiples aditivos sin realizar estudios previos de compatibilidad, ya que la interacción entre compuestos con funciones distintas —acelerantes, reductores de agua, inclusores de aire, etc.— puede alterar de forma impredecible el comportamiento del concreto. En particular, la adición de un nuevo aditivo a una mezcla que ya contiene otro debe ser evaluada cuidadosamente, preferentemente mediante ensayos piloto, debido a que las interacciones químicas y sus efectos sobre el tiempo de fraguado, la resistencia o la durabilidad son en gran medida desconocidas o no estandarizadas.

En este contexto, cualquier acelerante desarrollado a partir de residuos naturales o industriales —como el caso del acelerante líquido formulado con polvo de basalto— deberá someterse a protocolos de validación experimental y cumplimiento normativo, tanto nacionales como internacionales, antes de su implementación en obra real.

2.4 Uso de materiales alternativos en concreto

2.4.1 Economía circular y sostenibilidad en la construcción

La economía circular ha emergido como un enfoque clave para transformar los modelos productivos tradicionales, basados en la extracción, uso y descarte, hacia sistemas más sostenibles y regenerativos. En el sector de la construcción, esta estrategia busca reducir la presión sobre los recursos naturales mediante la reutilización, el reciclaje y la valorización de residuos, especialmente los generados en actividades de construcción y demolición (López et al., 2020; Masseck & Tapias, 2018).

La industria de la construcción ha sido ampliamente reconocida como una de las mayores responsables de impactos ambientales negativos a nivel global, debido a su elevado consumo de materias primas no renovables, generación masiva de residuos sólidos, y emisiones significativas de gases de efecto invernadero (GEI). Según recientes estudios, este sector consume más del 40 % de los recursos naturales extraídos y genera aproximadamente un 30 % de los residuos sólidos urbanos (Zhou et al., 2023; Kim et al., 2021). Ante esta situación, la Comisión Europea adoptó el Paquete de Economía Circular, estableciendo directrices orientadas a la sostenibilidad en el ciclo de vida de edificaciones e infraestructuras.

Entre los principios fundamentales que promueve este paquete para el sector de la construcción se encuentran:

- ❖ La gestión eficiente de los materiales, promoviendo su recirculación en el ciclo constructivo durante el mayor tiempo posible;
- ❖ El uso racional e indispensable de los recursos naturales, evitando su sobreexplotación;

-
- ❖ La priorización de materiales reciclables o reutilizables, minimizando el uso de insumos no renovables y reduciendo la huella ambiental de los proyectos constructivos.

Además, se fomenta el diseño para la deconstrucción y la modularidad, facilitando la recuperación de materiales al final de la vida útil de las edificaciones (Koutsoumpas et al., 2022). Estas estrategias no solo representan un avance en términos ambientales, sino que también pueden generar beneficios económicos y sociales a través de la innovación, la creación de empleo verde y la reducción de costos operativos.

En este contexto, la incorporación de materiales alternativos —como residuos minerales, cenizas, subproductos industriales o polvos volcánicos— en la formulación de concretos sostenibles, se alinea directamente con los principios de la economía circular. El polvo de basalto, por ejemplo, constituye un residuo de alto volumen derivado del procesamiento de roca volcánica que puede ser transformado en un insumo útil mediante su integración como aditivo funcional o sustituto parcial en mezclas cementantes (Ghanem et al., 2024; Youness et al., 2024).

Por tanto, el desarrollo de tecnologías que permitan valorizar residuos locales como el basalto representa una solución doble: mitigar los impactos ambientales del sector y reducir la dependencia de materiales industriales costosos o importados, contribuyendo así a una construcción más resiliente y sostenible.

2.4.2 Aprovechamiento de residuos industriales

La generación de residuos industriales y de construcción representa uno de los principales desafíos ambientales asociados al crecimiento urbano y al desarrollo de infraestructuras civiles. Sin embargo, bajo el enfoque de la economía circular, estos residuos pueden convertirse en insumos valiosos para la formulación de materiales de construcción sostenibles, reduciendo así el impacto ambiental y los costos asociados a la disposición final (Rodrigues et al., 2019; Zhao et al., 2023).

Entre los residuos comúnmente reutilizados se encuentran: escorias siderúrgicas, cenizas volantes, residuos cerámicos, polvo de mármol, y residuos de

piedra volcánica como el basalto. Estos materiales poseen características químicas y físicas que les permiten actuar como agregados, microrellenos o incluso como componentes reactivos en sistemas cementantes. En particular, su incorporación puede modificar la porosidad, densidad, trabajabilidad y resistencia mecánica del concreto, dependiendo de su granulometría, contenido mineralógico y condiciones de activación (Heikal et al., 2021; Yu et al., 2020).

Estudios recientes han demostrado que el polvo de basalto —un subproducto de la trituración de roca volcánica— presenta un alto contenido de óxidos de silicio, aluminio y calcio, lo que le confiere potencial puzolánico cuando se utiliza finamente molido. Además, bajo condiciones activadas, puede liberar iones metálicos que aceleran la formación de geles hidratados como el C-S-H (Ghanem et al., 2024; Youness et al., 2024). Estas propiedades lo convierten en un candidato viable para ser utilizado no solo como microrelleno, sino también como componente funcional en aditivos acelerantes.

Adicionalmente, el aprovechamiento de estos residuos en vías rurales, pavimentos de bajo tránsito y elementos no estructurales ha sido objeto de evaluación en varios países como una estrategia para disminuir la presión sobre los recursos naturales. En particular, Rodrigues et al. (2019) reportaron el uso exitoso de residuos de construcción y demolición (RCD) para la rehabilitación de caminos rurales, evidenciando un desempeño aceptable cuando no se requiere una alta capacidad portante.

Asimismo, investigaciones desarrolladas por Wang et al. (2022) y Zhang et al. (2021) han demostrado que el uso de residuos industriales en concretos ecológicos no solo mejora ciertos parámetros técnicos como la durabilidad y resistencia química, sino que también permite una reducción considerable de la huella de carbono de la mezcla.

Por tanto, el aprovechamiento de residuos industriales como el polvo de basalto activado representa una estrategia técnica, económica y ambientalmente viable que puede contribuir a una transición hacia una construcción más sostenible, particularmente en regiones donde este tipo de residuos es abundante y de fácil acceso.

2.4.3 Efecto de los residuos minerales sobre la hidratación del cemento

La incorporación de residuos minerales de origen industrial o minero en mezclas de concreto ha cobrado relevancia como estrategia para mejorar las propiedades del cemento Portland y reducir la huella ambiental de su producción. Muchos de estos residuos poseen una alta actividad puzolánica o pueden actuar como nucleadores de productos hidratados, modificando favorablemente la cinética de hidratación y la microestructura del sistema cementante.

Diversos estudios han demostrado que la adición controlada de residuos minerales puede acelerar o estabilizar la hidratación, dependiendo de su composición química y grado de finura. Por ejemplo, el residuo de craqueo catalítico (FCC) y las cenizas volantes de combustión se han utilizado como adiciones minerales activas, generando un aumento en la formación de geles C-S-H y etringita, los cuales refuerzan la matriz del concreto. En el caso del FCC, su incorporación en proporciones entre el 10 % y 15 % del volumen total de la mezcla puede incrementar la resistencia mecánica entre un 10 % y 26 % en edades tempranas y medias de curado, debido a su alto contenido de sílice reactiva y estructura amorfa (Izquierdo et al., 2013).

En investigaciones recientes, materiales como el polvo de basalto, escoria de alto horno y residuos cerámicos han mostrado efectos similares. Liu et al. (2021) y Ghanem et al. (2024) reportaron que el polvo de basalto finamente molido, cuando se activa en medios ligeramente ácidos o en soluciones con pH controlado, puede liberar iones metálicos (Ca^{2+} , Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+}) que favorecen la nucleación temprana del gel C-S-H y, por lo tanto, aceleran la ganancia de resistencia del concreto en las primeras etapas de curado. Además, al actuar como microrelleno, este residuo reduce la porosidad capilar y mejora la compacidad de la pasta cementante, lo cual se traduce en una mayor durabilidad frente a agentes agresivos.

No obstante, el efecto positivo de estos residuos depende en gran medida de su proporción dentro de la mezcla. Dosis excesivas pueden inducir un exceso de finos, inhibir la hidratación por falta de espacio capilar o incluso actuar como inertes

diluyentes si su actividad puzolánica es baja. Por ello, es fundamental caracterizar adecuadamente cada tipo de residuo y determinar su proporción óptima mediante pruebas experimentales previas a su uso en obra.

En este sentido, el uso de residuos minerales como adiciones funcionales en concretos estructurales no solo aporta ventajas mecánicas y de durabilidad, sino que también contribuye a la sostenibilidad del sector al reducir el consumo de cemento Portland, cuya producción es intensiva en energía y emisiones de CO₂ (Kostrzewa-Demczuk et al., 2023; Youness et al., 2024).

2.5 Polvo de basalto como material alternativo

2.5.1 Origen y características del basalto

El basalto es una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre. Se trata de una roca ígnea de origen volcánico que se forma por la solidificación del magma en la superficie, un proceso que puede extenderse por días o incluso semanas. Durante este enfriamiento, los gases atrapados generan cavidades características en la matriz rocosa. Su color oscuro se debe a su alta concentración de hierro y magnesio, aunque puede adquirir tonalidades rojizas en zonas alteradas por oxidación (véase Figura 2.5.1).

Desde tiempos antiguos, el basalto ha sido utilizado como material de construcción por su alta resistencia a la fractura. Civilizaciones como los olmecas y los egipcios lo emplearon para elaborar herramientas y estructuras duraderas (Esguerra Serna et al., 2018; Lino Vidal et al., 2020). En la actualidad, sus propiedades mecánicas continúan siendo aprovechadas, particularmente en el refuerzo de concretos estructurales.



Figura 2.5.1. Piedra de basalto de color oscuro, con cavidades originadas por gases volcánicos. Fuente: Flickr, 2010.

2.5.2 Generación de polvo de basalto como residuo industrial

Durante la explotación de canteras de basalto para la producción de agregados pétreos, se genera un subproducto fino denominado polvo de roca basáltica o harina de roca. Este residuo, generalmente descartado o utilizado como fertilizante mineral, presenta un gran potencial para aplicaciones en la construcción (Barbaro et al., 2022). Su abundancia, bajo costo y contenido mineral lo hacen especialmente atractivo como aditivo en mezclas cementantes. En la Figura 2.5.2 se observa el aspecto típico del polvo de basalto resultante del procesamiento industrial.



Figura 2.5.2. Polvo de roca basáltica generado como subproducto industrial.

Fuente: MyShrooms, 2020.

No obstante, el residuo de basalto ha sido una opción atractiva para la creación de acelerantes, esto debido a su composición química, la cual promueve la hidratación del cemento, además de su bajo costo y su bajo impacto ambiental (Youness et al., 2024; Gupta & Kua, 2022).

2.5.3 Composición química del polvo de basalto

El basalto es una piedra con una extensa variedad de componentes químicos, su composición consiste principalmente en:

- ❖ Dióxido de Silicio (SiO_2): 42.60%
- ❖ Óxido de Aluminio (Al_2O_3): 14.18%
- ❖ Óxido de Calcio (CaO): 10.39%
- ❖ Óxido de Magnesio: 8.79%

-
- ❖ Hierro Ferroso (FeO): 6.40%
 - ❖ Peróxido de Sodio: 3.80%
 - ❖ Dióxido de Titanio: 2.80%
 - ❖ Óxido de Potasio: 0.96%
 - ❖ Óxido de Manganese: 0.19%
 - ❖ Pentóxido de Disfósforo: 0.19%

La gran cantidad de óxido de metálicos que posee, promueven la hidratación del cemento, actuando como un acelerante (Youness et al., 2024; Ghanem et al., 2024).

2.5.4 Propiedades reactivas del polvo de basalto

Además de sus efectos físicos como microrelleno, el polvo de basalto contiene minerales como olivino, piroxenos y feldespatos, los cuales reaccionan en medios acuosos con CO₂, promoviendo la formación de minerales secundarios como esmectita y laterita (Rasool et al., 2023). Esta capacidad de mineralización lo hace útil en estrategias de captura de carbono que pueden disminuir los efectos de carbonatación en los concretos.

En el concreto, su dosificación es crítica: mientras proporciones bajas mejoran la densidad y reducen la formación de microfisuras, proporciones excesivas pueden comprometer la resistencia mecánica y no mitigar eficazmente la carbonatación. Esto ha sido evidenciado en estudios donde se utilizaron indicadores como la fenolftaleína para evaluar la profundidad de carbonatación (véase Figura 2.5.3), mostrando una respuesta dependiente de la concentración del aditivo (Molares-Cervantes et al., 2024).



Figura 2.5.3. Ensayo de carbonatación en concreto utilizando fenolftaleína como indicador de pH. Fuente: Estudio de carbonatación en concreto elaborado con residuo minero, 2018.

2.5.5 Aplicaciones previas del polvo de basalto en concreto

Diversas investigaciones han explorado el uso del polvo de basalto como sustituto parcial del cemento. Morales-Cervantes et al. (2024) evaluaron proporciones del 5 %, 10 %, 15 % y 20 %, observando que en reemplazos superiores al 10 % la resistencia estructural disminuye significativamente. Sin embargo, en proporciones moderadas y especialmente cuando se emplea como aditivo acelerante, puede favorecer la cinética de fraguado y el desarrollo temprano de resistencia sin comprometer la durabilidad.

2.6 Contexto normativo

2.6.1 ASTM C403: Determinación del tiempo de fraguado

La norma ASTM C403/C403M-23 establece el procedimiento para determinar los tiempos de fraguado inicial y final del concreto y morteros hidráulicos mediante el ensayo de penetración con aguja. Este método es aplicable tanto en condiciones de laboratorio como en obra, permitiendo evaluar la evolución de la resistencia a

edades tempranas, aspecto fundamental en mezclas que incorporan aditivos como acelerantes de fraguado.

En el caso específico del concreto, la normativa indica que:

En condiciones de laboratorio, los especímenes deben mantenerse a una temperatura controlada entre 20 °C y 25 °C durante el periodo de fraguado.

En condiciones de campo, los especímenes no deben exponerse a la luz solar directa, para evitar interferencias térmicas que modifiquen la cinética de hidratación.

Para evitar pérdidas de humedad, se requiere cubrir los moldes con materiales como arpilleras húmedas o envolturas impermeables, asegurando un ambiente de curado constante.

Para el caso de morteros hidráulicos, la resistencia a la penetración se determina utilizando diferentes tipos de agujas calibradas, las cuales se aplican verticalmente sobre la superficie de la mezcla. Se deben obtener al menos diez lecturas válidas en distintas zonas del espécimen para asegurar la representatividad de los resultados.

Otros requisitos específicos del procedimiento incluyen:

El uso de moldes cilíndricos o rectangulares, fabricados en materiales rígidos, no absorbentes y libres de contaminantes como grasa o aceite.

La medición de la temperatura del mortero fresco se debe realizar con un termómetro de precisión, con rango operativo entre -20 °C y 50 °C, y exactitud mínima de ± 0.5 °C.

Este ensayo permite determinar de forma cuantitativa el inicio y final del fraguado, definidos como el momento en que el material alcanza una resistencia a la penetración de 3.5 MPa y 27.6 MPa, respectivamente, lo que resulta crítico en el diseño de mezclas aceleradas.

2.6.2 ASTM C39 y NMX-C-083: Ensayo de resistencia a compresión

El ensayo de compresión es una de las pruebas más representativas para evaluar el comportamiento mecánico del concreto endurecido, y está normado internacionalmente por ASTM C39/C39M-23 y, a nivel nacional en México, por la

NMX-C-083-ONNCCE-2014. Estas normas establecen los procedimientos estandarizados para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, bajo condiciones controladas de carga y preparación.

Condiciones de la máquina de ensayo (ASTM C39)

La máquina utilizada debe cumplir con los siguientes requisitos:

- ❖ Aplicar la carga axial de forma continua y sin impactos hasta el fallo del espécimen.
- ❖ El error en la lectura de carga no debe superar el $\pm 1.0\%$ del valor indicado.
- ❖ La superficie de apoyo debe exceder por lo menos en un 3% el diámetro nominal del espécimen, garantizando una transferencia de carga uniforme.
- ❖ Debe estar calibrada periódicamente conforme a las recomendaciones de la norma ASTM E4.

Requisitos de los especímenes

Los cilindros de concreto deben cumplir con las siguientes características:

- ❖ Tener dimensiones uniformes, generalmente de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura.
- ❖ Los extremos deben ser planos y perpendiculares al eje longitudinal, con una tolerancia de planitud menor a 0.05 mm, pudiendo rectificarse mediante pulido o uso de adhesivos de azufre según la norma.
- ❖ Antes del ensayo, se debe secar el espécimen superficialmente y registrar su masa.
- ❖ El ensayo se ejecuta hasta que la aguja del manómetro indique el valor máximo de carga, seguido por una disminución que señala el colapso del material.

Norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2014

Complementariamente, la norma mexicana establece aspectos adicionales para asegurar la confiabilidad del ensayo:

- ❖ El concreto debe ser curado adecuadamente a las edades establecidas (3, 7 y 28 días, entre otras).

-
- ❖ Se debe registrar el tipo de curado, condiciones ambientales y edad exacta del espécimen.
 - ❖ Se recomienda ensayar al menos tres cilindros por edad y dosificación, para obtener un valor representativo del promedio y su dispersión.
 - ❖ El resultado se expresa en megapascuales (MPa), dividiendo la carga máxima aplicada por el área transversal del espécimen.

Estas normas aseguran que los resultados obtenidos sean comparables, reproducibles y técnicamente válidos, especialmente en investigaciones experimentales con nuevas formulaciones de concreto como las que incorporan aditivos no convencionales, tal es el caso del acelerante a base de polvo de basalto evaluado en esta investigación.

2.6.3 ACI 211.1: Diseño de mezclas de concreto

La norma ACI 211.1-91 —revisada en versiones posteriores como ACI 211.1R-91— constituye el método estándar para el diseño de mezclas de concreto normal, y ha sido ampliamente adoptada tanto en obra como en investigaciones académicas por su enfoque sistemático y adaptabilidad. Esta guía permite seleccionar las proporciones óptimas de materiales que aseguren una mezcla con la resistencia, trabajabilidad, durabilidad y economía deseadas.

Tipos de aplicaciones contempladas

El ACI 211.1 establece que el diseño de mezcla debe adecuarse al tipo de elemento estructural, clasificando su aplicación en:

- ❖ Cimentaciones: zapatas aisladas, zapatas corridas, dados de cimentación y muros de contención.
- ❖ Elementos estructurales principales: columnas, trabes, losas y vigas.
- ❖ Pavimentos y banquetas de concreto hidráulico.
- ❖ Concretos en masa: presas, muros de gravedad, estructuras sin refuerzo principal.

Etapas del procedimiento de diseño

El proceso propuesto por la norma sigue una serie de pasos secuenciales que permiten ajustar la mezcla para cumplir con las condiciones específicas de obra y las propiedades deseadas:

1. Definición del tipo de construcción y exposición ambiental esperada.
2. Selección del tamaño máximo del agregado grueso, el cual depende de las dimensiones mínimas de los elementos y el espaciamiento del acero de refuerzo. Este puede variar entre 9.5 mm (3/8") y 75 mm (3"), según el caso.
3. Estimación del contenido de agua y porcentaje de aire atrapado o incorporado, en función del tamaño máximo del agregado y el tipo de revenimiento requerido (slump).
4. Determinación de la relación agua/cemento (a/c) con base en la resistencia mecánica requerida y la durabilidad —especialmente importante en concretos con aditivos—.
5. Cálculo del contenido de cemento, dividiendo el contenido de agua entre la relación a/c.
6. Estimación del contenido de agregado grueso, utilizando factores volumétricos recomendados por el ACI, que dependen del tamaño máximo del agregado y la gravedad específica del material.
7. Determinación del contenido de agregado fino, como diferencia entre el volumen total y la suma del volumen de agua, cemento y agregado grueso.
8. Corrección por humedad superficial y absorción de agregados, aplicando ajustes conforme a lo establecido en la norma ASTM C127 para agregados gruesos y ASTM C128 para agregados finos.
9. Lote de prueba en laboratorio, en el cual se verifica la trabajabilidad, resistencia, asentamiento, contenido de aire y durabilidad, realizando ajustes necesarios antes de su aplicación en obra.

Aplicación del método en investigaciones con aditivos no convencionales

En investigaciones experimentales como la presente, donde se formula un acelerante líquido a base de polvo de basalto, este método sirve como base confiable para evaluar los efectos del aditivo bajo condiciones normalizadas. Es

importante destacar que cualquier aditivo adicional debe ser considerado en los cálculos de volumen y peso, y su compatibilidad evaluada en pruebas previas (premezclas), tal como recomiendan los lineamientos del ACI y ASTM.

La flexibilidad del método ACI 211.1 permite realizar ajustes iterativos conforme se identifiquen cambios en las propiedades reológicas o mecánicas del concreto, lo cual es fundamental al introducir materiales con reactividad química, como minerales volcánicos o subproductos industriales.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Caracterización del basalto para uso en acelerante líquido de fraguado

La caracterización del polvo de basalto constituye una etapa fundamental para validar su idoneidad como componente activo en la formulación de un acelerante líquido de fraguado para concreto estructural. Dado que este material tiene un origen ígneo y se presenta como residuo de procesos extractivos, fue necesario evaluar sus propiedades físico-químicas, mineralógicas y morfológicas con el fin de comprender su potencial reactivo en medios acuosos y su influencia sobre las reacciones de hidratación del cemento.

El proceso de caracterización incluyó: muestreo representativo en sitio, preparación y pulverización del material, análisis químico elemental mediante SEM-EDS, y verificación de la granulometría adecuada para asegurar la reactividad del material en suspensión líquida. La caracterización se enfocó en identificar la presencia de óxidos metálicos como silicio, aluminio, calcio, hierro y magnesio, los cuales pueden intervenir en la formación de productos hidratados durante las etapas tempranas del fraguado del concreto (Youness et al., 2024; Ghanem et al., 2024).

3.1.1 Muestreo de residuos de basalto

El muestreo de los residuos de basalto se llevó a cabo directamente en un banco de material pétreo ubicado en el municipio de Zempoala, Hidalgo, México. Para garantizar la representatividad de las muestras, se siguió la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006, que establece los lineamientos para el muestreo de suelos y materiales naturales.

Procedimiento de muestreo:

1. Se identificaron áreas de acumulación de polvo de basalto en zonas de trituración primaria y secundaria dentro de la mina.
2. Se delimitaron parcelas de 1 m² en 25 puntos distribuidos uniformemente en el banco.

-
3. Se extrajeron muestras con espesor de 15 cm de cada parcela mediante herramientas manuales.
 4. Las muestras se almacenaron en bolsas de polietileno, etiquetadas y transportadas al laboratorio para su análisis.

3.1.2 Procedimiento de pulverización del basalto

Para su uso en formulaciones líquidas, el basalto debe presentar una granulometría inferior a 75 μm . Por ello, las muestras brutas fueron secadas a 105 °C durante 24 horas y posteriormente sometidas a un proceso de trituración y molienda controlada.

Pasos del procedimiento:

1. Se pesaron 5 kg de basalto seco y limpio.
2. El material fue introducido en la máquina de abrasión de Los Ángeles, junto con 12 esferas de acero como agentes de impacto.
3. La máquina se configuró para 2500 ciclos por hora, lo que generó una reducción progresiva del tamaño de partícula (Figura 3.1.a).
4. El material resultante fue tamizado mediante una malla No. 200 (75 μm) usando una tamizadora mecánica (Figura 3.1.b).
5. Se recolectó el material que pasó a través de la malla, el cual se etiquetó como polvo de basalto fino, destinado a su uso en el acelerante.



Figura 3.1.2 a) Máquina de abrasión de Los Ángeles b) Tamiz No. 200

Este proceso permitió obtener un polvo altamente fino con gran superficie específica, condición esencial para maximizar la interacción en la fase líquida del acelerante (Moawad et al., 2023).

3.1.3 Análisis químico y morfológico del polvo de basalto

La caracterización elemental del polvo fino de basalto se realizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) acoplada a un sistema de Espectroscopía por Dispersión de Energía de Rayos X (EDS), con el objetivo de determinar su morfología superficial y su composición química mayoritaria. El equipo utilizado fue un SEM Oxford Instruments modelo AZtecLite, operado a 15 kV.

Resultados del análisis SEM-EDS:

En la micrografía general (Figura 3.1b) se observó una distribución heterogénea de partículas angulares y rugosas, propias de un material de origen volcánico sometido a procesos de trituración mecánica.

El microanálisis elemental (Figura 3.1a y Tabla 3.1) mostró una composición característica de basaltos andesíticos, con una alta proporción de óxidos de silicio (29.70 %), aluminio (9.25 %), calcio (4.00 %), hierro (3.40 %) y sodio (3.95 %), así como la presencia de elementos en menor proporción como potasio (1.50 %) y magnesio (1.00 %). Esta composición respalda el potencial del basalto como fuente activa en medios ligeramente ácidos para la formulación de un acelerante líquido de fraguado.

Tabla 3.1.3 Composición química ajustada del polvo de basalto

Elemento	Wt%
O	47.20
Na	3.95
Mg	1.00
Al	9.25
Si	29.70
K	1.50
Ca	4.00
Fe	3.40
Total	100

Estos resultados indican que el polvo de basalto posee una composición favorable para actuar como material activo en medios ligeramente ácidos o alcalinos, ya que puede liberar iones metálicos que aceleran la nucleación de productos hidratados del cemento, tales como el C-S-H y la etringita (Youness et al., 2024).

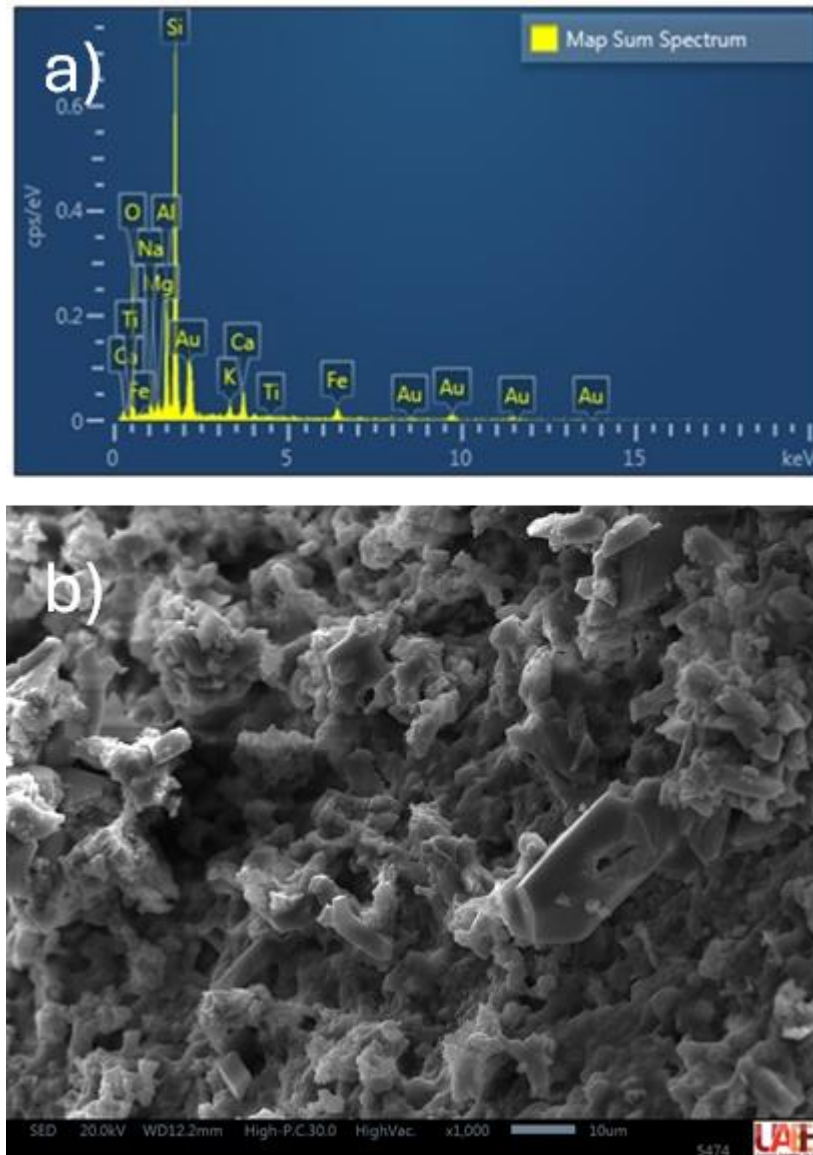


Figura 3.1.3: Microfotografía del basalto: a) resultado del microanálisis general SEM-EDS), b) Imagen general SEM.

3.1.4 Consideraciones para su aplicación como acelerante

Con base en la caracterización realizada, se concluye que el polvo de basalto obtenido posee características fisicoquímicas adecuadas para su uso como base de un acelerante líquido. Su alto contenido de óxidos metálicos, su granulometría fina y su morfología irregular permiten su activación química en solución acuosa ligeramente modificada —ácida o alcalina—, generando un sistema capaz de acelerar las reacciones iniciales de hidratación del cemento.

En el siguiente apartado se describe el procedimiento de formulación del acelerante líquido, en el cual se incorporará el polvo de basalto activado en medio acuoso para evaluar su efecto sobre los tiempos de fraguado y el desarrollo de resistencia temprana del concreto estructural.

3.2 Formulación del acelerante líquido de fraguado a base de polvo de basalto activado

La formulación del acelerante líquido de fraguado se llevó a cabo a partir de polvo de basalto previamente caracterizado, con base en su composición rica en óxidos metálicos (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO y Fe_2O_3), los cuales pueden liberar iones en solución y participar activamente en la nucleación de productos hidratados durante la hidratación del cemento. El proceso de formulación se diseñó con el objetivo de obtener una solución estable, de bajo costo y adecuada para sustituir parcialmente el agua de mezclado en concretos estructurales de fraguado rápido.

Este procedimiento consistió en cuatro etapas fundamentales: (1) preparación del medio activador, (2) dispersión controlada del polvo de basalto, (3) agitación y reacción, y (4) estabilización y almacenamiento.

3.2.1 Preparación del medio activador

Se preparó una solución acuosa ligeramente acidificada para favorecer la solubilización de cationes metálicos presentes en el polvo de basalto. Para ello, se utilizó ácido cítrico monohidratado ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) por su carácter orgánico, no corrosivo, y ambientalmente seguro. Se elaboraron soluciones al 2 % en masa, disolviendo 20 g de ácido cítrico por cada litro de agua destilada.

Este medio permitió reducir el pH de la solución a un valor aproximado de 4.5, condición óptima para estimular la liberación de iones Ca^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+} sin comprometer la estabilidad de la mezcla.

3.2.2 Dispersión del polvo de basalto

Se pesaron cantidades controladas de polvo de basalto fino ($<75\ \mu\text{m}$) previamente secado, correspondientes a 5 %, 7.5 % y 10 % en masa respecto al peso del agua de la solución. Cada cantidad se dispersó lentamente en el medio ácido bajo agitación constante, con el objetivo de evitar la formación de grumos y asegurar una distribución homogénea del material.

La dispersión se realizó en un recipiente de vidrio borosilicatado con capacidad de 1 litro, utilizando un agitador magnético con control de velocidad. El proceso de incorporación del polvo se llevó a cabo en un lapso de 10 minutos.

3.2.3 Agitación y activación

La mezcla fue agitada durante 60 minutos a 200 revoluciones por minuto (rpm) a temperatura ambiente ($\sim 25\ ^\circ\text{C}$), permitiendo la interacción entre el polvo de basalto y el medio activador. Durante este tiempo, se facilitó la disolución parcial de los compuestos presentes en el basalto y la formación de especies iónicas potencialmente reactivas, tales como silicatos, aluminatos y carbonatos metálicos.

La solución adquirió una coloración marrón claro con ligera turbidez, indicando una suspensión activa adecuada para ser utilizada como aditivo líquido en mezclas cementantes. La liberación de iones fue confirmada posteriormente mediante análisis de pH y conductividad eléctrica.

3.2.4 Estabilización y almacenamiento

Para mejorar la estabilidad del sistema y evitar la sedimentación rápida de partículas no solubles, se añadió un agente dispersante: poliacrilato de sodio al 0.1 % en volumen. Este aditivo permitió mantener las partículas en suspensión durante periodos prolongados y garantizar la homogeneidad del acelerante antes de su aplicación.

Una vez estabilizada, la solución fue almacenada en botellas plásticas de polietileno de alta densidad (HDPE), herméticamente cerradas y etiquetadas según su concentración de basalto (5 %, 7.5 %, 10 %). Las botellas se conservaron a

temperatura ambiente, protegidas de la luz directa y con agitación manual previa a cada uso.

3.3 Ensayo de resistencia a la compresión del concreto estructural modificado con acelerante líquido a base de basalto

La resistencia a la compresión es una de las propiedades mecánicas más importantes del concreto y constituye el principal criterio de aceptación para su uso estructural. Representa la capacidad del material para resistir esfuerzos de carga axial sin fallar y está directamente influenciada por factores como la relación agua/cemento, el tipo de cemento, el curado, los agregados y la incorporación de aditivos o materiales cementantes suplementarios (Neville, 2012; Mehta & Monteiro, 2014).

En esta investigación, el ensayo de resistencia a la compresión fue utilizado para evaluar el desempeño mecánico de concretos elaborados con y sin un acelerante líquido de fraguado formulado a partir de polvo de basalto activado. Este aditivo, obtenido a partir de residuos volcánicos finamente pulverizados y dispersados en un medio ligeramente ácido, fue incorporado como parte del agua de mezclado. Su efecto se evaluó en función del desarrollo de resistencia a distintas edades de curado, con el fin de determinar su impacto sobre el comportamiento del concreto en estado endurecido.

3.3.1 Diseño de mezclas y condiciones experimentales

El diseño de la mezcla de concreto se realizó con el objetivo de alcanzar una resistencia a la compresión promedio de 250 kg/cm², utilizando como base la metodología de la norma ACI 211.1-91, adaptada a las condiciones ambientales locales y a la disponibilidad de materiales en el laboratorio. Para facilitar la obtención de proporciones óptimas, se utilizó el software libre Concrete Mix Design (2024), el cual permitió establecer los parámetros de mezcla mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros de diseño de mezcla de concreto

Parámetro	
Revenimiento (mm)	75 máximo
	25 mínimo
Tamaño máximo agregado (mm)	12.5
Cantidad de agua de mezcla (kg/m ³) de acuerdo con el tamaño máximo de agregado	216
Porcentaje de aire en mezcla sin entrada de aire	2.5
Relación agua cemento de acuerdo con la resistencia a la compresión	0.61
Módulo de finura agregado fino	2.8
Porcentaje de absorción de agregado grueso	1.5
Porcentaje de absorción de agregado fino	5

Con base en este diseño, se elaboraron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura para los ensayos de compresión. Se establecieron dos sistemas experimentales, uno como control y otro con adición del acelerante líquido formulado a partir de polvo de basalto:

- ❖ Sistema A (Referencia): Concreto sin adición de acelerante.
- ❖ Sistema B (Modificado): Concreto con incorporación de 1 litro de acelerante líquido por cada 50 kg de cemento, el cual fue preparado con polvo de basalto activado en solución ligeramente ácida. Este volumen fue sustraído proporcionalmente del total de agua de la mezcla, manteniendo constante la relación agua/cemento.

Esta proporción del acelerante se definió tomando como base estudios recientes donde se emplearon materiales minerales finamente molidos como

metacaolín, sílice o polvo de basalto en proporciones similares, reportando mejoras significativas en el desarrollo de resistencia temprana sin comprometer la trabajabilidad ni la durabilidad del concreto (Ghanem et al., 2024; Youness et al., 2024).

Tabla 3.3. Dosificación de concreto con y sin acelerante líquido de polvo de basalto

Sistema	Agua Kg/m ³	Cemento Kg/m ³	Agregado grueso Kg/m ³	Agregado fino Kg/m ³	Acelerante liquido L	Relación A/C
0% Acelerante	225.45	354.1	920.3	889.2	0	0.61
Con acelerante	225.45*	354.1	920.3	889.2	7.082**	0.61

* El volumen de agua se ajustó restando el volumen del acelerante (1 L por cada 50 kg de cemento).

**Dado que se emplearon 354.1 kg de cemento, el volumen equivalente de acelerante líquido es 7.082 L.

Este diseño permitió mantener constantes las variables de mezcla, modificando únicamente la incorporación del aditivo líquido, lo cual facilitó la comparación directa de los efectos del acelerante sobre las propiedades del concreto. En los apartados siguientes se detallan los procedimientos de fabricación, curado y ensayo de los especímenes.

3.3.2 Elaboración de especímenes

Para cada sistema y edad de curado, se elaboraron tres especímenes cilíndricos de concreto, lo que dio lugar a un total de 24 cilindros (2 sistemas × 4 edades × 3 repeticiones). Los especímenes fueron moldeados en cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, de acuerdo con la especificación de la norma ASTM C39/C39M-16b.

La preparación de los especímenes se realizó conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM C192/C192M-19, la cual especifica los procedimientos adecuados para la elaboración, colocación y compactación del concreto en condiciones de laboratorio. La mezcla fue elaborada manualmente en el laboratorio, utilizando herramientas limpias y recipientes adecuados para asegurar la homogeneidad de los materiales.

Cada cilindro fue rotulado e identificado con el sistema correspondiente, la edad de curado y el número de repetición.

3.3.3 Curado de especímenes

Después del colado, los cilindros permanecieron en sus moldes por un periodo de 24 horas en ambiente controlado ($23 \pm 2^\circ\text{C}$, HR > 95 %). Posteriormente, fueron desmoldados y sumergidos en tanques de curado con agua potable a temperatura constante ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) hasta alcanzar la edad correspondiente de ensayo. Este procedimiento siguió los lineamientos de la norma ASTM C31/C31M-19, asegurando una hidratación continua del cemento y condiciones representativas del curado húmedo estándar.

Las edades seleccionadas para el ensayo fueron: 7, 14, 21 y 28 días, con el objetivo de observar tanto el comportamiento temprano del concreto (influenciado por la acción del acelerante) como su evolución hacia edades convencionales de diseño estructural.

3.3.4 Procedimiento del ensayo de compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se llevó a cabo conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM C39/C39M-16b, complementada con los criterios de la NMX-C-083-ONNCCE-2003, que establece los procedimientos para la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Las pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), utilizando una prensa hidráulica de alta precisión marca Controls, modelo 50-C43C04, con una capacidad

mínima de 1000 kN, calibrada y certificada para garantizar la fiabilidad de los resultados.

Antes del ensayo, se verificó el área transversal de carga y se realizó la alineación cuidadosa de los especímenes, asegurando un contacto uniforme entre las superficies de carga para evitar concentraciones de esfuerzo. Cada cilindro fue sometido a carga axial creciente hasta su falla, aplicando una velocidad de carga controlada de 0.25 MPa/s (aproximadamente 2.5 kg/cm²/s), conforme a la normativa internacional.

Para los cilindros de 10 cm de diámetro, el área de carga corresponde a 78.54 cm². Los resultados de resistencia obtenidos para cada espécimen fueron promediados por sistema y edad de curado, con el objetivo de realizar comparaciones estadísticas entre los concretos con y sin acelerante de fraguado a base de polvo de basalto.

3.3.5 Ensayo de fraguado inicial y final del concreto con acelerante líquido de basalto

El tiempo de fraguado del concreto es un parámetro fundamental para evaluar el efecto de aditivos acelerantes, especialmente en aplicaciones que requieren una rápida puesta en servicio, como elementos prefabricados, obras en climas fríos o vaciados acelerados. En esta investigación, se evaluaron los tiempos de fraguado inicial y final en mezclas de concreto elaboradas con y sin el uso del acelerante líquido formulado a partir de polvo de basalto activado en medio ácido.

El procedimiento experimental siguió los lineamientos establecidos por la norma ASTM C403/C403M-16, “Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance”, y fue complementado con observaciones visuales y de consistencia para reforzar los criterios de identificación del fraguado.

3.3.5.1 Preparación de especímenes

Para este ensayo, se elaboraron moldes cilíndricos de concreto con dimensiones de 15 cm de diámetro y 15 cm de altura, uno para cada sistema en estudio:

- ❖ Sistema A (Referencia): sin acelerante.
- ❖ Sistema B (Modificado): con acelerante líquido (1 L por cada 50 kg de cemento).

El concreto fue preparado siguiendo el mismo diseño de mezcla, y se vertió en moldes metálicos previamente lubricados. La mezcla fue colocada sin vibración, compactada con varilla metálica en dos capas, y protegida de la evaporación con cubierta plástica.

3.3.5.2 Procedimiento de ensayo

A intervalos regulares (cada 15 a 30 minutos), se realizaron mediciones de resistencia a la penetración utilizando una aguja de tipo Vicat modificada con base plana circular de 16 mm², conforme a la norma ASTM C403. Las mediciones se registraron hasta alcanzar una resistencia de:

- A. 3.5 MPa para determinar el fraguado inicial.
- B. 27.6 MPa para determinar el fraguado final.

Cada valor fue registrado con su correspondiente hora y temperatura ambiente de ensayo (24 ± 2 °C). Se compararon ambos sistemas con el fin de cuantificar la reducción del tiempo de fraguado inducido por el acelerante líquido.

3.3.6 Justificación del enfoque metodológico

El enfoque adoptado para la evaluación de la resistencia a la compresión en este estudio responde a la necesidad de validar el efecto de un acelerante mineral ecológico en el desempeño mecánico del concreto. A diferencia de los acelerantes químicos convencionales, el polvo de basalto activado en solución líquida no introduce cloruros ni compuestos orgánicos volátiles, lo que lo convierte en una

opción viable para aplicaciones estructurales donde se requiere reducción en los tiempos de fraguado y desarrollo temprano de resistencia (Moawad et al., 2023; Istuque et al., 2023).

La comparación entre los especímenes de referencia y aquellos modificados con el acelerante permitirá determinar la efectividad del sistema desarrollado en condiciones controladas de laboratorio, sirviendo como base para su eventual aplicación en condiciones reales de obra.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Resultados del ensayo de fraguado

Los resultados obtenidos mostraron una reducción significativa en los tiempos de fraguado para el sistema con acelerante líquido de basalto, en comparación con la mezcla de referencia sin aditivos. En la Tabla 4.1 se presentan los tiempos registrados para cada sistema:

Tabla 4.1. Tiempos de fraguado inicial y final del concreto

Sistema	Fraguado inicial (min)	Fraguado final (min)
Sin acelerante	280	480
Con acelerante	160	330

Como se observa, el uso del acelerante redujo el tiempo de fraguado inicial en aproximadamente 43 %, y el fraguado final en un 31 %, lo cual indica un comportamiento favorable en términos de aceleración de las reacciones iniciales de hidratación del cemento. Este efecto es consistente con estudios previos en los que se ha reportado que aditivos minerales ricos en óxidos metálicos (como el polvo de basalto) promueven la formación temprana de productos como el C-S-H y la etringita al liberar iones reactivos en solución (Youness et al., 2024; Moawad et al., 2023).

Adicionalmente, no se observaron efectos negativos en términos de pérdida de trabajabilidad durante el mezclado ni de fisuración temprana, lo que sugiere que la formulación del acelerante fue adecuada para su integración en mezclas estructurales convencionales.

4.2 Resistencia a la compresión

La evaluación de la resistencia a la compresión permitió analizar el efecto del acelerante líquido formulado a partir de polvo de basalto activado sobre el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto estructural. Los ensayos se realizaron con tres especímenes por cada sistema (con y sin acelerante) y para cada edad de curado (7, 14, 21 y 28 días). Los valores promedios obtenidos se presentan en la Figura 4.2, donde se observa la evolución comparativa de la resistencia a la compresión a lo largo del tiempo.

Para una visión detallada de los resultados individuales por espécimen y el cálculo de los promedios correspondientes, se remite a la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Resultados de resistencia a la compresión (tres especímenes por sistema) del concreto con y sin acelerante líquido de basalto a diferentes edades de curado.

Edad (días)	Sistema	Especimen	Resistencia (kg/cm ²)
7	Sin acelerante	S1	171.34
7	Con acelerante	S1	170.07
7	Sin acelerante	S2	171.65
7	Con acelerante	S2	197.93
7	Sin acelerante	S3	194.41
7	Con acelerante	S3	194.41
14	Sin acelerante	S1	202.98
14	Con acelerante	S1	201.35
14	Sin acelerante	S2	198.88
14	Con acelerante	S2	221.28
14	Sin acelerante	S3	219.26
14	Con acelerante	S3	219.26
21	Sin acelerante	S1	225.95
21	Con acelerante	S1	221.64
21	Sin acelerante	S2	222.02
21	Con acelerante	S2	233.64
21	Sin acelerante	S3	232.73
21	Con acelerante	S3	235.39
28	Sin acelerante	S1	237.83
28	Con acelerante	S1	236.83
28	Sin acelerante	S2	242.58

28	Con acelerante	S2	247.89
28	Sin acelerante	S3	248.48
28	Con acelerante	S3	245.49

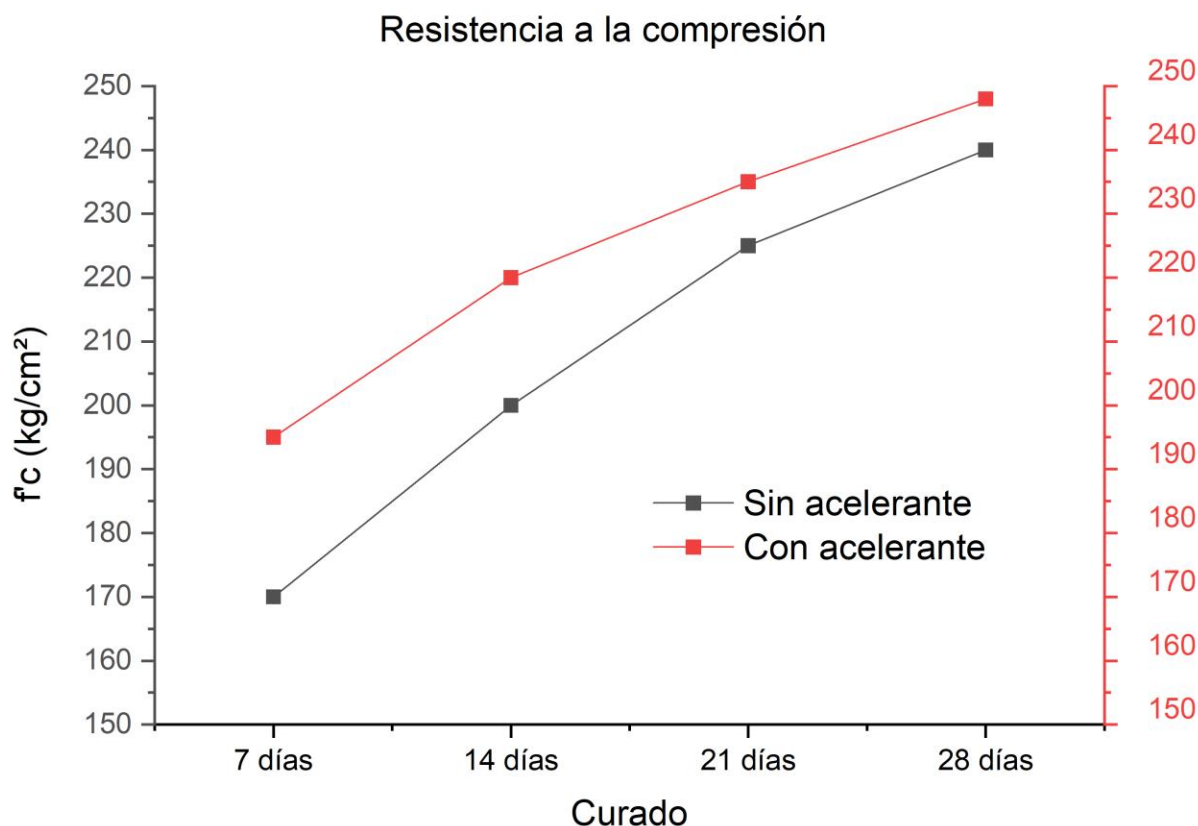


Figura 4.2. Evolución de la resistencia a la compresión del concreto con y sin acelerante líquido de basalto a diferentes edades de curado (7, 14, 21 y 28 días). Los valores corresponden al promedio de tres ensayos por cada sistema y edad de curado.

4.2.1 Desempeño del sistema sin acelerante

El concreto de referencia, es decir, el sistema elaborado sin la incorporación del acelerante líquido de basalto mostró un desarrollo progresivo de resistencia conforme

avanzó el tiempo de curado. Los resultados presentados corresponden al promedio de tres ensayos por cada edad de curado, conforme a los procedimientos experimentales establecidos. Los valores obtenidos fueron los siguientes:

- ❖ 170.2 kg/cm² a los 7 días,
- ❖ 199.9 kg/cm² a los 14 días,
- ❖ 224.9 kg/cm² a los 21 días,
- ❖ 240.3 kg/cm² a los 28 días.

Estos resultados están dentro del rango esperado para un concreto con resistencia objetivo de 250 kg/cm², y reflejan un comportamiento típico de hidratación gradual del cemento Portland.

4.2.2 Desempeño del sistema con acelerante de basalto

El sistema modificado con el acelerante líquido formulado a partir de polvo de basalto activado mostró una mejora significativa en las edades tempranas de curado, respecto al sistema de referencia. Los valores de resistencia a la compresión corresponden igualmente al promedio de tres ensayos por edad y se detallan a continuación:

- ❖ 195.0 kg/cm² a los 7 días (≈ 14.6 % más que la referencia),
- ❖ 219.9 kg/cm² a los 14 días (≈ 10.0 % más),
- ❖ 234.9 kg/cm² a los 21 días (≈ 4.5 % más),
- ❖ 248.0 kg/cm² a los 28 días (≈ 3.2 % más).

Este desempeño indica que el acelerante logró estimular las reacciones de hidratación en las primeras etapas, lo que permitió una ganancia acelerada de resistencia sin comprometer el desarrollo final del concreto. La diferencia fue más pronunciada durante las dos primeras semanas, periodo crítico para la manipulación y descimbrado de elementos estructurales.

Este comportamiento coincide con lo reportado por Ghanem et al. (2024) y Youness et al. (2024), quienes observaron que la presencia de óxidos de silicio, calcio y hierro en medios activados favorece la nucleación temprana del gel C-S-H y la formación de productos hidratados. Estos resultados respaldan el potencial del acelerante líquido de basalto como una alternativa sostenible y eficiente frente a aditivos químicos

convencionales, especialmente en aplicaciones donde se requieren resistencias tempranas elevadas, como en prefabricados y concretos con curado acelerado.

CONCLUSIONES

El polvo de basalto residual, producto de procesos industriales de trituración de roca, demostró propiedades físicas y químicas adecuadas para su uso como materia prima en la formulación de un acelerante líquido de fraguado. Su composición, rica en óxidos metálicos como SiO_2 , Al_2O_3 y CaO , favorece las reacciones de hidratación del cemento, contribuyendo a la aceleración del fraguado sin introducir componentes agresivos como los cloruros.

El acelerante líquido a base de polvo de basalto activado en medio acuoso mostró un impacto positivo en la resistencia a compresión del concreto estructural, particularmente a edades tempranas (7 y 14 días). En comparación con la mezcla de control, se registraron incrementos en la resistencia de hasta un 12%, lo cual confirma el potencial del aditivo para aplicaciones donde se requiera rapidez en la ejecución sin comprometer el desempeño mecánico.

A diferencia de algunos acelerantes convencionales que generan efectos corrosivos en el refuerzo de acero, la formulación propuesta no presentó indicios de efectos adversos inmediatos, por lo que se considera más segura para sistemas estructurales. Además, los resultados experimentales revelan que a los 28 días la resistencia final no se vio comprometida, lo que valida su estabilidad a largo plazo.

Esta investigación demuestra una alternativa viable para valorizar un residuo industrial subutilizado, contribuyendo así a los principios de la economía circular en la industria de la construcción. El uso de polvo de basalto como aditivo sustentable representa una solución técnica y ambiental para reducir impactos negativos asociados al uso de aditivos químicos convencionales.

RECOMENDACIONES

- ❖ Es recomendable explorar distintas relaciones polvo de basalto-agua, así como otros métodos de activación física o química (por ejemplo, mediante adición de álcalis suaves o agitación térmica controlada), con el fin de optimizar la eficiencia del acelerante y minimizar su consumo.
- ❖ Para garantizar su viabilidad como aditivo estructural, se sugiere realizar estudios a largo plazo que incluyan pruebas de durabilidad frente a ciclos de humedad-sequedad, ataque por sulfatos, penetración de cloruros, carbonatación acelerada y retracción por secado.
- ❖ Se recomienda realizar ensayos electroquímicos (potenciales de media celda, resistencia de polarización, impedancia electroquímica) para confirmar la compatibilidad del acelerante con elementos de concreto armado, dado que una de las limitantes de los acelerantes convencionales es la corrosión del acero.

BIBLIOGRAFÍA

American Concrete Institute. (1991). ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. ACI.

ArchDaily. (2013). Ejemplo del concreto romano utilizado en el Coliseo Romano [Fotografía]. ArchDaily. <https://www.archdaily.mx>

ASTM International. (2015). ASTM C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International.

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

ASTM International. (2023). ASTM C403/C403M-23: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. ASTM International.

ASTM International. (2024). ASTM C494/C494M-24: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM International.

Barbaro, L., Ferreira, C., & Ascheri, D. P. R. (2022). Basalt rock powder as a natural fertilizer and soil amendment: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102928. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102928>

Chen, S., Lu, W., Olofsson, T., Dehghanimohammadabadi, M., Emborg, M., Nilimaa, J., Wang, Y., & Feng, K. (2020). Concrete construction: How to explore environmental and economic sustainability in cold climates. *Sustainability*, 12(9), 3809. <https://doi.org/10.3390/su12093809>

Dobiszewska, M., & Beycioğlu, A. (2020). Basalt rock powder in cementitious materials: A systematic review. *Resources*, 9(6), 86. <https://doi.org/10.3390/resources9060086>

Esguerra Serna, M. J., Bonilla Agudelo, R. G., & González Forero, P. A. (2018). Materiales de construcción: propiedades, selección y aplicación (2.^a ed.). Universidad Nacional de Colombia.

Estudio de carbonatación en concreto elaborado con residuo minero. (2018). Detección de la carbonatación en el concreto usando la fenolftaleína como indicador de pH [Gráfico]. <https://www.abc.gob.mx/concretocarbonatado>

Flickr. (2010). Piedra de basalto [Fotografía]. Flickr. <https://www.flickr.com/photos/ejemplo>

Galistar. (2019). Ejemplo de la aplicación del concreto ligero [Fotografía]. Galistar. <https://www.galistar.mx/imagen-concreto-ligero>

Ghanem, H., Mosleh, M., & Sabry, Y. (2024). Sustainable cementitious materials incorporating basalt powder: Influence on hydration kinetics and mechanical properties. *Materials*, 17(3), 1342. <https://doi.org/10.3390/ma17031342>

Ghanem, H., Zaki, M. A., & Zaki, A. M. (2024). Potential of volcanic rocks as sustainable supplementary cementitious materials: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 410, 133939. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133939>

Gupta, M., & Kua, H. W. (2022). Evaluating performance of basalt-based geopolymers in ambient curing conditions. *Journal of Cleaner Production*, 346, 131112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131112>

Istuque, D. B., Bueno, R. R., de Souza, R. A., & Toledo Filho, R. D. (2023). Sustainable binders: Influence of industrial waste and pozzolans on concrete performance. *Materials*, 16(5), 1760. <https://doi.org/10.3390/ma16051760>

Izquierdo, M., Querol, X., Davidovits, J., Antenucci, D., Nugteren, H., Fernández-Pereira, C., & Luna, Y. (2013). Mineralogical and chemical characteristics of FCC catalyst residue: Implications for its potential re-use. *Fuel*, 109, 817–825. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.009>

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (1992). *Design and Control of Concrete Mixtures* (14th ed.). Portland Cement Association.

Li, F., Lv, T., & Wei, S. (2023). Performance, mechanical properties and durability of a new type of UHPC—Basalt fiber reinforced reactive powder concrete: A review. *Polymers*, 15(14), 3129. <https://doi.org/10.3390/polym15143129>

López, L. R., Jiménez Delgado, M., & García Navarro, J. (2020). Economía circular en la construcción: Revisión sistemática de estrategias de diseño para el aprovechamiento de residuos. *Informes de la Construcción*, 72(559), e343. <https://doi.org/10.3989/ic.70406>

Masseck, T. (2018). Circular construction strategies for the built environment. In *Proceedings of the SBE19 Graz Conference*. <https://doi.org/10.3217/978-3-85125-622-0>

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

Moawad, M., El-Dieb, A., & Reda, M. (2023). Evaluation of non-chloride set accelerators in cementitious systems under cold weather conditions. *Materials*, 16(12), 4176. <https://doi.org/10.3390/ma16124176>

Molares-Cervantes, M., Sánchez, A., & Gutiérrez, J. (2024). Basalt powder as a supplementary cementitious material: Influence on carbonation resistance and microstructure of concrete. *Construction and Building Materials*, 418, 131985. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.131985>

MyShrooms. (2020). Polvo de basalto [Fotografía]. MyShrooms.
<https://www.myshrooms.com>

Neville, A. M. (2012). Properties of Concrete (5th ed.). Pearson Education Limited.

NMX-AA-132-SCFI-2006. (2006). Guía para el muestreo de suelos para su caracterización física y química. Dirección General de Normas, Secretaría de Economía, México.

NMX-C-083-ONNCCE-2003. (2003). Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos. ONNCCE.

ONNCCE. (2013). NMX-C-255-ONNCCE-2013: Industria de la construcción – Aditivos químicos para concreto – Especificaciones y métodos de ensayo. ONNCCE.

ONNCCE. (2014). NMX-C-083-ONNCCE-2014: Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes – Método de ensayo. ONNCCE.

Ramachandran, V. S., Feldman, R. F., & Beaudoin, J. J. (2002). Concrete Science and Technology: A Handbook for Engineers. William Andrew Publishing.

Rasool, A., Khan, K., Shah, A. A., & Xu, S. (2023). Geochemical interactions of basalt powder with CO₂ and its implications for mineral carbonation. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(2), 109849. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109849>

Rodrigues, R. A., da Silva, R. V., & Vieira, C. M. F. (2019). Use of construction and demolition waste in paving for low traffic roads. Journal of Cleaner Production, 222, 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.031>

Teorías del Hormigón. (2014). Curva de resistencia con relación a los días de nacimiento del cemento portland [Gráfico]. Teorías del Hormigón. <https://www.teoriasdelhormigon.com>

Yang, J., & He, X. (2023). Durability and sustainability of cement and concrete composites. *Materials*, 16(16), 5693. <https://doi.org/10.3390/ma16165693>

Youness, R. A., Abbas, M., & Ghanem, H. (2024). Activation of basalt powder for enhancing early strength of Portland cement. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 1722–1735. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.139>

Youness, R., El Kacimi, L., & Moustahsane, A. (2024). Activation of basalt powder in acidic and alkaline environments for use in fast-setting cement composites. *Materials*, 17(5), 1834. <https://doi.org/10.3390/ma17051834>

de Guzmán, D. S. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Pontificia Universidad Javeriana.

Sharp, J. H. (2006). Surely we know all about cement—don't we?. *Advances in applied ceramics*, 105(4), 162-174.

Yam, J. L. C., Carcaño, R. S., & Moreno, É. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2), 39-46.

Pérez, L., Rojas, Y. A., & Melgarejo, L. M. (2002). *Agua*. La Perla Cubana

Fallas, G. G., Madrigal, C. H., García, M. P., Valenciano, I. R., Vega, L. D. R., & Guzmán, G. S. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en marcha*, 25(2), 80-86.

Pacheco Flores, L. M. (2017). *Propiedades del concreto en estado fresco y endurecido*.

López Ruiz, L. A., Roca Ramón, X., & Gassó Domingo, S. (2020). Economía circular en el sector de los residuos de construcción y demolición: Análisis de iniciativas en España. In Proceedings from the 24th International Congress on Project Management and Engineering (Alcoy, July 2020) (pp. 1320-1334). Asociación Española de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO).

Rodrigues, R., Kozusny-Andreani, D. I., & Frias, D. F. R. (2019). Aprovechamiento de residuos de la construcción civil en reparaciones de carreteras rurales. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 23(1).

Esguerra Serna, A., & Castro Hernández, D. F. (2018). Basalto como agregado en concreto para construcción de bermas y cunetas en vías terciarias (Doctoral dissertation).

Izquierdo, S., Diaz, J., Mejía, R., & Torres, J. (2013). Cemento adicionado con un residuo del proceso de craqueo catalítico (FCC): hidratación y microestructura. *Revista ingeniería de construcción*, 28(2), 141-154.

Lino Vidal, D. J., & Quispe Pacheco, C. F. Análisis y evaluación del uso de fibra de basalto en el concreto para mejorar la resistencia a la corrosión de estructuras sumergidas en las zonas marinas de Pisco.

Barbaro, L. A., Iwasita, B. E., Karlanian, M., & Rubio, E. J. Uso del polvo de roca basáltica procedente de la provincia de Misiones como corrector de pH.

Morales-Cervantes, A. A., Olguin-Coca, F. J., López-León, A. L., & López-León, L. D. (2024). Elaboración de concreto usando residuos de basalto. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12, 17-23.

Rasool, M. H., & Ahmad, M. (2023). Reactivity of basaltic minerals for CO₂ sequestration via in situ mineralization: a review. *Minerals*, 13(9), 1154.

Yee Armenta, J. C. (2018). Estudio de carbonatación en concreto elaborado con residuo minero.

Vidaud, E. (2013). De la historia del cemento. Construcción y tecnología en concreto, 60, 20-23.

Ruiz-Agudo, C., & Cölfen, H. (2024). Exploring the potential of nonclassical crystallization pathways to advance cementitious materials. Chemical Reviews, 124(12), 7538-7618.

ANEXOS



Designation: C39/C39M – 24

Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation C39/C39M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last 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 determination of compressive strength of cylindrical concrete specimens such as molded cylinders and drilled cores. It is limited to concrete having a density in excess of 800 kg/m³ [50 lb/ft³].

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

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

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

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

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

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

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

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

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

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

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

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

3. Terminology

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

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. Summary of Test Method

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

5. Significance and Use

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

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

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

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

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

6. Apparatus

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

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

6.1.1.1 Within 13 months of the last calibration,

6.1.1.2 On original installation or immediately after relocation,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

where:

A = load, kN [lbf] indicated by the machine being verified, and

B = applied load, kN [lbf] as determined by the calibrating device.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

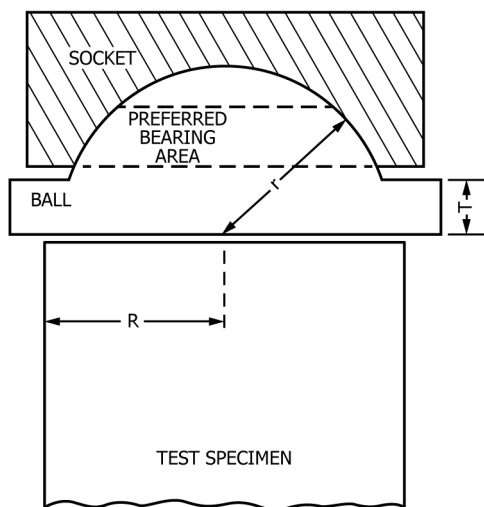
6.2.4.4 If the upper bearing block is a two-piece design composed of a spherical portion and a bearing plate, a mechanical means shall be provided to ensure that the spherical portion is fixed and centered on the bearing plate.

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

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

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

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



$$T \geq R - r$$

r = radius of spherical portion of upper bearing block

R = nominal radius of specimen

T = thickness of upper bearing block extending beyond the sphere

FIG. 1 Schematic Sketch of Typical Upper Bearing Block

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

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

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

6.2.5.1 The lower bearing block shall be solid.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

7. Specimens

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

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

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

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

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

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

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

7.4.2 Remove any surface moisture with a towel and determine the mass of the specimen in air. Submerge the specimen in water at a temperature of $23.0^{\circ}\text{C} \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ [$73.5^{\circ}\text{F} \pm 3.5^{\circ}\text{F}$] for 15 sec $\pm$ 5 sec. Then, determine the apparent mass of the specimen while submerged under water.

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

8. Procedure

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

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

8.3 Tolerances for specimen ages are as follows:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

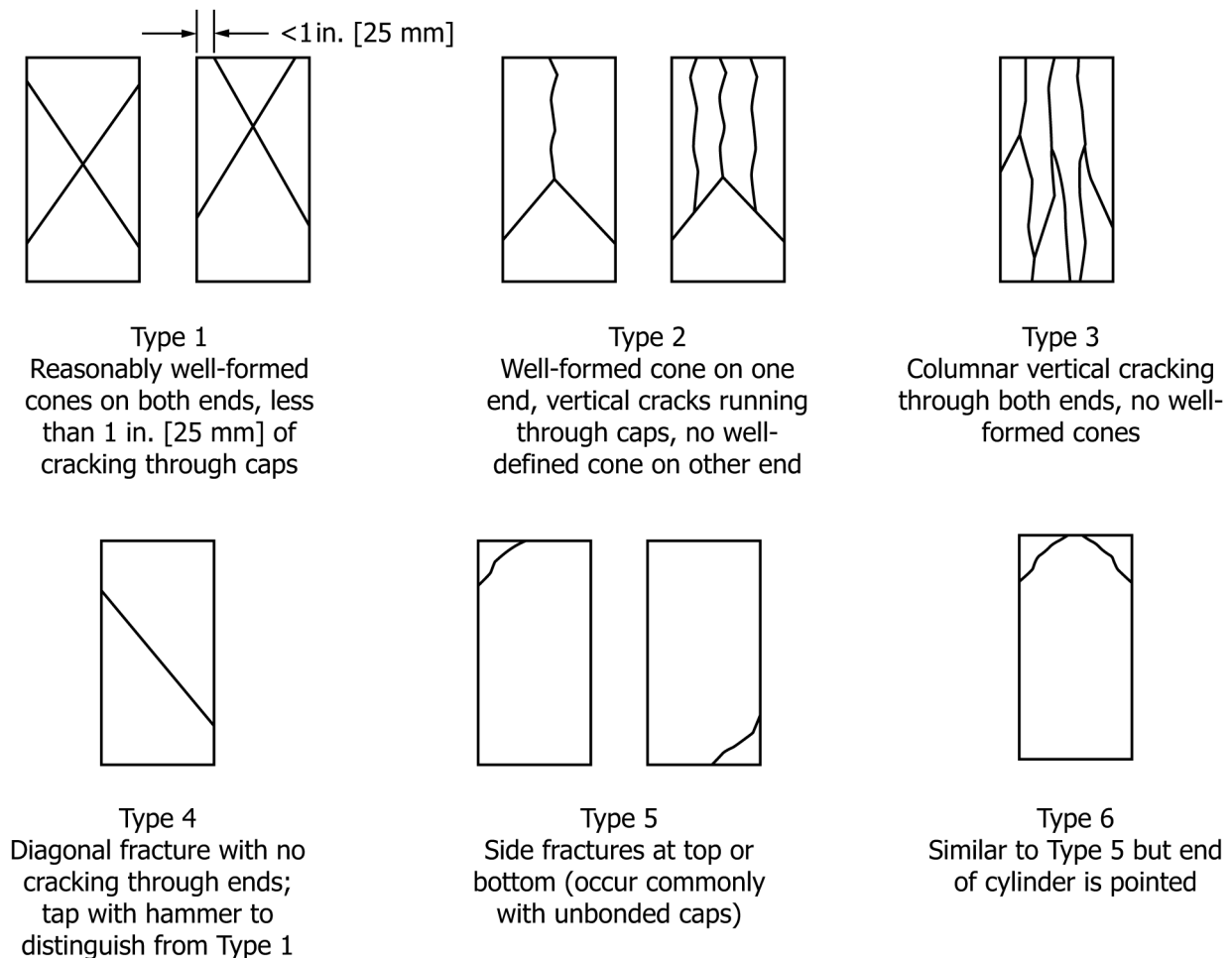


FIG. 2 Schematic of Typical Fracture Patterns

9. Calculation

9.1 Calculate the compressive strength of the specimen as follows:

SI units:

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

Inch-pound units:

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

where:

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

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

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

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

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

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

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

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

SI units:

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

Inch-pound units:

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

where:

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

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



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

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

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

where:

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

10. Report

10.1 Report the following information:

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

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

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

11. Precision and Bias

11.1 Precision

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

12. Keywords

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

SUMMARY OF CHANGES

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

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

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

- (1) Revised 11.1.1 and 11.1.2.

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

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

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



Designation: C403/C403M – 23

Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance¹

This standard is issued under the fixed designation C403/C403M; 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 the time of setting of concrete, with slump greater than zero, by means of penetration resistance measurements on mortar sieved from the concrete mixture.

1.2 This test method is suitable for use only when tests of the mortar fraction will provide the information required.

1.3 This test method may also be applied to prepared mortars and grouts.

1.4 This test method is applicable under controlled laboratory conditions, as well as under field conditions.

1.5 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.

1.6 The text of this standard refers to notes and footnotes that provide explanatory material. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of the standard.

1.7 *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.*

1.8 *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 C09.23 on Chemical Admixtures.

Current edition approved June 1, 2023. Published June 2023. Originally approved in 1957. Last previous edition approved in 2016 as C403/C403M–16. DOI: 10.1520/C0403_C0403M-23.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

C125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates

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

C670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

C802 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods for Construction Materials

D1558 Test Method for Moisture Content Penetration Resistance Relationships of Fine-Grained Soils (Withdrawn 2019)³

E11 Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves

E2251 Specification for Liquid-in-Glass ASTM Thermometers with Low-Hazard Precision Liquids

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions are given in Terminology C125.

4. Summary of Test Method

4.1 A mortar sample is obtained by sieving a representative sample of fresh concrete. The mortar is placed in a container

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 The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

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

and stored at a specified ambient temperature. At regular time intervals, the resistance of the mortar to penetration by standard needles is measured. From a plot of penetration resistance versus elapsed time, the times of initial and final setting are determined.

5. Significance and Use

5.1 Since the setting of concrete is a gradual process, any definition of time of setting must necessarily be arbitrary. In this test method, the times required for the mortar to reach specified values of resistance to penetration are used to define times of setting.

5.2 This test method can be used to determine the effects of variables, such as water content; brand, type and amount of cementitious material; or admixtures, upon the time of setting of concrete. This test method may also be used to determine compliance with specified time-of-setting requirements.

5.3 This test method may also be applied to prepared mortars and grouts. However, when the setting time of concrete is desired, the test shall be performed on mortar sieved from the concrete mixture and not on a prepared mortar intended to simulate the mortar fraction of the concrete; it has been shown that the initial and final setting times may be increased when using the prepared mortar.

6. Apparatus

6.1 *Containers for Mortar Specimens*—The containers shall be rigid, watertight, nonabsorptive, free of oil or grease, and either cylindrical or rectangular in cross section. Mortar surface area shall be provided for ten undisturbed readings of penetration resistance in accordance with clear distance requirements specified in Procedure. The lateral dimension shall be at least 6 in. [150 mm] and the height at least 6 in. [150 mm].

6.2 *Penetration Needles*—Needles shall be provided which can be attached to the loading apparatus and which have the following bearing areas: 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{20}$, and $\frac{1}{40}$ in.² [645, 323, 161, 65, 32, and 16 mm²]. Each needle shank shall be scribed circumferentially at a distance 1 in. [25 mm] from the bearing area. The length of the $\frac{1}{40}$ in.² [16-mm²] needle shall be not more than $3\frac{1}{2}$ in. [90 mm].

6.3 *Loading Apparatus*—A device shall be provided to measure the force required to cause penetration of the needles. The device shall be capable of measuring the penetration force with an accuracy of ± 2 lbf [10 N] and shall have a capacity of at least 130 lbf [600 N].

NOTE 1—Suitable loading apparatus can be of the spring-reaction type as described in Test Method **D1558**, or of other types with a calibrated force measuring device, such as an electronic load cell or a hydraulic pressure gage.

6.4 *Tamping Rod*—The tamping rod shall be a round, straight, steel rod $\frac{5}{8}$ in. [16 mm] in diameter and approximately 24 in. [600 mm] in length, having the tamping end or both ends rounded to a hemispherical tip, the diameter of which is $\frac{5}{8}$ in. [16 mm].

6.5 *Pipet*—A pipet or other suitable instrument shall be used for drawing off bleed water from the surface of the test specimen.

6.6 *Thermometer*—The thermometer shall be capable of measuring the temperature of the fresh mortar to ± 1 °F [± 0.5 °C]. ASTM liquid-in-glass thermometers having a temperature range from 0 °F to 120 °F [−20 °C to 50 °C], and conforming to the requirements of Thermometer 97F (or 97C) as prescribed in Specification **E2251** are satisfactory. Other thermometers of the required accuracy, including the metal immersion type, are acceptable.

7. Sampling, Test Specimens, and Test Units

7.1 For tests under field conditions, prepare three specimens from each sample of concrete.

7.2 For tests under laboratory conditions, the requirements depend upon the purpose of the tests.

7.2.1 For testing to prove compliance of a material with performance requirements, make at least three separate concrete batches for each variable under investigation. Perform one time of setting test on each batch. Make an equal number of batches for each variable on any one day. When it is impossible to perform at least one test for each variable on any one day, mix the entire series of batches in as few days as possible, and repeat one of the mixtures each day as a standard for comparison.

7.2.2 For other tests, prepare three test specimens from one batch of concrete for each test variable.

7.3 Record the time at which initial contact was made between cement and mixing water.

7.4 For tests under field conditions, obtain a representative sample of the fresh concrete in accordance with Practice **C172/C172M**. For tests under laboratory conditions, make the concrete in accordance with Practice **C192/C192M**. Determine and record the slump (Test Method **C143/C143M**) and air content (Test Method **C173/C173M** or **C231/C231M**) of the fresh concrete.

7.5 From the concrete not used in the slump and air content tests, select a representative portion of sufficient volume to provide enough mortar to fill the test container, or containers, to a depth of at least $5\frac{1}{2}$ in. [140 mm].

7.6 Using the procedure in Practice **C172/C172M**, obtain a mortar sample by wet-sieving the selected portion of concrete through a 4.75-mm sieve⁴ and onto a nonabsorptive surface.

7.7 Thoroughly remix the mortar by hand methods on the nonabsorptive surface. Measure and record the temperature of the mortar. Place the mortar in the container, or containers, using a single layer. Consolidate the mortar to eliminate air pockets in the specimen and level the top surface. This may be accomplished by rocking the container back and forth on a solid surface, by tapping the sides of the container with the tamping rod, by rodding the mortar, or by placing the container on a vibrating table (see **Note 2**). If rodding is used, rod the mortar with the hemispherical end of the tamping rod. Rod the mortar once for each 1 in.² [645 mm²] of top surface area of the specimen and distribute the strokes uniformly over the cross section of the specimen. After completion of the rodding,

⁴ Detailed requirements for this sieve are given in Specification **E11**.

tap the sides of the containers lightly with the tamping rod to close voids left by the tamping rod and to further level the surface of the specimen. Upon completion of specimen preparation, the mortar surface shall be at least $\frac{1}{2}$ in. [10 mm] below the top edge of the container to provide space for the collection and removal of bleed water and to avoid contact between the mortar surface and the protective covering specified in Section 8.

NOTE 2—Sieved mortar is generally of fluid consistency and air pockets are readily removed by the listed consolidation methods. The user should exercise judgment in the selection of the consolidation method. Rocking the container or tapping of the sides should be sufficient for fluid mortars. Rodding or using a vibrating table may be desirable for stiffer mortars. When using a vibrating table, use low-amplitude vibration so that portions of the sample are not ejected from the container.

8. Conditioning

8.1 For tests under laboratory conditions, the storage temperature for specimens shall be within the range 68 °F to 77 °F [20 °C to 25 °C], or as specified by the user.

8.2 For tests under field conditions, store the specimens under ambient conditions, or as specified by the user. Shield the specimens from direct sunlight.

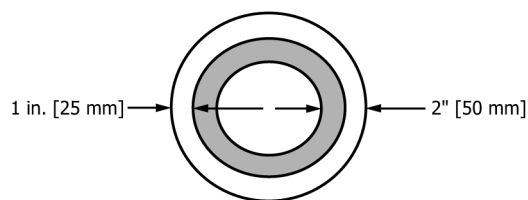
8.3 Measure and record the ambient air temperature at the start and finish of the test. To prevent excessive evaporation of moisture, keep the specimens covered with a suitable material such as damp burlap or a tight-fitting, water-impermeable cover for the duration of the test, except when bleed water is being removed or penetration tests are being made.

9. Procedure

9.1 Just prior to making a penetration test, remove bleed water from the surface of the mortar specimens by means of a pipet or suitable instrument. To facilitate collection of bleed water, tilt the specimen carefully to an angle of about 10° from the horizontal by placing a block under one side 2 min prior to removal of the water.

9.2 Insert a needle of appropriate size, depending upon the degree of setting of the mortar, in the penetration resistance apparatus and bring the bearing surface of the needle into contact with the mortar surface. Gradually and uniformly apply a vertical force downward on the apparatus until the needle penetrates the mortar to a depth of 1 in. $\pm$ $\frac{1}{16}$ in. [25 mm $\pm$ 2 mm], as indicated by the scribe mark (Note 4). The time required to penetrate to the 1 in. [25 mm] depth shall be 10 s $\pm$ 2 s. Record the force required to produce the 1 in. [25 mm] penetration and the time of application, measured as elapsed time after initial contact of cement and water. Calculate the penetration resistance by dividing the recorded force by the bearing area of the needle, and record the penetration resistance. In subsequent penetration tests take care to avoid areas where the mortar has been disturbed by previous tests. The clear distance between needle impressions shall be at least two diameters of the needle being used, but not less than $\frac{1}{2}$ in. [15 mm]. The clear distance between any needle impression and the side of the container shall be at least 1 in. [25 mm], but not more than 2 in. [50 mm], as depicted in Fig. 1.

NOTE 3—For a cylindrical container with the smallest allowable outer



NOTE 1—Dark-colored areas define where needle penetrations are permitted.

FIG. 1 Top View of Mortar Test Specimen

diameter of 6 in., the operator can reasonably expect to achieve approximately eight penetrations before impinging upon previous penetrations. This is based on using needles of the following surface areas: 1 @ $\frac{1}{2}$ [13], 2 @ $\frac{1}{4}$ [6], 2 @ $\frac{1}{10}$ [2.5], 2 @ $\frac{1}{20}$ [1.3], and 1 @ $\frac{1}{40}$ [0.6] in.² [mm²].

NOTE 4—To facilitate determination of when the required penetration has been attained, a sliding marker may be attached to the needle shaft. For example, a paper clip or masking tape may be placed on the shaft so that it coincides with the scribe mark. The marker should not interfere with the penetration of the needle into the mortar. The position of the marker should be checked prior to making a penetration.

9.3 For conventional concrete mixtures at laboratory temperatures of 68 °F to 77 °F [20 °C to 25 °C], make the initial test after an elapsed time of 3 to 4 h after initial contact between cement and water. Subsequent tests should be made at $\frac{1}{2}$ - to 1-h intervals. For concrete mixtures containing accelerators, or at temperatures higher than laboratory, it is advisable to make the initial test after an elapsed time of 1 h to 2 h and subsequent tests at $\frac{1}{2}$ -h intervals. For concrete mixtures containing retarders, or at temperatures lower than laboratory, the initial test may be deferred until an elapsed time of 4 h to 6 h. In all cases, time intervals between subsequent tests may be adjusted as necessary, depending upon the rate of setting, to obtain the required number of penetrations.

9.4 Make at least six penetrations for each time-of-setting test, with time intervals of such duration as to provide a satisfactory curve of penetration resistance versus elapsed time (Note 5). Continue testing until one at least penetration resistance reading equals or exceeds 4000 psi [27.6 MPa].

NOTE 5—A satisfactory curve is one which represents the overall development of penetration resistance and includes points before and after the times of initial and final setting to improve the accuracy of the required interpolation. For normal setting mixtures, test points are usually at equally spaced time intervals. Premature penetration testing will result in too many data points earlier than the initial setting time. This may decrease the accuracy of the estimated setting time by biasing the best fit line when regression analysis is used to analyze the penetration resistance data.

9.5 *Plotting Test Results*—One of the following alternative procedures may be used to plot the test results and obtain times of setting (Note 6). Appendix X1 illustrates the application of these procedures.

NOTE 6—The plot of penetration resistance versus elapsed time provides information on the rate of setting. The plot may be used to select the time for subsequent penetration tests and it can assist in identifying spurious test results. Therefore, it is recommended that the data be plotted as they are being accumulated.

9.5.1 Use the following plotting procedure to determine the times of setting by hand-fitting a smooth curve through the data. Prepare a graph of penetration resistance, as the ordinate,

versus elapsed time, as the abscissa, using a scale such that 500 psi [3.5 MPa] and 1 h are each represented by a distance of at least ½ in. [15 mm]. Plot the values of penetration resistance as a function of elapsed time.

9.5.2 Use the following plotting procedure to determine the times of setting by linear regression analysis of the logarithms of the data by using a suitable calculator. Using log-log graph paper, prepare a graph of penetration resistance, as the ordinate, versus elapsed time in minutes, as the abscissa. The limits of penetration resistance on the ordinate should extend from 10 psi [0.1 MPa] to 10 000 psi [100 MPa], and the limits of elapsed time on the abscissa should extend from 10 to 1000 min. If slow setting mixtures are used, the time limits may have to be 100 to 10 000 min. Plot the values of penetration resistance as a function of elapsed time (Note 5).

9.5.3 Use the following procedure if a computer is used to plot test results and obtain the times of setting by regression analysis of the data. As the test results are obtained, enter the time and penetration resistance into the computer and plot the penetration resistance as the ordinate and the elapsed time as the abscissa. For software that permits only linear regression analysis, convert the data by taking their logarithms. The converted data will be fitted by a straight line⁵ (see Eq 1):

$$\text{Log}(PR) = a + b \text{Log}(t) \quad (1)$$

where:

PR = penetration resistance

t = elapsed time

a and b = regression constants

The data do not have to be converted if the software permits direct fitting of a power function:

$$PR = ct^d \quad (2)$$

where:

c and d = regression constants

9.5.4 The procedures in 9.5.2 and 9.5.3 assume that the data obey (Eq 1) or (Eq 2). Verify that the data obey one of these relationships. If the correlation coefficient for the regression analysis, after removal of outliers (see Note 7), is less than 0.98, use the procedure in 9.5.1.

10. Calculation

10.1 For each variable under investigation, separately plot the results of three or more time-of-setting tests. For each plot prepared according to 9.5.1, hand fit a smooth curve to the data points. For each plot prepared according to 9.5.2 or 9.5.3, use the method of least squares to obtain the constants of the best-fit relationship given by (Eq 1) or (Eq 2), whichever is applicable. Disregard data points that are obvious outliers from the trend defined by the rest of the points (Note 7).

NOTE 7—Outliers may occur because of factors such as: interferences due to the larger particles in the mortar; presence of large voids within the penetration zone; interferences from the impressions created by adjacent penetrations; failure to maintain the instrument perpendicular to the test surface during penetration; errors in reading the load; variations in the

penetration depths; or variations in rate of loading. Judgement of the operator is required to identify those points that should not be included in the data analysis.

10.2 For each plot, determine the times of initial and final setting as the times when the penetration resistance equals 500 psi [3.5 MPa] and 4000 psi [27.6 MPa], respectively. For plots made according to 9.5.1, determine times of setting by visual inspection of the drawn curves. For plots made according to 9.5.2 or 9.5.3, determine the times of setting by interpolation using the best-fit regression equation. Record the times of setting in hours and minutes to the nearest 5 min.

10.3 For each variable under investigation, calculate the times of initial and final setting as the average values of the individual test results. Record the average times in hours and minutes to the nearest 5 min.

11. Report

11.1 *Data on Concrete Mixture*—Report the following information on the concrete mixture:

11.1.1 Brand and type of cementitious materials, amounts (mass) of cementitious materials, fine aggregate and coarse aggregate per cubic yard [per cubic metre] of concrete, nominal maximum aggregate size, and water-cement or water-cementitious material ratio,

11.1.2 The name, type, and amount of admixture(s) used,

11.1.3 Air content of fresh concrete and method of determination,

11.1.4 Slump of concrete,

11.1.5 Temperature of mortar after sieving,

11.1.6 Record of ambient temperature during the test period, and

11.1.7 Date of test.

11.2 *Time of Setting Results*—Report the following information on the time of setting tests:

11.2.1 A plot of penetration resistance versus elapsed time for each time of setting test,

11.2.2 The times of initial and final setting for each test, reported in hours and minutes to the nearest minute, and

11.2.3 The average times of initial and final setting for each test condition, reported in hours and minutes to the nearest 5 min.

12. Precision and Bias

12.1 Precision:

NOTE 8—The precision values were obtained from an interlaboratory study involving ten laboratories and three concrete mixtures. The range of the average time of initial setting was from 230 min to 470 min, and the range of the average time of final setting was from 310 min to 580 min. Two replicate determinations were made by each operator on specimens made from each mixture. Setting times were determined by regression analysis as described in X1.3. Data were obtained using apparatus described by the inch-pound version of this test method.

12.1.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator coefficients of variation are shown in Table 1. The results of two properly conducted tests by the same operator on the same material are not expected to differ by more than the values shown in the third column of Table 1, as a percentage of their average. For three test determinations on the same batch, the range (difference between highest and lowest) of the results

⁵ Popovics, S., 1971, "Physical Aspects of the Setting of Portland Cement Concrete," *Journal of Materials*, JMLSA, Vol. 6, No. 1, March, pp. 150–162.



TABLE 1 Single-Operator Precision

Time of Setting	Single-Operator Coefficient of Variation, %	Acceptable Difference Between Two Determinations, % ^A	Acceptable Range of Three Determinations, % ^B
Initial	1.3	3.6	4.3
Final	1.3	3.6	4.3

^AThese numbers represent the ($d2s$ %) limits as described in Practice C670.

^BCalculated as described in the section "Acceptable Range Among Results" of Practice C670.

obtained by the same operator are not expected to exceed the values shown in the fourth column of Table 1, as a percentage of their average.

NOTE 9—The acceptable range of three determinations shown in Table 1 does not apply to three determinations from separate batches of a concrete mixture.

12.1.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory coefficients of variation are shown in Table 2. The results of properly-conducted tests by two different laboratories on specimens from a single batch of concrete are not expected to differ by more than the values shown in the third column of Table 2, expressed as a percentage of their average. The

TABLE 2 Multilaboratory Precision

Time of Setting	Multilaboratory Coefficient of Variation, %	Acceptable Difference Between Two Determinations, % ^A	Acceptable Difference Between Average of Three Determinations, % ^B
Initial	3.7	10.4	9.8
Final	2.7	7.6	7.0

^AThese numbers represent the ($d2s$ %) limits as described in Practice C670.

^BCalculated as described in the section "Test Result is Average of Multiple Determinations" of Practice C802.

averages of three test results by two different laboratories obtained on specimens from a single batch of the same concrete are not expected to differ by more than the values in the fourth column of Table 2.

12.2 *Bias*—The bias of this test method cannot be determined because times of setting can be defined only in terms of the test method.

13. Keywords

13.1 concrete; mortar; penetration resistance; time of final setting; time of initial setting

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. ILLUSTRATIVE EXAMPLES

X1.1 The penetration resistance (PR) and the elapsed time (t) data in Table X1.1 will be used to illustrate the procedures for determining times of setting.

X1.2 *Hand Fit*—Fig. X1.1 is a plot of the penetration resistance versus elapsed time values in Table X1.1. The smooth curve was drawn by-hand using a flexible drawing curve. The curve was drawn so as to achieve the visual best-fit to the data. Note that the penetration resistance at an elapsed time of 335 min is an obvious outlier, and this point was disregarded in drawing the best-fit curve. Horizontal lines are drawn at penetration resistance values of 500 psi and 4000 psi. The intersections of the horizontal lines with the curve define the times of initial and final setting, which in this case are 289

TABLE X1.1 Penetration Resistance

Penetration Resistance (PR) (psi) ^A	Elapsed Time (t) (min)	Log(PR)	Log(t)
44	200	1.643	2.301
110	230	2.041	2.362
216	260	2.334	2.415
540	290	2.732	2.462
1000	320	3.000	2.505
1000	335	3.000	2.525
2000	350	3.301	2.544
2560	365	3.408	2.562
3520	380	3.547	2.580
4440	395	3.647	2.597

^AMPa = psi $\times$ 0.00689.

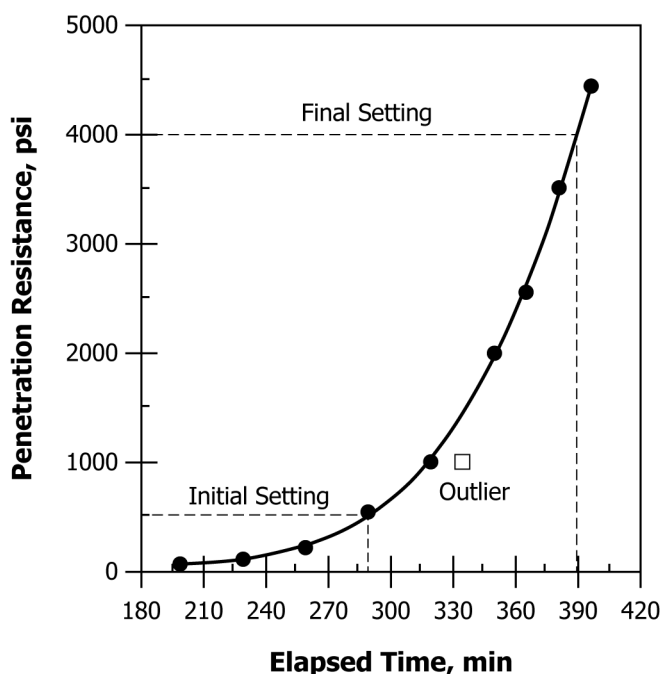


FIG. X1.1 Plot of Penetration Resistance Values Versus Elapsed Time and Hand Fit Curve Used to Determine Time of Setting (Note: Not drawn to actual scale)

min and 389 min, respectively.

X1.3 Regression Analysis:

X1.3.1 **Fig. X1.2** is a log-log plot of the penetration resistance versus elapsed time values. The plot shows that, with the exception of the outlier, there is approximately a straight line

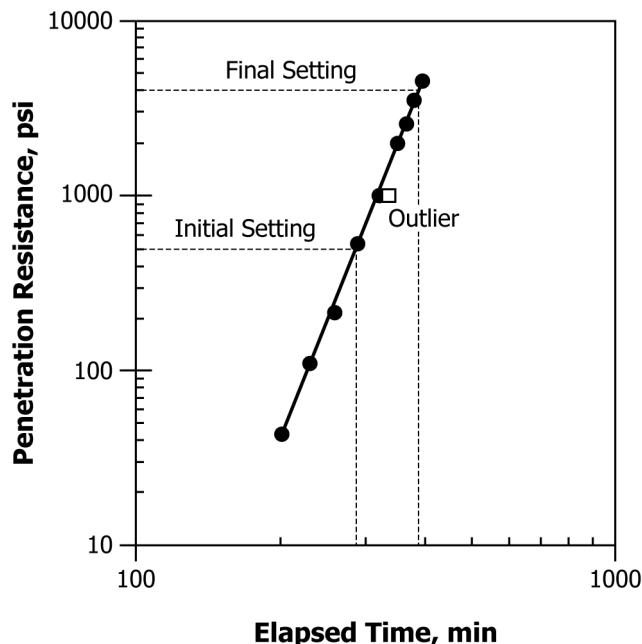


FIG. X1.2 Log-Log Plot Showing Straight Line to Determine Times of Setting by Using Regression Analysis

relationship between the logarithms of penetration resistance and elapsed time. The straight line is obtained by linear regression analysis using the logarithms shown in the third and fourth columns of **Table X1.1**. The equation for this line is:

$$\text{Log}(PR) = -14.196 + 6.871 \text{Log}(t) \quad (\text{X1.1})$$

where:

PR = penetration resistance, and

t = elapsed time.

The correlation coefficient is 0.999, and it is, therefore, acceptable to use linear regression analysis.

X1.3.2 To obtain the times of setting, the equation is rewritten as:

$$\text{Log}(t) = \frac{\text{Log}(PR) + 14.196}{6.871} \quad (\text{X1.2})$$

X1.3.3 For time of initial setting, substitute the value 500 for PR :

$$\text{Log}(t) = \frac{\text{Log}(500) + 14.196}{6.871} = \frac{2.699 + 14.196}{6.871} = 2.458 \quad (\text{X1.3})$$

therefore:

$$t = (10)^{2.458} = 287 \text{ min.}$$

X1.3.4 For time of final setting, substitute the value 4000 for PR :

$$\text{Log}(t) = \frac{\text{Log}(4000) + 14.196}{6.871} = \frac{3.602 + 14.196}{6.871} = 2.590 \quad (\text{X1.4})$$

therefore:

$$t = (10)^{2.590} = 389 \text{ min.}$$

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C403/C403M – 16, that may impact the use of this test method. (Approved June 1, 2023.)

(1) Added **1.6**.

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/