

Elaboración de concreto usando residuos de basalto Production of Concrete Using Basalt Waste

Abril A. Morales-Cervantes ^a, Francisco J. Olguín-Coca ^a, Abraham L. López-León ^b, Luis D. López-León ^{a,*}

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro No.450 Nte. Col. Partido Romero, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Resumen

El reutilizar el basalto como sustituto del cemento en concreto es el tema de este estudio, evaluando su viabilidad utilizando parámetros de resistencia a la compresión y tracción indirecta. La caracterización del basalto por SEM/EDS reveló altos contenidos de Si y Ca, similares a la composición del cemento. Se diseñó una mezcla para $f'c = 200 \text{ Kg/cm}^2$ con basalto reemplazando el cemento en proporciones de 5%, 10%, 15% y 20%. Los ensayos de compresión y tracción indirecta mostraron que hasta un 10% de basalto reduce la resistencia solo en un 13% comparado con concreto convencional. Sin embargo, con más del 15% de basalto como sustituto de cemento, la resistencia disminuye significativamente. El basalto en mayores proporciones altera la cohesión y adhesión entre las partículas de cemento y los agregados, resultando en una microestructura más susceptible a microfisuras. Este estudio busca fomentar la sostenibilidad explorando materiales alternativos y reduciendo el consumo de cemento, promoviendo prácticas más ecológicas en la construcción.

Palabras Clave: Concreto, Basalto, Resistencia a la compresión, Tracción indirecta.

Abstract

Reusing basalt as a substitute for cement in concrete is the subject of this study, evaluating its viability using compression and indirect tension resistance parameters. SEM/EDS characterization of the basalt revealed high Si and Ca contents, similar to the composition of cement. A mix was designed for $f'c = 200 \text{ Kg/cm}^2$ with basalt replacing cement in proportions of 5%, 10%, 15%, and 20%. Compression and indirect tension tests showed that up to 10% basalt reduces resistance by only 13% compared to conventional concrete. However, with more than 15% basalt as a cement substitute, resistance decreases significantly. Higher basalt proportions alter the cohesion and adhesion between cement particles and aggregates, resulting in a microstructure more susceptible to microcracks. This study aims to promote sustainability by exploring alternative materials and reducing cement consumption, fostering greener practices in construction.

Keywords: Concrete, Basalt, Compression Resistance, Indirect Tension.

1. Introducción

La industria de la construcción, como motor clave del desarrollo económico, se enfrenta a la imperativa necesidad de adoptar prácticas sostenibles y eficientes que minimicen su impacto ambiental (Bian et al., 2023). En este contexto, la investigación y aplicación de tecnologías innovadoras para la producción de concreto se erigen como elementos cruciales. Uno de los enfoques más prometedores en este ámbito es la utilización de residuos mineros en la elaboración de concretos, una práctica que no solo busca mitigar la acumulación de

desechos industriales, sino también mejorar la sostenibilidad de la construcción.

La utilización de residuos mineros en la producción de concreto constituye un campo de estudio que ha ganado atención en los últimos años. La incorporación de residuos industriales en la producción de concreto no solo responde a la necesidad de reducir la huella de carbono de la construcción, sino que también puede conducir a soluciones económicamente viables para la gestión de desechos (Uddin, et al., 2021). La investigación continua sobre la viabilidad técnica y ambiental de la incorporación de residuos mineros en la elaboración de concreto es esencial para el avance hacia

*Autor para la correspondencia: luis_lopez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: mo333352@uaeh.edu.mx (Abril Adamari Morales-Cervantes), olguinc@uaeh.edu.mx (Francisco Javier Olguin-Coca), abraham.lopez@uacj.mx (Abraham Leonel López-León), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Daimir López-León).

Historial del manuscrito: recibido el 08/07/2024, última versión-revisada recibida el 20/08/2024, aceptado el 28/08/2024 publicado el 14/11/2024. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13386>



prácticas más sostenibles en la industria de la construcción (Ou, et al., 2023).

En este contexto, la presente investigación se centra en los "Concretos Elaborados con Residuos Mineros", con énfasis en el material extraído de basaltos en el municipio de Zempoala, Hidalgo, México. La elección de este enfoque no solo responde a la necesidad de gestionar eficientemente los residuos mineros locales, sino que también busca contribuir al cuerpo de conocimientos sobre la aplicabilidad y ventajas de incorporar estos residuos en la producción de concreto en el ámbito regional y más allá.

La revisión de la literatura revela que, si bien existen estudios que abordan la incorporación de residuos industriales en el concreto, aún queda mucho por descubrir en términos de las propiedades físicas, químicas y mecánicas específicas que los residuos mineros de basalto pueden aportar a la formulación de concretos (Khan & McNally, 2023). Esta investigación aspira a llenar este vacío, proporcionando una evaluación exhaustiva de la viabilidad técnica de los concretos elaborados con residuos mineros en la región de Zempoala, Hidalgo.

La industria de la construcción, en su continuo desarrollo, enfrenta desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad y la gestión eficiente de los recursos naturales. La presente investigación se enfoca en la elaboración de concreto utilizando residuos de basalto extraídos en el municipio de Zempoala, Hidalgo, México. Este tema adquiere relevancia en el contexto de la creciente conciencia ambiental y la necesidad de encontrar soluciones innovadoras para reducir la huella ecológica de la construcción. En síntesis, la presente investigación se presenta como una contribución significativa al campo de la construcción sostenible, al explorar y validar la aplicación práctica de los residuos mineros de basalto en la producción de concreto, promoviendo así un enfoque más eficiente y eco amigable en la industria de la construcción (Al Shouny, et al., 2023).

1.1. Problemática

En el municipio de Zempoala, Hidalgo, México, se ha generado una problemática ambiental y económica debido a la gestión ineficiente de los desechos mineros de basalto. Se requiere una acción inmediata para solucionar esta situación. Aunque la extracción de basalto produce una gran cantidad de desechos, la falta de uso de estos en la fabricación de concreto ha causado un problema de acumulación de desechos. Este desecho minero, que podría ser considerado un recurso valioso, se desaprovecha y, en lugar de ser reincorporado de manera sostenible en la cadena de producción, termina contribuyendo a la degradación ambiental y al agotamiento de los recursos naturales.

La falta de una estrategia integral para la gestión de estos desechos es un factor importante que impide no solo la optimización de los recursos, sino también la creación de oportunidades económicas locales a través de la reutilización y reciclaje de estos (García, 2019). Además, la gestión tradicional de los desechos mineros implica costos significativos para el transporte y la disposición final, lo que resulta en una carga financiera para las compañías extractoras y la comunidad en general (Martínez, 2018).

Desde una perspectiva más amplia, la falta de investigación y aplicación de los desechos de la minería del basalto en la producción de concreto es una oportunidad perdida para avanzar hacia prácticas de construcción más sostenibles (Hernández, 2020). El uso de enfoques innovadores y sostenibles en la producción de materiales esenciales como el concreto podría beneficiar significativamente a la industria de la construcción, conocida por su intensivo consumo de recursos naturales y su importante contribución a las emisiones de carbono (Ji, et al., 2024).

La urgencia de abordar la gestión de los desechos mineros de basalto desde una perspectiva integral y sostenible surge como una preocupación importante (Malhotra, 2002). La acumulación de desechos continúa como resultado de la falta de uso de estos desechos en la producción de concreto (Noh, et al, 2024). Además, impide aprovechar una oportunidad estratégica para mejorar la sostenibilidad ambiental, reducir los costos para las empresas locales y avanzar hacia una construcción más ecológica (Pérez, 2017). La investigación actual se presenta como un esfuerzo necesario para comprender y abordar esta problemática, proponiendo soluciones que no solo disminuyan los efectos ambientales, sino que también fomenten el crecimiento económico local y fomenten prácticas más responsables en la industria de la construcción.

2. Metodología

En este apartado se detalla la metodología empleada en el estudio de la elaboración de concreto utilizando residuos de basalto como material en la mezcla de concreto. Se abordan aspectos como el diseño de la mezcla, la elaboración de los especímenes, el curado y la evaluación de propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y tracción indirecta. Además, se realiza una caracterización del basalto utilizado, proporcionando una base sólida para comprender su influencia en las propiedades del concreto resultante. Se aborda el aprovechamiento del Basalto como material de construcción mediante la adición en la mezcla de concreto. Debido a sus características fisicoquímicas, el basalto actuará como sustituto del cemento en una proporción de: 5 %, 10%, 15% y 20%.

Para la realización de los ensayos de compresión y tracción indirecta se construyeron cilindros de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para los ensayos de compresión, cilindros de concreto de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para los ensayos de tracción indirecta por cuadruplicado para cada sistema en estudio. Los especímenes se elaboraron con base a la normativa (ASTM C31, 2001): "Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra", siguiendo los procedimientos establecidos. Para la determinación de la resistencia del concreto, la norma (ASTM C31, 2001) formula procedimientos para las pruebas de curado; las probetas se sometieron a ensayos de acuerdo con la normativa (ASTM C39M-16b, 2017), "Método Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto".

Para la determinación de las características físicas y químicas del Basalto, fue necesario realizar un muestreo sobre el banco de extracción de material pétreo, se analizó material de desecho tomando muestras significativas de la mina.

2.1. Caracterización química del basalto

Para la caracterización química del banco de material se realizó Microscopía Electrónica de barrido con microanálisis por dispersión de energía de Rayos X (SEM-EDS) esto se utilizó para realizar el estudio de morfología de las partículas del Basalto (ver Figura 1), así como el estudio del microanálisis con el objeto de determinar la naturaleza del material estudiado Tabla 1. Se utilizó SEM, marca Oxford instruments, modelo AZteclite, equipado con EDS.

Tabla 1: Composición química del basalto

Elemento	Wt%
O	47.44
Na	3.90
Mg	0.90
Al	9.31
Si	29.60
K	1.51
Ca	3.93
Fe	3.41
Total	100

En la Figura 1 por SEM - EDS, se observa la presencia de elementos mayoritarios de silicio, aluminio, calcio, hierro; como elementos minoritarios: potasio y magnesio.

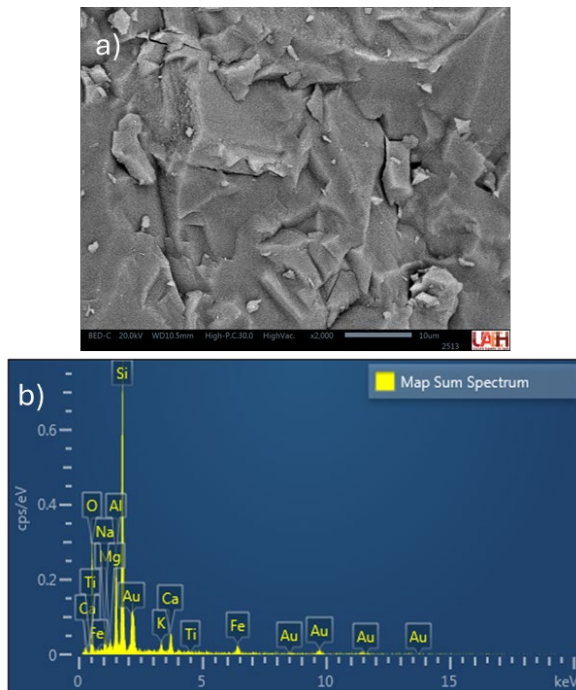


Figura 1: Microfotografía del basalto: a) Imagen general SEM, b) resultado del microanálisis general SEM-EDS.

2.2. Muestreo de residuos de basalto

El muestreo de los residuos de basalto se llevó a cabo directamente en la mina, siguiendo la norma (NMX-AA-132-SCFI, 2006). Este proceso incluyó la extracción de 25 muestras significativas de basalto con un espesor de 15 cm del suelo.

Las muestras fueron seleccionadas de manera sistemática para garantizar su representatividad.

2.2.1. Procedimiento de Muestreo

- Se identificaron áreas representativas dentro de la mina donde se acumulan residuos de basalto.
- Se delimitaron secciones de 1 metro cuadrado y se extrajeron muestras de 15 cm de espesor de cada sección.
- Se recolectaron un total de 25 muestras distribuidas uniformemente en el área de estudio.
- Las muestras se almacenaron en bolsas de polietileno para su transporte al laboratorio, donde se procedió a su análisis y caracterización.

2.3. Procedimiento pulverización del basalto

- Se selecciono y preparo las muestras de basalto, asegurando de que estén secas y limpias. Luego, pesamos 5 Kg de basalto, y lo colocamos en el cilindro de la máquina de abrasión de los Ángeles.
- A continuación, se añade las 12 esferas de acero abrasivas, junto con el basalto al contenedor de la máquina.
- Se configuró la máquina para realizar 2500 ciclos por hora. Durante este tiempo, la fricción y el impacto entre las esferas de acero y el basalto triturarán el material.
- Una vez que la máquina ha completado el número de ciclos. Se retira el contenido, incluyendo el material pulverizado y las esferas de acero, y se coloca en una bandeja para su recolección.
- El siguiente paso es utilizar la malla de tamizado número 200 para separar las partículas finas. Se coloca el material pulverizado en el tamiz con una tamizadora mecánica. Recolectamos el material que pasa a través de la malla en un recipiente limpio. Este material representa el polvo de basalto fino que hemos pulverizado para uso como sustituto de cemento.

2.4. Elaboración de especímenes de concreto

Una vez definida la composición de la mezcla, se procede a la elaboración de los especímenes de concreto. Este proceso implica la preparación cuidadosa de muestras representativas, siguiendo protocolos estandarizados para garantizar la reproducibilidad y la fiabilidad de los resultados experimentales.

Los especímenes de concreto se elaboraron con un diseño de mezcla de media sollicitación, correspondiente a una resistencia de 200 Kg/cm²; la cual es utilizada para construir edificaciones de poca altura. Para la obtención de la mezcla de concreto, diseñada por el método de peso (ACI 211.1-91, 2002). “Práctica Estándar para Seleccionar el Proporcionamiento de Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo”, se eligió para la realización de los especímenes debido a ser un método de diseño empírico – mecanicista, donde la mayoría de sus datos son parámetros conocidos, hay una mejor reproducibilidad de la mezcla.

2.4.1. Diseño de mezcla

El diseño de la mezcla se realizó bajo las siguientes consideraciones. Para el diseño se utilizó el software libre (Concrete Mix Design, 2024) con los siguientes parámetros (Tabla 2).

Tabla 2: Diseño de mezcla de concreto

Parámetro	
Revenimiento (mm)	75 máximo 25 mínimo
Tamaño máximo agregado (mm)	19
Cantidad de agua de mezcla (kg/m ³) de acuerdo con el tamaño máximo de agregado	205
Porcentaje de aire en mezcla sin entrada de aire	2
Relación agua cemento de acuerdo con la resistencia a la compresión	0.69
Módulo de finura agregado fino	2.8
Porcentaje de absorción de agregado grueso	1.5
Porcentaje de absorción de agregado fino	5

Como se mencionó anteriormente, se elaboraron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para la prueba de compresión y cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para el ensayo de tracción indirecta; el residuo de mina (basalto) se utilizó como sustituto de cemento pasando por la malla N° 200 (0.074 mm) con una dosificación de: 5%, 10%, 15% y 20% (Tabla 3), en sustitución del cemento portland compuesto.

Tabla 3: Dosificación de concreto con basalto como sustituto de cemento

Sistema	Agua Kg/m ³	Cemento Kg/m ³	Agregado grueso Kg/m ³	Agregado fino Kg/m ³	Basalto Kg/m ³	Relación A/C
0%	260.26	297.1	1054	788.9	0	0.69
5%	260.26	282.25	1054	788.9	14.85	0.69
10%	260.26	267.39	1054	788.9	29.71	0.69
15%	260.26	252.53	1054	788.9	44.56	0.69
20%	260.26	238.88	1054	788.9	58.22	0.69

2.5. Procedimiento para elaboración de la mezcla

Para la elaboración de la mezcla se siguió el procedimiento que establece la Norma Mexicana (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), que se describe a continuación.

- Inicialmente, se procedió a medir los materiales, tanto la arena como la grava, en conformidad con el diseño de la mezcla establecido.
- Seguidamente, se procedió a preparar la cantidad necesaria de agua según lo indicado en el diseño de la mezcla.

- Los agregados, tanto la arena como la grava, fueron esparcidos sobre una superficie de acero de manera uniforme.
- Posteriormente, se fragmentaron los agregados y la pasta (compuesta por cemento y basalto), mezclándolos en un proceso que se desarrolló desde el exterior hacia el interior, formando una pila con una disposición similar a la de un volcán.
- De manera gradual, se incorporó el agua a la mezcla seca, mezclando con palas desde el exterior hacia el interior, en la región donde se añadió el agua, hasta alcanzar una consistencia homogénea.
- Finalmente, el contenido de la mezcla se vertió siguiendo el procedimiento especificado para la elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.

2.6. Curado de los cilindros de concreto

El curado adecuado de los cilindros de concreto es esencial para maximizar su resistencia y durabilidad. Se implementan técnicas específicas de curado, adaptadas a las características particulares de los materiales utilizados, con el fin de optimizar el proceso de endurecimiento y minimizar la aparición de posibles defectos.

- Se desmoldaron las muestras de concreto después de un tiempo mínimo de 24 horas, siguiendo las recomendaciones de la normativa (ASTM C31/C31M, 2001).
- Se sumergieron inmediatamente las muestras en agua a una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ según lo establecido por la normativa (ASTM C192/C192M, 2014).
- Se mantuvieron las muestras de concreto sumergidas en agua durante un período de 28 días, cumpliendo con los requisitos de la normativa (ASTM C192/C192M, 2014).

2.7. Ensayo de compresión de los especímenes de concreto

Para las pruebas de compresión de cada cilindro se realizó el ensayo de acuerdo con las especificaciones de la normativa (ASTM C39/C39M, 2018). Aplicar una carga axial gradual y continua a cada cilindro a una velocidad prescrita hasta que se alcance la falla, registrando la carga máxima aplicada. Registrar la resistencia a la compresión máxima alcanzada por cada cilindro. Por último, se compara los valores de resistencia a la compresión obtenidos de los distintos sistemas en estudio.

2.8. Ensayo de tracción indirecta con uso de la celda brasileña.

Para evaluar la resistencia a la tracción indirecta de los especímenes de concreto, se llevó a cabo el ensayo con ayuda de una celda brasileña (ver Figura 2), conforme a las especificaciones de la normativa (ASTM C496/C496M, 2017). Este método implica la aplicación de una carga axial gradual y continua a cada muestra a una velocidad prescrita, hasta que se observe la falla por tensión diagonal. Durante el ensayo, se registró la carga máxima aplicada justo antes de la falla, así como la resistencia máxima a la tracción indirecta alcanzada por cada espécimen.



Figura 2: Celda brasileña para ensayo de tracción indirecta.

Al finalizar, se compararon los valores de resistencia a la tracción indirecta obtenidos entre los distintos sistemas en estudio, destacando las variaciones significativas y sus implicaciones para el diseño y la evaluación de la resistencia estructural del concreto.

3. Resultados

3.1. Prueba de resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo utilizando una prensa de compresión de cilindros de concreto marca Controls, modelo 50-C43C04, conforme a la normativa (NMX-C-083-ONNCCE, 2003). Los ensayos se realizaron 28 días después del curado por inmersión de los especímenes, asegurando así que el concreto alcanzara su resistencia máxima según los estándares establecidos.

Los ensayos de compresión mostraron una disminución en la resistencia del concreto al sustituir parcialmente el cemento con basalto (ver Tabla 4). Específicamente, la incorporación de hasta un 10% de basalto resultó en una reducción del 15% en la resistencia a la compresión en comparación con el concreto convencional.

Para las sustituciones de basalto del 15% y 20%, se observó una disminución aún más pronunciada en la resistencia a la compresión, lo que sugiere un límite crítico en la cantidad de basalto que puede añadirse sin comprometer la integridad estructural del concreto (Tam & Tam, 2019).

La notable influencia del basalto en la resistencia a la compresión del concreto se puede atribuir a varios factores. Entre ellos, la posible alteración de la matriz de cemento, ya que el basalto no se hidrata de la misma manera que el cemento. Esto afecta la cohesión y la integridad estructural del concreto, sugiriendo que a medida que aumenta la cantidad de basalto, la estructura interna del concreto se compromete, posiblemente debido a una menor cantidad de productos de hidratación que contribuyen a la resistencia mecánica.

En comparación con el concreto convencional, los especímenes con basalto muestran que, aunque el basalto puede actuar como un sustituto parcial del cemento, su efectividad está limitada por la cantidad utilizada. Los resultados sugieren que hay un umbral crítico en la sustitución de cemento por basalto, más allá del cual la resistencia del concreto disminuye significativamente.

Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para el diseño de mezclas de concreto. La reducción de la resistencia a la compresión con la adición de basalto debe ser

cuidadosamente considerada en aplicaciones estructurales donde esta propiedad es crítica. Aunque el uso de basalto puede ofrecer ventajas en términos de costos y sostenibilidad, su impacto en la resistencia mecánica del concreto limita su utilización a porcentajes relativamente bajos.

Tabla 4: Parámetros de resistencia a la compresión de concreto con basalto como sustituto de cemento.

Sistema	Especimen 1 (kg/cm ²)	Especimen 2 (kg/cm ²)	Especimen 3 (kg/cm ²)	Especimen 4 (kg/cm ²)
0%	222.74	220.20	190.32	219.22
5%	209.76	213.18	212.30	211.98
10%	190.91	189.58	185.19	187.77
15%	120.77	111.43	111.43	113.10
20%	85.19	79.45	92.25	86.03

3.2. Ensayo de tracción indirecta con uso de la celda brasileña

Las pruebas de resistencia a la tracción indirecta se llevaron a cabo utilizando una celda brasileña conforme a la normativa (ASTM C496/C496M, 2017) y una prensa de compresión de cilindros de concreto marca Controls, modelo 50-C43C04. Este método de ensayo se aplicó a los cilindros de concreto después de 28 días de curado, garantizando así que el concreto alcanzara su resistencia máxima de acuerdo con los estándares establecidos.

Para cada prueba, los especímenes cilíndricos fueron colocados en la celda brasileña y sometidos a una carga gradual y continua hasta alcanzar la falla. Se registró la carga máxima aplicada en el momento de la falla, así como la resistencia máxima a la tracción indirecta obtenida para cada espécimen.

Los ensayos de tracción indirecta revelaron variaciones en la resistencia del concreto dependiendo de la cantidad de basalto añadido como sustituto parcial del cemento. La incorporación de hasta un 10% de basalto resultó en una disminución del 12% en la resistencia a la tracción indirecta en comparación con el concreto convencional (ver Tabla 5).

Tabla 5: Parámetros de tracción indirecta de concreto con basalto como sustituto de cemento

Sistema	Especimen 1 (kg/cm ²)	Especimen 2 (kg/cm ²)	Especimen 3 (kg/cm ²)	Especimen 4 (kg/cm ²)
0 %	21.36	20.19	20.15	21.66
5 %	18.99	17.87	18.01	20.09
10 %	18.75	17.56	17.05	18.56
15 %	11.51	13.08	11.11	10.98
20 %	8.44	8.31	7.52	9.24

Para sustituciones del 15% y 20%, se observó una reducción más significativa en la resistencia a la tracción indirecta, indicando un límite crítico en la cantidad de basalto que puede añadirse sin comprometer la integridad estructural del concreto.

El impacto del basalto en la resistencia a la tracción indirecta del concreto puede atribuirse a varios factores. Entre ellos, la alteración de la matriz de cemento, ya que el basalto

no se comporta de la misma manera que el cemento durante la hidratación. Esto afecta la cohesión y la integridad del concreto, sugiriendo que a medida que aumenta la cantidad de basalto, la estructura interna del concreto se ve comprometida, posiblemente debido a una menor cantidad de productos de hidratación que contribuyen a la resistencia mecánica (Vásquez, et al., 2020).

En comparación con el concreto convencional, los especímenes con basalto muestran que, aunque el basalto puede actuar como un sustituto parcial del cemento, su efectividad está limitada por la cantidad utilizada. Los resultados sugieren que hay un umbral crítico en la sustitución de cemento por basalto, más allá del cual la resistencia del concreto disminuye significativamente.

3.3. Micrografías de ruptura de concretos ensayados mecánicamente

En los especímenes elaborados con sustituciones de cemento por basalto en hasta una proporción de 10%, se revelaron la presencia de formaciones alargadas similares a bastones en la ruptura generada después de los ensayos mecánicos. Estas formaciones desaparecieron en los sistemas mayores de 15 % de sustituto de basalto (ver Figura 3).

La presencia de bastones, observados en mezclas con 5% y 10% de basalto, podrían estar relacionadas con una distribución de tensiones más uniforme, lo que podría contribuir a parámetros mayores de resistencia a la compresión y tracción indirecta (Bai, et al., 2022). En contraste, las rupturas en mezclas con 15% y 20% de basalto podrían indicar una mayor fragilidad y, por tanto, una menor resistencia en los parámetros mecánicos estudiados.

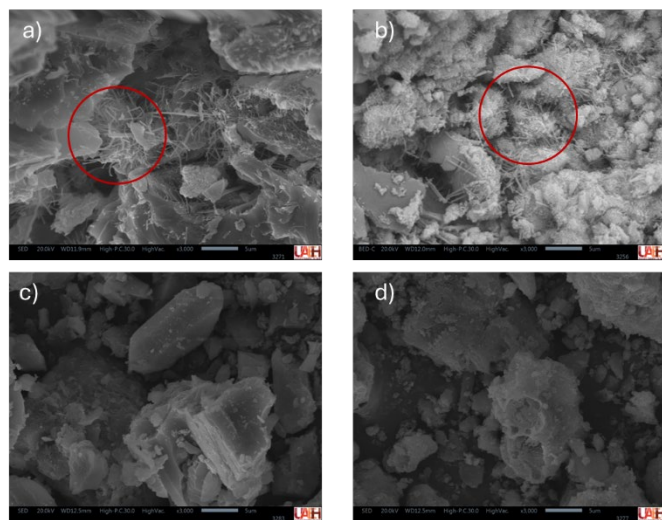


Figura 3: Micrografías de ruptura de concretos después de pruebas mecánicas. a) Ensayo de compresión del sistema 10 % de basalto, b) Ensayo de tracción del sistema 10 %, c) Ensayo de compresión del sistema 15 % de basalto, d) Ensayo de tracción del sistema 15 %, de basalto.

Este comportamiento podría explicarse por la naturaleza del basalto y su interacción con la matriz del concreto. La presencia de basalto en mayores proporciones podría alterar la cohesión y la adhesión entre las partículas de cemento y los agregados, resultando en una microestructura más propensa a la formación de microfisuras bajo carga (Zhang, et al., 2024). Esto sugiere que la estructura interna del concreto se ve

comprometida a medida que aumenta la cantidad de basalto, posiblemente debido a una menor cantidad de productos de hidratación que contribuyen a la resistencia mecánica (Yao, et al., 2024).

Estos resultados subrayan la importancia de considerar cuidadosamente la proporción de basalto utilizado como sustituto del cemento en el diseño de mezclas de concreto. Aunque el basalto puede ofrecer beneficios en términos de costos y sostenibilidad, su impacto en la resistencia a la compresión debe ser cuidadosamente evaluado.

Conclusiones

Los resultados indican que la incorporación de basalto en proporciones de hasta un 10% como sustituto del cemento disminuye la resistencia a la compresión y tracción indirecta en solo un 14% y 12 % respectivamente en comparación con el concreto convencional. Esta reducción es manejable y puede ser aceptable para ciertas aplicaciones estructurales.

Para sustituciones superiores al 15%, se observó una disminución significativa en los parámetros mecánicos. Esto sugiere que hay un límite óptimo para la cantidad de basalto que puede ser utilizado sin comprometer la integridad estructural del concreto.

Se observaron en las micrografías formaciones alargadas similares a bastones en especímenes de concreto con sustituciones de cemento por basalto hasta un 10%, las cuales desaparecieron en sustituciones mayores al 15%. La presencia de estos bastones en mezclas con 5% y 10% de basalto podría estar relacionada con una distribución más uniforme de las tensiones, lo que contribuiría a una mayor resistencia a la compresión y a la tracción indirecta. Por el contrario, las mezclas con 15% y 20% de basalto mostraron una mayor fragilidad, indicando una menor resistencia en los parámetros mecánicos evaluados.

Los resultados indican que la adición de basalto afecta la cohesión y adhesión en la matriz del concreto, particularmente en mayores proporciones. Esta alteración puede llevar a la formación de microfisuras bajo carga, debido a la modificación en la estructura interna y la reducción en los productos de hidratación del cemento. Por lo tanto, aunque el basalto puede ofrecer ventajas en términos de sostenibilidad, su uso debe ser cuidadosamente considerado en aplicaciones estructurales donde la resistencia mecánica es crítica.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a Jorge Martín Borbolla Delgadillo por su generosa provisión de basalto y por permitir el uso de las instalaciones de su mina, fundamentales para la realización de esta investigación. Agradecemos también a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el acceso a sus instalaciones, que fue crucial para el desarrollo de este trabajo. Su apoyo y colaboración fueron invaluable para llevar a cabo este estudio.

Referencias

- Al Shouny, A., Issa, U. H., Miky, Y., & Sharaky, I. A. (2023). Evaluating and selecting the best sustainable concrete mixes based on recycled waste materials. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02382.

- American Concrete Institute. (2002). ACI 211.1-91 Práctica estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo.
- ASTM C 31/C 31M (2001). (a). Cast and laboratory cure two sets of two standard cylinder specimens for each composite sample.
- ASTM C192, A. (2014). Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.
- ASTM C33 / C33M (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ASTM C39/C39M (2018). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, A. (2017). C496/C496M-17 Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. In American Society for Testing and Materials.
- Bai, W., Shen, J., Guan, J., Wang, J., & Yuan, C. (2022). Study on compressive mechanical properties of recycled aggregate concrete with silica fume at different strain rates. *Materials Today Communications*, 31, 103444.
- Bian, X., Mei, C., Wu, L., & Zhao, Z. (2023). Experimental study on synergistic treatment of dredged sludge with cement-waste concrete fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 409, 133903.
- García, A. (2019). Gestión de residuos mineros de basalto: un enfoque integral para la sostenibilidad ambiental. *Revista de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 12(3), 45-56.
- Hernández, J. (2020). Perspectivas de la utilización de residuos mineros en la industria de la construcción. *Revista de Ingeniería Civil y Ambiental*, 35(4), 112-125.
- Ji, H., Tian, Y., Fu, C., & Ye, H. (2024). Transfer learning enables prediction of steel corrosion in concrete under natural environments. *Cement and Concrete Composites*, 105488.
- Khan, M., & McNally, C. (2023). A holistic review on the contribution of civil engineers for driving sustainable concrete construction in the built environment. *Developments in the Built Environment*, 100273.
- Malhotra, V. M. (2002). High-performance high-volume fly ash concrete. *Concrete International*, 24(7), 30-34.
- Martínez, L. (2018). Cementos especiales: propiedades y aplicaciones en México. *Revista de Ingeniería Civil*, 30(2), 78-91.
- NMX-C-159. (2004). Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.
- Noh, H. W., Lee, S., Cho, J. Y., & Kim, D. J. (2024). Investigating dynamic compressive strength of concrete by using high-rate hydraulic universal testing machine. *Construction and Building Materials*, 411, 134402.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, SC. (2003). NMX-C-083-ONNCCE-2002, Industria de la construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto-Método de prueba.
- Ou, Y. C., Joju, J., Lai, B. C., & Wang, J. C. (2023). Development and seismic performance evaluation of New high strength reinforced concrete column and steel beam (New-RCS) joint. *Engineering Structures*, 288, 116186.
- Pérez, A. (2017). Innovaciones en la industria del cemento en México. Editorial Tecnología de Materiales.
- SCFI. (2006). Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario oficial de la Federación.
- Tam, V. W. Y., & Tam, C. M. (2019). Sustainable Construction Using Recycled Materials for Pavements and Structural Concrete Constructions: Current Status and Future Research Prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 28-41.
- Uddin, M. J., Smith, K. J., & Hargis, C. W. (2021). Development of pervious oyster shell habitat (POSH) concrete for reef restoration and living shorelines. *Construction and Building Materials*, 295, 123685.
- Vásquez, R. D., Julca, R. C., & Contreras, J. (2020). Resistencia a la compresión del concreto utilizado en cimentaciones de las edificaciones comunes en la ciudad de Jaén. *Revista Científica Pakamuros*, 8(2).
- Yao, D., Li, J., Xiao, H., Yang, W., & Liu, R. (2024). Research on the surface abrasion resistance performance of basalt fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*, 109125.
- Zhang, K., Wang, C., Zhao, Y., Bi, J., Shen, M., & Deng, X. (2024). Study on the effect of wood admixture on the physical and mechanical properties of corn cob ecological recycled concrete. *Journal of Building Engineering*, 109116.