



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

Título del Trabajo:

“Influencia de los agregados en el módulo elástico del concreto”

Nombre del autor: Jassiel Agustín Islas Santillán

Director: Dr. Luis Daimir López León

Codirectora: Mtra. Valeria Volpi León

Fecha: 27 de febrero de 2026



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

Mineral de la Reforma, Hgo., a 27 de febrero de 2026

Número de control: ICBI-D/326/2026

Asunto: Autorización de impresión.

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

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Jassiel Agustín Islas Santillán**, quien presenta el trabajo de titulación "**Influencia de los agregados en el módulo elástico del concreto**", 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. Francisco Javier Olguín Coca

Secretario: Mtra. Valeria Volpi León

Vocal: Dr. Luis Daimir López León

Suplente: Dr. Iván Erick Castañeda Robles

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

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director de ICBI



GVR/MMM

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
 Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
 México. C.P. 42184
 Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

ÍNDICE

GLOSARIO DE TÉRMINOS:	5
RELACIÓN DE CUADROS, GRAFICAS E ILUSTRACIONES	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN.....	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	12
HIPÓTESIS	13
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVOS	14
OBJETIVO GENERAL.....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
MARCO TEÓRICO.....	15
CAPÍTULO I.....	15
Antecedentes del problema	15
1.1 Módulo elástico	17
1.2 Módulo de elasticidad estático	17
MÉTODO.....	19
CAPÍTULO II.....	20
Agregados pétreos	20
2.1 Importancia de los agregados.....	20
2.2 Clasificación de los agregados	20
2.2.1 Según su origen	20
2.2.2 Por el tamaño de partículas	22

2.3 Propiedades de los agregados	24
2.3.1 Granulometría.....	24
2.3.2 Importancia de la granulometría en el diseño de mezclas.....	24
2.3.3 Granulometría óptima y normativas.....	25
2.4 Análisis de sostenibilidad en la selección de agregados.....	25
2.4.1 Impacto ambiental	26
2.4.2 Sostenibilidad	27
CAPÍTULO III.....	29
Propiedades físicas del concreto.....	29
3.1 Consistencia y trabajabilidad	29
3.2 Revenimiento	29
3.3 Cohesividad	29
3.4 Sangrado	29
3.5 Segregación.....	30
3.6 Contracción.....	30
3.7 Concreto endurecido.....	30
3.8 Propiedades mecánicas.....	31
3.8.1 Resistencia a la compresión (f'_c).....	31
3.8.2 Durabilidad.....	31
3.8.3 Conductividad térmica	32
3.8.4 Permeabilidad.....	32
CAPÍTULO IV	32
El concreto y su relación con el módulo de elasticidad	32
4.1 Microestructura del concreto.....	32
4.2 Zona de transición interfacial (ITZ).....	33

4.3 Módulo de elasticidad y su relación con la ITZ	34
4.4 Influencia de aditivos y materiales suplementarios en la rigidez del concreto ..	36
4.4.1 Efecto de los agregados	36
4.4.2 Influencia de materiales suplementarios.....	36
CAPÍTULO V	40
Determinación del módulo de elasticidad estático.....	40
5.1 Método de ensayo.....	40
5.1.1 Preparación y acondicionamiento de las muestras.....	40
5.1.2 Procedimiento.....	41
5.1.3 Cálculo y expresión de los resultados	43
Registro de las lecturas de deformación	43
5.2 Pruebas de laboratorio.....	45
5.2.1 Equipo utilizado	45
DISCUSIÓN.....	47
Grafica 1- Comparación del módulo elástico global - datos recopilados de pruebas de laboratorio del instituto mexicano del cemento y del concreto.....	49
Grafica 2- Comparación del módulo elástico por tipo de agregado (Basalto) - datos recopilados de pruebas de laboratorio del instituto mexicano del cemento y del concreto.....	50
Grafica 3 – Comparación del módulo elástico por tipo de agregado (Caliza) - datos recopilados de pruebas de laboratorio del instituto mexicano del cemento y del concreto.	51
CONCLUSIONES.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	54
ANEXOS.....	60

GLOSARIO DE TÉRMINOS:

Agregados: Son materiales granulares que en la combinación con cemento y agua se obtiene la fabricación de concreto.

Aglutinante: Sustancia que, al mezclarse permite unir partículas de otros materiales como áridos o pigmentos.

Aglutinamiento: Acto o proceso de unir materiales mediante un aglutinante que, al fraguar y endurecer se forma una masa compacta y cohesiva.

Áridos: Son materiales granulares de origen natural derivados de las rocas o arenas.

Caracterizar: Determinar o definir los rasgos propios o distintivos de algo, de modo que se diferencie claramente de otros.

Carga axial: Es una fuerza que se aplica a lo largo del eje longitudinal de un elemento estructural, alineada con su centro geométrico.

Cohesión: Es la fuerza interna que mantiene unidas las partículas de un material, gracias a la tracción molecular o la presencia de agua como cementante entre partículas.

Comportamiento inelástico: Es el comportamiento de un material o estructura cuando, antes cargas aplicadas, no regresa completamente a su forma original al retirarlas.

Curva esfuerzo-deformación: Es una representación gráfica que muestra cómo responde un material cuando se le aplica una carga gradual.

Deformaciones: Es el cambio en la forma, tamaño o posición de un elemento estructural, provocado por fuerzas externas, cambios de temperatura o movimiento del terreno.

Ductilidad: Es una propiedad mecánica fundamental, se refiere a la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin romperse cuando se le aplica una fuerza.

Equidimensional: Se refiere a objetos o elementos que tienen dimensiones iguales o muy similares en todas las direcciones.

Esfuerzo: La fuerza interna que se genera en un material o elemento estructural cuando se aplica una carga externa.

Exudación: Es el ascenso de una porción de agua contenida en una mezcla de concreto hacia la superficie.

Fraguado: Proceso químico y físico mediante el cual una mezcla de cemento, agua y agregados pasa de un estado plástico a un estado sólido y resistente.

Heterogéneo: Describe materiales o mezclas compuestas por componentes de diferentes naturalezas.

Huella de carbono: Es un indicador ambiental que mide la totalidad de gases de efecto invernadero, emitidos directamente o indirectamente.

Microestructura: Es la organización interna de un material a escala microscópica

Peso volumétrico: Es una propiedad física fundamental que indica la cantidad de masa contenida en un volumen unitario de un material, expresado en kg/m^3 .

Permeabilidad: Es la capacidad de un material para permitir el paso de fluidos, como agua o aire, a través de él.

Relación agua-cemento: Es la proporción del peso del agua respecto al peso del cemento en la mezcla y define la calidad del concreto.

Revenimiento: Es una prueba estándar en la construcción que mide la trabajabilidad y consistencia del concreto fresco, la capacidad de la mezcla para fluir, colocarse y compactarse.

Rigidez: Propiedad mecánica fundamental que describe la capacidad de un material o estructura para resistir deformaciones cuando se le aplica una fuerza.

Solidificación: Proceso mediante el cual el concreto pasa de un estado plástico a un estado sólido y resistente.

Tamiz: Es un dispositivo utilizado para separar partículas sólidas de diferentes tamaños permitiendo el paso de las más pequeñas y reteniendo las más grandes.

Trabajabilidad: Propiedad fundamental que determina la facilidad con la que se puede mezclar, transportar, colocar, compactar y acabar el concreto fresco sin que se produzcan problemas.

RELACIÓN DE CUADROS, GRAFICAS E ILUSTRACIONES

Grafica 1- Comparación del módulo elástico global

Grafica 2 - Comparación del módulo elástico por tipo de agregado, Basalto

Grafica 3 - Comparación del módulo elástico por tipo de agregado, Caliza

RESUMEN

La presente propuesta de investigación aborda la influencia que ejercen los agregados en el módulo elástico del concreto, una propiedad mecánica fundamental para determinar la rigidez y la capacidad del material para deformarse ante cargas estructurales. Dado que los agregados constituyen entre el 60 % y el 80 % del volumen total del concreto, su naturaleza física y mecánica define en gran medida el comportamiento del material en estado endurecido. Sin embargo, en la práctica constructiva, su selección suele realizarse por criterios económicos o de disponibilidad, sin considerar su impacto directo en la deformabilidad del concreto.

El objetivo central del estudio es analizar cómo distintos tipos de agregados, particularmente los utilizados en México principalmente calizos y basálticos, modifican el módulo de elasticidad del concreto. Para ello, se desarrolla una metodología de carácter documental complementada con el análisis de datos experimentales secundarios provenientes de ensayos de laboratorio del IMCYC. Este enfoque permite identificar tendencias reales asociadas con propiedades como la porosidad, granulometría, textura superficial y origen geológico de los agregados.

A través de fundamentos teóricos, marcos normativos y comparaciones estadísticas, se demuestra que los agregados ígneos suelen generar concretos más rígidos que los calizos, debido a su mayor densidad y menor porosidad. Asimismo, se evidencia el papel crítico de la zona de transición interfacial (ITZ) en la transmisión de cargas.

Finalmente, la propuesta busca aportar criterios técnicos que mejoren el diseño de mezclas y la selección de materiales, fortaleciendo la precisión estructural y promoviendo prácticas constructivas más eficientes y sostenibles en el contexto regional mexicano.

ABSTRACT

This research proposal examines the influence of aggregates on the elastic modulus of concrete, a key mechanical property that determines the material's stiffness and its ability to deform under structural loads. Since aggregates make up between 60% and 80% of the total concrete volume, their physical and mechanical characteristics largely define the behavior of hardened concrete. Nevertheless, in common construction practice, aggregate selection is often based on cost, availability, or regional supply, without considering their direct impact on the deformability and rigidity of structural concrete.

The main objective of this study is to analyze how different types of aggregates—particularly those commonly used in Mexico, such as limestone and basalt—affect the elastic modulus of concrete. To achieve this, the research employs a documentary methodology complemented with the analysis of secondary experimental data obtained from IMCYC laboratory tests. This approach makes it possible to identify real performance trends linked to aggregate properties such as porosity, granulometry, surface texture, and geological origin.

The theoretical framework, technical standards, and comparative analysis demonstrate that igneous aggregates tend to produce stiffer concretes than limestone aggregates, mainly due to their higher density and lower porosity. Additionally, the study highlights the critical role of the interfacial transition zone (ITZ) in the transfer of stresses between the cement paste and the aggregate.

Ultimately, the proposal aims to provide technical criteria that improve mix design and material selection, strengthening structural accuracy and promoting more efficient and sustainable construction practices within the Mexican context.

INTRODUCCIÓN

Los agregados representan uno de los insumos más relevantes en la industria de la construcción en México, la correcta selección, caracterización y control de calidad de los agregados es fundamental debido a la gran diversidad geológica del país, que ofrece materiales con propiedades muy distintas según la región. Para garantizar que estos materiales cumplan con los estándares requeridos en obras civiles, se emplean diversas Normas Mexicanas (NMX), entre las cuales destaca la (NMX-C-111, 2018), que establece los métodos de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados mediante la máquina de Los Ángeles. Esta norma es esencial para evaluar la capacidad de los agregados de soportar abrasión y degradación mecánica, asegurando su idoneidad para concretos estructurales.

El concreto es un material compuesto ampliamente utilizado en la industria de la construcción debido a su versatilidad, durabilidad y capacidad de resistir diferentes condiciones ambientales y cargas estructurales. La norma ASTM lo define como una mezcla en la que un medio de enlace cementoso integra partículas o fragmentos de agregados, que pueden ser de origen natural o artificial (ASTM C125, 2021). Los agregados, que constituyen entre el 60% y el 80% del volumen total del concreto, juegan un papel fundamental en sus propiedades mecánicas y físicas, ya que afectan su resistencia, módulo de elasticidad y comportamiento bajo carga (Mehta & Monteiro, 2022).

Entre los agregados finos, se ha encontrado que tanto la forma como la textura de las partículas de arena pueden contribuir significativamente a la mejora de la resistencia del concreto, ya que permiten una mejor interconexión de la matriz cementicia. En el caso de los agregados gruesos, diversos estudios han reportado que concretos preparados con agregados de tamaño promedio de 5 mm presentan mayores resistencias en comparación con aquellos que emplean agregados de 10 mm, manteniendo la misma relación agua/cemento (ACI 318-19, 2019). Esto se debe a que el tamaño y la distribución de los agregados afectan la densidad y la

homogeneidad del concreto, influyendo directamente en su desempeño estructural (Neville, 2020).

La resistencia del concreto está directamente relacionada con sus propiedades mecánicas, las cuales son determinantes para comprender las posibles deformaciones que pueden experimentar los elementos estructurales cuando están sometidos a cargas. Entre estas propiedades, el módulo de elasticidad es una de las más importantes, ya que representa la rigidez del material y su capacidad de deformarse de manera elástica antes de alcanzar su límite de falla (ACI 363R-20, 2020). El módulo de elasticidad del concreto depende de varios factores, incluyendo la resistencia de la pasta de cemento, la calidad y naturaleza de los agregados y la compactación de la mezcla (Domone, 2021).

Los agregados presentan una rigidez generalmente mayor que la pasta de cemento, lo que los convierte en un componente clave para mejorar la capacidad de carga del concreto. Uno de los factores más influyentes en esta propiedad es la porosidad del agregado. A medida que la porosidad del agregado aumenta, su módulo de elasticidad disminuye, afectando la respuesta mecánica del concreto en su conjunto (Gao et al., 2022).

Si bien la variabilidad en la porosidad de los agregados tiene un impacto significativo en el módulo de elasticidad del concreto, su influencia sobre la resistencia a la compresión es menos pronunciada, especialmente en concretos de baja y media resistencia. Sin embargo, en concretos de alta resistencia, la selección adecuada de los agregados se vuelve crucial para garantizar un comportamiento óptimo bajo carga. En este sentido, diversas investigaciones han destacado la importancia de estudiar la relación entre la microestructura de los agregados y la respuesta mecánica del concreto, con el fin de optimizar sus propiedades y mejorar su desempeño en aplicaciones estructurales (Zhang et al., 2023).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción en México y en el mundo, debido a su resistencia, versatilidad y costo relativamente bajo. Una de sus propiedades mecánicas fundamentales es el módulo de elasticidad, el cual representa su capacidad para resistir deformaciones ante cargas y es un parámetro clave en el diseño estructural.

En el contexto mexicano, los valores del módulo elástico suelen estimarse mediante fórmulas empíricas contenidas en normas nacionales o internacionales, como las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-Concrete) y el ACI 318. Estas fórmulas, aunque prácticas, no siempre reflejan con precisión las condiciones particulares del concreto elaborado con materiales locales, especialmente los agregados.

Los agregados, que representan hasta el 75% del volumen del concreto, influyen de forma significativa en su comportamiento mecánico. Propiedades como el tipo de roca, el módulo elástico del agregado, su textura, tamaño máximo y granulometría afectan directamente la rigidez del concreto endurecido. En México, la diversidad geológica del territorio ha dado lugar al uso de agregados muy distintos de una región a otra (calizos, basálticos, graníticos, etc.), cuyas características varían ampliamente.

Ante esta situación, surge la necesidad de investigar cómo influyen los distintos tipos de agregados empleados en México en el módulo elástico del concreto, a fin de obtener datos más representativos y confiables que permitan mejorar el diseño estructural, optimizar mezclas y fomentar el uso adecuado de los recursos regionales.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo describen las normas y la literatura técnica la influencia de los agregados en el módulo de elasticidad del concreto?

¿Qué diferencias se observan en el comportamiento del módulo elástico del concreto cuando se utilizan distintos tipos de agregados comunes en México (como calizos, basálticos o graníticos)?

¿Qué características físicas y mecánicas de los agregados se relacionan con el módulo elástico del concreto?

HIPÓTESIS

El módulo elástico del concreto está significativamente influenciado por las características físicas y mecánicas de los agregados, especialmente el tipo de roca, la densidad y la textura superficial, siendo los agregados basálticos y graníticos los que tienden a generar concretos con mayor rigidez en comparación con los calizos, debido a su mayor resistencia y módulo elástico propio.

JUSTIFICACIÓN

La presente investigación surge de la necesidad de comprender con mayor profundidad cómo las propiedades de los materiales que conforman el concreto, particularmente los agregados, influyen en su comportamiento estructural. Entre las propiedades mecánicas que determinan el desempeño del concreto, el módulo de elasticidad es uno de los parámetros más relevantes, ya que define su rigidez y capacidad para resistir deformaciones bajo carga. A pesar de su importancia, en la práctica profesional la selección de agregados suele basarse principalmente en criterios de disponibilidad, costo o procedencia local, sin considerar su impacto directo en la deformabilidad del concreto endurecido. Esta práctica puede conducir a diseños estructurales imprecisos o conservadores, comprometiendo tanto la eficiencia como la seguridad de las edificaciones.

La investigación se justifica porque contribuye a fortalecer el conocimiento disciplinar respecto a la relación entre las características físicas y mecánicas de los agregados y el módulo elástico del concreto. Al analizar esta influencia, se generan

elementos técnicos que permiten mejorar los criterios de selección de agregados, pasando de decisiones basadas únicamente en resistencia a compresión a decisiones fundamentadas en su efecto sobre la rigidez y el comportamiento elástico del material. Esto resulta especialmente relevante en un país como México, donde la diversidad geológica produce agregados con características muy variadas según la región, lo que se traduce en concretos con comportamientos mecánicos significativamente diferentes.

Asimismo, el estudio beneficia directamente a estudiantes de ingeniería civil, investigadores, diseñadores de mezclas, laboratorios de control de calidad, ingenieros estructuristas y empresas constructoras interesadas en optimizar la confiabilidad y desempeño del concreto. La información obtenida permitirá mejorar la precisión en los cálculos estructurales, optimizar la selección de materiales y promover prácticas constructivas más eficientes y seguras.

La factibilidad del trabajo se sustenta en la existencia de información técnica, normativa y científica suficiente sobre el comportamiento de los agregados, así como en la disponibilidad de datos experimentales secundarios que permiten analizar tendencias reales del módulo de elasticidad en concretos elaborados con diferentes tipos de agregados. Por ello, la investigación es viable, pertinente y valiosa tanto desde el punto de vista académico como profesional, al contribuir al desarrollo de mejores prácticas en el diseño y aplicación del concreto estructural.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Analizar la influencia de distintos tipos de agregados utilizados en México sobre el módulo elástico del concreto, mediante la revisión documental y el procesamiento de resultados experimentales secundarios, con el fin de identificar las mejores resistencias y comparándolas entre sí.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las principales formaciones rocosas de México utilizadas en la industria de la construcción, diferenciando sus características físicas y mecánicas.
- Obtener los valores experimentales de los módulos elásticos de concretos elaborados con diferentes tipos de agregados.
- Analizar la influencia de la distribución geográfica y las propiedades regionales de los agregados en la variabilidad del módulo de elasticidad del concreto

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I

Antecedentes del problema

Las normas de construcción en México se rigen por las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, establecidas en el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (NTC, 2021). Para algunas especificaciones se basan también en las NMX, del ONNCCE, específicamente la NMX-C-128, establece el método para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto sometido a compresión. Describe los requisitos para la preparación de especímenes cilíndricos, el equipo de medición, el procedimiento de carga y los cálculos necesarios para obtener el módulo secante dentro del tramo casi lineal de la curva esfuerzo–deformación.

El módulo de elasticidad es una propiedad fundamental del concreto, ya que influye en su comportamiento ante cargas estructurales, afectando la capacidad portante, las deformaciones y la estabilidad de las edificaciones (Mehta & Monteiro, 2022). Diversos estudios han demostrado que la resistencia y rigidez del concreto dependen en gran medida de la selección de los agregados gruesos y finos, así como de su relación agua/cemento (Domone, 2021).

Para determinar el módulo de elasticidad, es necesario los tipos de concreto que hay de acuerdo a su uso en la construcción. De acuerdo a la NTC para diseño y construcción de estructuras de concreto 2023 estos son los tipos de concreto.

-Concreto clase 1

Este tipo de concreto se considera de resistencia normal, utilizado en fines estructurales y caracterizado por un peso volumétrico en estado fresco superior a 22 kN/m³ (2.2 t/m³). La ecuación para estimar su módulo de elasticidad (E_c) varía según el tipo de agregado grueso:

Para concretos de alta resistencia con agregados grueso calizo

$$E_c = 14000 \sqrt{f'_c} \quad (\text{en kg/cm}^2) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Para concretos de alta resistencia con agregados grueso basáltico

$$E_c = 11000 \sqrt{f'_c} \quad (\text{en kg/cm}^2) \quad (\text{Ecuación 2})$$

-Concreto clase 2

El peso volumétrico en estado fresco de este concreto está entre 19 y 22 kN/m³ (1.9 y 2.2 t/m³). Se emplea en estructuras menores, con claros no mayores de 4 m y una altura máxima de 5 m en dos niveles sobre banqueta. La ecuación para estimar su módulo de elasticidad es:

$$E_c = 8000 \sqrt{f'_c} \quad (\text{en kg/cm}^2) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Según las normativas internacionales, el concreto de alta resistencia se define como aquel con una resistencia a la compresión f'_c mayor o igual a 40 MPa (400 kg/cm²) (ACI 318-19, 2019; Zhang et al., 2023).

Se contempla el uso de las dos clases de concreto, la clase 1 es más denso, más rígido, con menor flujo plástico y menor contracción que el de clase 2. Las clases de concreto se distinguen por su peso volumétrico, el cual es altamente influido por la naturaleza de los agregados, y por el valor del módulo de elasticidad

que se puede alcanzar con ellos y no por el nivel de resistencia a compresión del concreto, siendo más rígidos (mayor módulo de elasticidad) los de clase 1.

La Norma requiere que todas las estructuras se construyan con concreto clase 1, la excepción en el uso de concreto clase 2 es para edificaciones de tamaño pequeño (como viviendas de n más de 120 m² de construcción, en dos niveles y con claros de hasta 4) para que los efectos de mayor deformidad y mayor contracción del concreto no son significativos.

1.1 Módulo elástico

El módulo de elasticidad es una propiedad clave del concreto, ya que determina su rigidez y capacidad para resistir deformaciones bajo cargas mecánicas. En términos físicos, representa la relación entre la tensión aplicada y la deformación unitaria, lo que permite caracterizar su comportamiento elástico (Neville, 2020).

Se ha encontrado que el tipo y la calidad del agregado grueso tienen un impacto significativo en el módulo de elasticidad del concreto. Agregados de origen ígneo, como el basalto y el granito, presentan una mayor rigidez y menor porosidad, lo que mejora la resistencia del concreto. En contraste, agregados calizos y sedimentarios tienen una porosidad más alta, reduciendo el módulo de elasticidad (Gao et al., 2022).

Según investigaciones recientes, concretos con agregados de textura rugosa y forma angular tienen una mejor adherencia con la pasta cementicia, lo que mejora la transmisión de esfuerzos y reduce la deformación bajo carga (Zhang et al., 2023). Esto refuerza la importancia de una adecuada selección y caracterización de los agregados en el diseño de mezclas de concreto estructural.

1.2 Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad estático del concreto se obtiene mediante ensayos de compresión estándar, como el establecido en la norma ASTM C469 (2021). Para su determinación, se emplean especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro y

300 mm de altura, los cuales se someten a cargas axiales crecientes hasta la falla. Durante el ensayo, se registran las deformaciones longitudinales y transversales con dispositivos extensométricos (Helvatjoglu-Antoniades et al., 2022).

Este módulo se mide en laboratorio y se calcula a partir de la pendiente de la región elástica de la curva esfuerzo-deformación. Su importancia radica en que permite predecir el comportamiento del concreto en estructuras reales, siendo un parámetro clave en el diseño estructural (Domone, 2021).

Para su cálculo, se emplea la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A\theta}}{\frac{\Delta L}{L\theta}} = \frac{FL\theta}{A\theta\Delta L} \quad (\text{Ecuación 4})$$

E : módulo de elasticidad o Módulo de Young

$A\theta$: área de la sección transversal original

F : fuerza axial aplicada

L : variación de dimensión longitudinal del objeto

$L\theta$: altura original x

El comportamiento del concreto bajo carga depende de la compatibilidad entre el mortero y los agregados, así como de la microestructura interna del material. Se ha demostrado que la distribución granulométrica, forma y rugosidad de los agregados afectan directamente el módulo de elasticidad y la resistencia final del concreto (Gao et al., 2022).

Además, estudios recientes han evidenciado que la inclusión de agregados reciclados puede modificar el módulo de elasticidad, debido a la mayor porosidad y absorción de agua de estos materiales (Zhang et al., 2023). Por lo tanto, el uso de agregados de alta calidad y baja absorción es fundamental para garantizar un concreto con buena respuesta mecánica y menor deformación bajo carga.

MÉTODO

La presente investigación emplea una metodología de tipo documental y análisis de datos secundarios. Se basa en la recopilación, revisión y análisis de información teórica y técnica proveniente de fuentes bibliográficas especializadas, artículos científicos y normas técnicas vigentes relacionadas con el tema de estudio.

El enfoque de la investigación es cualitativo y descriptivo, ya que busca interpretar, organizar y presentar el conocimiento existente sobre el comportamiento del material estudiado, así como los criterios normativos aplicables.

Además. Se utilizaron datos experimentales secundarios correspondientes a ensayos de módulo de elasticidad previamente realizados por terceros. Aunque no se participó en la ejecución directa de dichas pruebas, se emplearon los resultados finales disponibles para su procesamiento y análisis gráfico. Esto permitiendo complementar la revisión teórica con una representación visual del comportamiento del material evaluado, a fin de enriquecer la comprensión del fenómeno.

La metodología consistió, por tanto, en:

- Recopilar información técnica y normativa actualizada sobre el tema de estudio.
- Analizar y sistematizar los aportes teóricos de diversos autores.
- Procesar datos experimentales disponibles mediante representaciones gráficas, con el fin de observar tendencias y comportamientos relevantes.

CAPÍTULO II

Agregados pétreos

2.1 Importancia de los agregados

Los agregados son materiales esenciales en la fabricación de concretos asfálticos e hidráulicos, ya que proporcionan resistencia, estabilidad y durabilidad a las mezclas utilizadas en la construcción. Se emplean en diversas aplicaciones dentro del sector de la infraestructura y edificación, tales como bases y sub-bases en carreteras, elementos estructurales, pavimentos, cimientos, muros, azoteas, paneles prefabricados, esculturas, rellenos y acabados decorativos (Mehta & Monteiro, 2022). La elección adecuada del tipo de agregado influye directamente en el comportamiento mecánico del concreto, especialmente en su módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y durabilidad (Neville, 2020).

2.2 Clasificación de los agregados

2.2.1 Según su origen

Una de las razones principales para establecer diferencia entre los agregados, debe de ser el distinto origen de las rocas de las cuales provienen. La definición del origen y la composición de las rocas es un asunto útil y necesario, porque permite inferir ciertos aspectos relacionados con el comportamiento físico y químico de las mismas al ser utilizadas como agregados en el concreto.

Por su génesis geológica, las rocas se dividen en ígneas, sedimentarias y metamórficas, las que a su vez se subdividen y clasifican en diversos tipos de acuerdo con sus características de textura y mineralógicas (Gómez, 2009).

a) Rocas Ígneas

Las rocas ígneas se forman por la solidificación del magma, ya sea en el interior de la corteza terrestre (rocas intrusivas, como el granito), o en la superficie durante erupciones volcánicas (rocas extrusivas, como el basalto). Estas rocas presentan una alta densidad, baja porosidad y excelente resistencia, lo que las

convierte en una opción adecuada para agregados en concretos de alto desempeño. Su uso incrementa el módulo de elasticidad y reduce la deformación bajo carga (Alanazi, 2021., 2024).

b) Rocas Sedimentarias

Las rocas ígneas se forman por la solidificación del magma, ya sea en el interior de la corteza terrestre (rocas intrusivas, como el granito), o en la superficie durante erupciones volcánicas (rocas extrusivas, como el basalto). Estas rocas presentan una alta densidad, baja porosidad y excelente resistencia, lo que las convierte en una opción adecuada para agregados en concretos de alto desempeño. Su uso incrementa el módulo de elasticidad y reduce la deformación bajo carga (Alanazi, 2021; Zhang et al., 2024).

c) Rocas Metamórficas

Las rocas metamórficas se originan de la transformación de rocas ígneas o sedimentarias bajo altas presiones y temperaturas. Frecuentemente tienen estructura foliada o laminar, lo que reduce su compacidad cuando son utilizadas como agregados. Esta foliación tiende a disminuir la trabajabilidad del concreto, aumentando la demanda de agua y aditivos químicos para lograr la mezcla adecuada (Gómez, 2009; Zhang et al., 2024).

d) Agregados artificiales y reciclados

Además de los agregados naturales, se han desarrollado tecnologías para producir agregados artificiales y reciclados, con el fin de mejorar la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental en la industria de la construcción.

1. Perlita y vermiculita: productos de expansión térmica de espumas volcánicas, utilizados en concretos ligeros gracias a su baja densidad y alta capacidad de aislamiento térmico (Sata et al., 2022).

2. Agregados sintéticos: fabricados con arcilla expandida, escorias de alto horno o residuos cerámicos, mejoran la resistencia y reducen el peso del concreto (Zhang et al., 2024).

3. Subproductos industriales reutilizados como agregados, entre ellos:

- Escoria de alto horno, que mejora la resistencia a sulfatos en concretos expuestos a ambientes agresivos.
- Arena sílica residual del moldeo de motores, utilizada en morteros y concretos especiales.
- Cenizas volantes y cenizas de carbón, empleadas en la fabricación de agregados sintéticos y como reemplazo parcial del cemento en mezclas sostenibles (Gao et al., 2022).

Estos materiales, ya sean naturales o artificiales, son fundamentales en la composición del concreto, ya que constituyen entre un 60% y 80% del volumen total del material y son esenciales en más del 95% de las mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos (Zhang et al., 2023).

2.2.2 Por el tamaño de partículas

La clasificación de los agregados por tamaño responde a criterios normativos y funcionales, los cuales dividen las partículas en dos fracciones principales: agregado grueso y agregado fino, utilizando como frontera nominal el tamiz No. 4 (4.75 mm) (Gómez, 2009; Zhang et al., 2024). Esta distinción es crucial en el diseño de mezclas, ya que cada tipo de agregado cumple funciones específicas en la estructura del concreto, afectando su trabajabilidad, compacidad y comportamiento mecánico (Alanazi, 2021).

Es recomendable que ambas fracciones presenten una distribución continua de tamaños de partícula, adaptada a las condiciones técnicas, económicas y prácticas del proyecto. La gradación granulométrica influye significativamente en la

trabajabilidad y cohesión de la mezcla, así como en la cantidad de pasta cementante requerida (Jagadesh et al., 2024).

a) Agregado grueso

El agregado grueso, comúnmente conocido como grava, está compuesto por partículas de roca natural o triturada, cuyo tamaño es superior a 4.75 mm. Estas partículas deben provenir de fuentes verificadas y sometidas a ensayos de calidad en laboratorio, según lo estipulado por normas internacionales como ASTM C33 (2021).

Las partículas deben ser, preferentemente, equidimensionales, y estar libres de formas laminares o alargadas, ya que estas afectan negativamente la resistencia del concreto y su capacidad de compactación (Sata et al., 2022). La presencia de una curva granulométrica continua en el agregado grueso permite mejorar la fluidez y reducir el contenido de vacíos, contribuyendo a una mejor estabilidad dimensional del concreto endurecido (Zhang et al., 2024).

b) Agregado fino

El agregado fino, o arena, se compone de partículas menores a 4.75 mm, y puede proceder de depósitos naturales (como arenas aluviales), o ser producto de trituración de rocas sanas. Las partículas deben tener una forma cúbica o esférica, evitando geometrías planas o alargadas que afectan la fluidez y la uniformidad de la mezcla (Jamil et al., 2025).

Una arena bien gradada mejora la cohesión y reduce la segregación de la mezcla, mientras que la presencia de materiales finos perjudiciales (como arcillas, sales solubles, materia orgánica o micas) debe ser controlada para evitar reacciones deletéreas o problemas de durabilidad (Alanazi, 2021).[19]. En particular, las arenas con alto contenido de material fino (<75 μm) pueden afectar la hidratación y la adherencia en la zona de transición interfacial del concreto (Jagadesh et al., 2024).

2.3 Propiedades de los agregados

2.3.1 Granulometría

La granulometría de los agregados se define como la distribución de tamaños de partículas dentro de un material granular, expresada en términos de porcentaje retenido o que pasa a través de una serie de tamices normalizados (ASTM C136, 2021). Este análisis permite clasificar los agregados según su tamaño y evaluar su influencia en la trabajabilidad, resistencia y durabilidad del concreto (Mehta & Monteiro, 2022).

La granulometría está estrechamente relacionada con la compactación y distribución de vacíos dentro de la mezcla de concreto. Una granulometría inadecuada puede generar huecos excesivos, lo que reduce la resistencia y durabilidad del material, aumentando la demanda de cemento y agua para alcanzar la trabajabilidad deseada (Neville, 2020). Un mal diseño granulométrico no solo afecta el comportamiento mecánico del concreto, sino que también incrementa los costos de producción, ya que se requiere mayor cantidad de aglutinante y aditivos para compensar la deficiencia en la interconexión de partículas.

2.3.2 Importancia de la granulometría en el diseño de mezclas

- a) Optimización del empaquetamiento de partículas: Una granulometría bien equilibrada reduce la cantidad de espacios vacíos entre partículas, mejorando la compactación y reduciendo la demanda de pasta cementicia.
- b) Mejora de la trabajabilidad: La combinación de agregados finos y gruesos en proporciones adecuadas facilita el mezclado y colocación del concreto, reduciendo la segregación y exudación (ACI 211.1, 2021).
- c) Reducción de costos: Un agregado bien graduado disminuye la cantidad de cemento requerida para alcanzar una determinada resistencia, optimizando la eficiencia económica de la mezcla.
- d) Incremento de la resistencia mecánica: La correcta distribución granulométrica permite una transferencia eficiente de cargas entre partículas,

umentando la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto (Zhang et al., 2023).

2.3.3 Granulometría óptima y normativas

Para garantizar una granulometría adecuada, se emplean tamices estandarizados que permiten clasificar los agregados según su tamaño. Las principales normativas utilizadas en la industria incluyen:

- ASTM C136/C136M (2025): Método estándar para el análisis de tamices de agregados finos y gruesos.
- ASTM C33 (2021): Especificaciones estándar para agregados utilizados en concreto.
- NTC-405 (2021): Normas Técnicas Complementarias de Construcción en México, estableciendo límites granulométricos específicos.
- ACI 211.1 (2021): Guía para la selección de proporciones de mezcla en concretos estructurales

En términos generales, la granulometría de los agregados debe ajustarse a una curva de gradación continua, evitando el predominio de partículas de un solo tamaño, ya que esto puede afectar la densidad y resistencia del concreto.

2.4 Análisis de sostenibilidad en la selección de agregados

La sostenibilidad en la construcción moderna implica tomar decisiones que reduzcan el impacto ambiental, optimicen los recursos naturales y promuevan el bienestar social y económico a lo largo del ciclo de vida de una obra. La selección de agregados, como principal componente volumétrico del concreto, juega un papel fundamental en esta visión sostenible. Evaluar adecuadamente su origen, proceso de extracción, transporte y reciclabilidad permite reducir significativamente la huella ecológica del sector construcción. (Aabib et al., 2023).

2.4.1 Impacto ambiental

El impacto ambiental se define como cualquier cambio en el entorno físico, químico o biológico causado directa o indirectamente por la actividad humana, que modifica las condiciones naturales del medio ambiente (Menegatti et al., 2022). En el contexto de la industria de agregados, este impacto se asocia principalmente a las prácticas extractivas, al consumo energético y a las emisiones asociadas al transporte y procesamiento.

Una herramienta clave en la prevención de daños ecológicos es la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), la cual consiste en el análisis previo y sistemático de las consecuencias ambientales derivadas de un proyecto o actividad. Esta evaluación permite anticipar efectos adversos y proponer medidas de mitigación, considerando variables ecológicas, sociales y económicas (Ozcan et al., 2013).

Las actividades mineras y de explotación de canteras, necesarias para obtener agregados naturales, conlleva una serie de efectos negativos como la destrucción de la cobertura vegetal, alteración del paisaje, erosión del suelo, pérdida de biodiversidad y contaminación por partículas y residuos sólidos. En el caso de la minería a cielo abierto, los impactos son particularmente intensos debido a la remoción masiva del terreno superficial. Por su parte, la minería subterránea genera afectaciones estructurales en el subsuelo y puede alterar los acuíferos locales (Rakhmangulov et al., 2021).

Adicionalmente, el transporte de los agregados hasta los sitios de obra representa una fuente importante de emisiones de CO₂, especialmente cuando las distancias son grandes o no se optimizan las rutas logísticas. La elección de agregados locales o reciclados puede reducir significativamente estos impactos (Fernández, 2010).

2.4.2 Sostenibilidad

La sostenibilidad en la construcción se refiere a la integración de prácticas que minimicen los impactos ambientales, optimicen el uso de recursos naturales y generen beneficios económicos y sociales durante todo el ciclo de vida de un proyecto. Esto abarca desde la planificación, diseño y ejecución, hasta su operación y eventual demolición o reutilización (Victor H. Salas, 2019).

Una construcción sostenible no solo busca el uso eficiente de materiales como el concreto, sino también maximizar la durabilidad, reducir el consumo energético, mitigar emisiones de carbono y promover el bienestar social. Entre las estrategias clave se encuentra la selección consciente de materiales como los agregados, considerando su origen, proceso de producción, transporte y posibilidades de reciclaje. Diagrama de los pilares de la sostenibilidad.



Una alternativa es usar agregados reciclados, para esto un agregado reciclado se define como el agregado resultante del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción, esta deriva de un solo tipo de material primario, el concreto, cuya composición es heterogénea (cemento, agua, agregados, aditivos y adiciones).

Los procesos de producción de agregados de concreto reciclado se realizan en plantas de tratamiento (fijas o móviles) que, en líneas generales, son similares a las empleadas en agregados naturales, si bien incorporan de forma específica elementos para la separación de impurezas y otros contaminantes. Para la eliminación de impurezas, durante la demolición debe evitarse que los escombros de concreto se mezclen con tierras y conseguir que se reduzca al máximo el contenido de otros materiales de construcción no deseables, las impurezas y los contaminantes pueden ser metales, madera, plásticos, yeso, que deben de ser eliminados, lo cual puede lograrse utilizando distintas técnicas según sea la naturaleza de los mismos. (Victor H. Salas, 2019).

Se deben seleccionar proveedores que cumplan con las normativas ambientales y laborales (ISO 14001 O LEED), pues al realizar los análisis ambientales, económicos y sociales, de todos los análisis se obtienen beneficios como la reducción de impactos ambientales en la obtención de los materiales como en su transportación que tanto ayudar a reducir la huella de carbono disminuye el costo de transportación, se mejoran las aceptaciones sociales del proyecto, se optimizan costos en los proyectos a largo plazo y se cumplen requisitos para facilitar una certificación de sostenibilidad.

Se demuestra que a partir de procesos convencionales se pueden aprovechar los recursos y los desechos, en este caso generando otra alternativa de obtención de agregados.

CAPÍTULO III

Propiedades físicas del concreto

3.1 Consistencia y trabajabilidad

La consistencia mide la fluidez de la mezcla, comúnmente evaluada por el ensayo de revenimiento. La trabajabilidad, por su parte, considera la facilidad con que el concreto puede colocarse y compactarse sin segregarse. Esta depende de la forma y textura de los agregados, la cantidad de finos y el uso de aditivos (Castano & Abdel-Mohti, 2024).

3.2 Revenimiento

El revenimiento es directamente proporcional al contenido de agua, pero aumentarlo en exceso reduce la resistencia y la durabilidad. Por ejemplo, un incremento del 3% en el agua puede aumentar el revenimiento en 2.5 cm. Además, factores como la temperatura ambiente afectan su valor (Shoaib et al., 2022).

3.3 Cohesividad

La cohesividad determina si la mezcla se mantiene unida. Una mezcla cohesiva evita la segregación, y puede lograrse con buen contenido de finos, adecuada relación agua-cemento y uso de aireantes o aditivos plásticos (Sevim et al., 2023).

3.4 Sangrado

El sangrado es el ascenso del agua libre en la superficie del concreto, visible en losas. Esto puede ocasionar debilidad superficial, fallas de adherencia y mayor porosidad. Está influido por la granulometría del agregado fino y la relación agua-cemento (Jamellodin et al., 2022).

3.5 Segregación

El concreto es una mezcla heterogénea de diversos materiales con propiedades muy diferentes cada uno de ellos. La segregación ocurre por separación de componentes, afectando la homogeneidad. Se manifiesta por acumulación de agregado grueso o mortero en zonas distintas. Puede prevenirse con mezclas adecuadamente proporcionadas y compactadas (Li et al., 2020).

3.6 Contracción

La contracción puede ser plástica o por secado. Ambas son resultado de la pérdida de agua y pueden causar grietas si no se controlan. Factores como la relación agua-cemento, los agregados y el curado son determinantes (Shoib et al., 2022).

Se mencionan los otros factores a considerar que influyen en la magnitud de la contracción:

- Volumen total de agua en el concreto
- Relación agua-cemento
- Condición de la subrasante y de los moldes
- Características de los agregados
- Granulometría de los agregados
- Composición del cemento
- Tamaño y forma del elemento constructivo
- Presencia o ausencia de aditivos
- Métodos utilizados en el manejo y colado del concreto

3.7 Concreto endurecido

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su

mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas. Entre menos porosa se haya la pasta del cemento, mucho más resistente es el concreto.

El concreto no endurece ni se cura con el secado, el concreto requiere de humedad para hidratarse y endurecer. Al secarse el concreto, deja de ganar resistencia; el hecho que esté seco, no es indicación que haya experimentado la suficiente hidratación para lograr las propiedades físicas deseadas (Márquez et al 2012).

3.8 Propiedades mecánicas

3.8.1 Resistencia a la compresión ($f'c$)

La resistencia del concreto a compresión es una propiedad física fundamental y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseño de puentes, edificios y otras estructuras. El concreto de uso más generalizado tiene una resistencia a la resistencia a la compresión entre 210 kg/cm^2 y 350 kg/cm^2 . Un concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de cuando menos 420 kg/cm^2 . Resistencias de 1400 kg/cm^2 se han llegado a utilizar en aplicaciones de construcción.

Los principales factores que afectan a la resistencia son la relación agua - cemento y a la edad o el agregado que haya progresado la hidratación. Para una trabajabilidad y una cantidad de cemento dado, el concreto con aire incluido necesita menos agua de mezclado que el concreto sin aire incluido. La menor relación agua - cemento que es posible lograr en un concreto con aire incluido tiende a compensar las resistencias mínimas inferiores del concreto, particularmente en mezclas con contenidos de cementos pobres e intermedios (Márquez, 2012).

3.8.2 Durabilidad

La durabilidad representa la capacidad del concreto para soportar agresiones físicas, químicas y biológicas a lo largo del tiempo. La baja permeabilidad y adecuada densificación son claves para extender su vida útil (Shoaib et al., 2022).

3.8.3 Conductividad térmica

La durabilidad representa la capacidad del concreto para soportar agresiones físicas, químicas y biológicas a lo largo del tiempo. La baja permeabilidad y adecuada densificación son claves para extender su vida útil (Shoaib et al., 2022).

3.8.4 Permeabilidad

Esta propiedad del concreto hidráulico consiste en dejar o no dejar pasar el agua que se encuentra en la parte de la superficie. De ahí que de acuerdo a la calidad de este material debe ser de baja permeabilidad y este se puede lograr mediante la optimización de la relación grava - arena, agua - cemento y aditivos, para evitar la formación de poros de aire, micro poros y poros capilares.

CAPÍTULO IV

El concreto y su relación con el módulo de elasticidad

4.1 Microestructura del concreto

El concreto es un material más ampliamente utilizado en la construcción. Tiene una estructura heterogénea y compleja.

Para entender y controlar las propiedades del concreto se debe profundizar en el estudio de su estructura, estando constituida por el tipo, cantidad, tamaño, forma y distribución de sus componentes. En relación a éstas, se considera que la estructura del concreto está integrada por tres fases (Anna Sidorova, 2013).

- **Matriz de cemento hidratado:** Compuesta por una fase sólida, poros y/o fisuras y agua. La fase sólida contiene de modo general silicato cálcico hidratado, portlandita, sulfoaluminatos cálcicos y granos de cemento sin hidratar.

-
- **Áridos:** Componente más homogéneo, excepto si es árido reciclado de los materiales base cemento. Ocupan la mayor parte del volumen de estos materiales (entre el 60% y el 80%).
 - **Zona Transición Interfacial:** Matriz de cemento hidratada que se halla en las zonas superficiales de los áridos. Abarca entre 50 y 100 μm desde la superficie del árido (para un sistema con árido natural). Es una fase que condiciona un alto número de propiedades de estos materiales (durabilidad, resistencia).

4.2 Zona de transición interfacial (ITZ)

Generalmente, el concreto es un sistema de dos fases: la matriz y los áridos. La composición y la microestructura de la matriz varían entre la superficie del árido y la pasta de cemento. La heterogeneidad es mayor alrededor de los áridos y disminuye con la distancia, esta fase se conoce como la zona de transición y es la tercera fase, que existe en el concreto (Anna Sidorova, 2013).

La manera en que se forman es cuando el agua se mezcla con cemento y áridos, se forma una lámina delgada directamente en la superficie de los áridos. Esta lámina se caracteriza por una película doble, consistente en el hidróxido de calcio CH y es una capa delgada de fibras cortas de gel de C-S-H en una serie paralela abierta en su superficie que está enfrente de la pasta. Al lado de la película doble existe una capa de contacto principalmente cristales CH, con sus cristales hexagonales perpendiculares a la superficie de áridos. Esta capa de contacto es una capa intermedia entre la película doble y la pasta de cemento. Esta capa de contacto se desarrolla en un día o dos después de la mezcla (Anna Sidorova., 2013).

Las características y propiedades de la zona de transición tienen gran influencia en una parte de las propiedades del concreto, especialmente la resistencia, la rigidez y la durabilidad.

La ITZ es una zona de transición no radicalmente diferente al resto de la pasta de cemento y su ancho depende de las características microestructurales y

del grado de reacción. Su caracterización cuantitativa entre árido y pasta de cemento en el concreto, confirma que la apariencia de esta zona ocurre debido a la agrupación de granos de cemento junto con las partículas de áridos más grandes. Esta agrupación inicial lleva a una zona más porosa de aproximadamente 15 a 20 μm de ancho. A causa del efecto de agrupación de partículas, el agua suplementaria se incorpora en el ITZ y la relación a/c al lado ITZ se reduce aproximadamente a 0.05.(Anna Sidorova., 2013).

En sus trabajos Scrivner y Gartner, Bentur y Pratt (1988) hicieron varios estudios sobre la porosidad que se forma en la ITZ (cantidad de poros vs distancia de árido en la ITZ)), que muestran que la cantidad de poros en la pasta de cemento fuera de ITZ está entre 5-10%. y se aumenta progresivamente en la ITZ hasta un 30% y que mayoría de los poros en la ITZ se forman a la distancia de 0 - 5 μm del árido.

Diamond (2001), señala que la cantidad de poros en la pasta de cemento fuera de ITZ está entre 6-9%, y no se aumenta progresivamente en la ITZ; la cantidad de poros en la ITZ es del 13% (para muestras de 3 días de hidratación) y 10% (para muestras de 100 días de hidratación) y que la mayoría de los poros en la ITZ se forman a la distancia de 0-10 μm del árido.

Ollievier (1995), señala que la porosidad en la ITZ permanece intacta en todas las edades de la hidratación.

4.3 Módulo de elasticidad y su relación con la ITZ

Hoy en día, se encuentran evidencias suficientes como para poder afirmar que el tipo árido influye sobre las propiedades mecánicas del concreto y su durabilidad. A parte de sus propiedades físico-mecánicas particulares, cada tipo de árido interacciona en un modo diferente con la matriz de cemento, pudiendo llegar a ser estas diferencias relevantes en función de la magnitud de la interacción.

Consecuentemente, la respuesta diferencial entre los áridos y la pasta de cemento ante una carga aplicada, conduce a un comportamiento inelástico de estos

materiales y a que las curvas tensión-deformación sean no lineales. Esta no-linealidad no sólo es debida a la naturaleza compuesta del concreto, sino que también se debe a la naturaleza de la interacción árido-pasta de cemento en su interfase y las partículas características de la ITZ (Alberto D. Quiñones, 2013).

A pesar de la clara diferencia entre la ITZ y la matriz de cemento, es bastante difícil cuantificar de una manera precisa sus consecuencias (Scrivener y cols, 2004). En primer lugar, porque la ITZ, no es una zona discreta sino una región con gradientes de concentración que abarcan desde la superficie del árido hasta la matriz de cemento. Y en segundo, la preparación de muestras modelo, caso de las muestras compuestas, en las que se pueden obtener las propiedades de la zona interfacial de forma individual tienden a originar zonas interfaciales diferentes de las que se encuentran en las muestras reales. (Alberto D. Quiñones, 2013).

El estudio que realizaron (Aïtcin y col., 1990), sobre la influencia de las características mineralógicas y superficiales de los áridos gruesos sobre las propiedades mecánicas de los concretos de altas resistencias Y encontraron que tanto el módulo de elasticidad como la resistencia mecánica a compresión estaban significativamente influenciados por estas características de los áridos. Con el árido silíceo redondeado y el granito de machaqueo, que contenía cierta cantidad de partículas blandas, se obtuvieron los menores valores.

En resumen, el módulo elástico del concreto se ve afectado por la existencia de la zona interfacial árido-pasta de cemento. Se puede afirmar, por tanto, que cuanto mayor sea el módulo elástico de la ITZ y mejor la transmisión de carga desde la pasta al árido a través de su interfase, menos perjudicado se verá el concreto. No obstante, esta asunción no es tan directa, pues como es sabido, en ocasiones, la falta de calidad de la ITZ por una acumulación excesiva de agua de amasado, se traduce en una reducción de la relación agua-cemento de la matriz de cemento, mejorando las propiedades mecánicas de ésta. No obstante, la tendencia general para poder fabricar concreto de alta resistencia es la de mejorar las propiedades de la ITZ y la reducción de su espesor. (Alberto D. Quiñones, 2013).

4.4 Influencia de aditivos y materiales suplementarios en la rigidez del concreto

La rigidez del concreto, representada por su módulo elástico, se ve fuertemente influida por aditivos químicos y materiales cementantes suplementarios porque estos modifican la hidratación del cemento, la densidad de la pasta y la porosidad interna. Aditivos como superplastificantes, acelerantes o inclusores de aire pueden aumentar o reducir la deformabilidad del material según su efecto sobre la microestructura. Del mismo modo, materiales suplementarios como ceniza volante, escoria o humo de sílice alteran la cantidad y calidad del gel C-S-H, generando pastas más densas o más flexibles. Este análisis se relaciona con el efecto de los agregados porque la rigidez final depende de la interacción pasta-agregado, y también con la influencia propia de los materiales suplementarios como componentes clave en el desarrollo del módulo elástico.

4.4.1 Efecto de los agregados

Los agregados constituyen aproximadamente el 75% del volumen del concreto y desempeñan un papel crucial en sus propiedades mecánicas, la naturaleza de los agregados, como su densidad, porosidad forma y tamaño, afecta directamente al módulo de elasticidad del concreto.

El efecto del agregado grueso sobre la resistencia del concreto depende de su cantidad, su rango de tamaños (diferencia entre el tamaño máximo y el tamaño mínimo) y su origen desde el punto de vista de producción, diferenciando entre el agregado triturado y de canto rodado, así como la relación agua cementante empleada en la mezcla de concreto (Maruyama et al., 2001).

4.4.2 Influencia de materiales suplementarios

Existen otros tipos de materiales que se pueden incorporar al concreto para mejorar su trabajabilidad, reducir la relación agua-cemento, mejorar la densidad, la resistencia a la tracción y la durabilidad. Estos materiales suplementarios son conocidos como aditivos plastificantes, fibras y humo sílice.

a) Aditivos plastificantes

Los aditivos plastificantes son compuestos químicos que logran optimizar los diseños de concreto disminuyendo las necesidades de agua y cemento para alcanzar las propiedades exigidas por la construcción. (Jaime A. Quiñones, 2022).

El uso de aditivos se hace más fácil la compactación del concreto para un volumen de fibras dado, y permite igualmente aumentar el volumen de fibras manteniendo constante la docilidad; sin embargo, su uso no permite sobrepasar el volumen máximo de fibras que puede admitir un determinado concreto, debido a que el aditivo reductor de agua no evita la segregación del concreto ni el efecto adverso de formación de bolas de pasta de cemento-fibra. (Martínez P., D.,2008).

El efecto de los aditivos reductores de agua sobre las resistencias del concreto (compresión, tensión y flexión), se basa en el concepto de la Ley de Abrams, según la cual la resistencia a la compresión del concreto es inversamente proporcional a la relación agua-cemento del mismo. (Asocreto, 1997).

La adición del aditivo reductor de agua en la mezcla de concreto, dispersa las partículas de cemento, mediante la reducción de la atracción entre ellas evitando su aglutinamiento, con lo cual se logra una mejor fluidez de la pasta, y esto permite reducir la cantidad de agua necesaria para una determinada manejabilidad; entonces, una de las consecuencias del menor consumo de agua, es una mayor resistencia mecánica. (Asocreto, 1997). Los aditivos reductores de agua, han sido clasificados como plastificantes (tipos A, D y E) y superplastificantes (tipos F y G).

b) Fibra en el concreto

Las fibras actúan como elementos de puenteo en el concreto agrietado, permitiendo que el material siga soportando carga incluso después de la formación de grietas (Pujadas, 2008). La longitud y la relación de aspecto de la fibra tienen una acción diferenciada: las fibras largas controlan grietas mayores (macrofisuras), mientras que las cortas son más efectivas con microfisuras (Pujadas, 2008).

Aunque las fibras ofrecen ganancias modestísimas en resistencia a compresión —del orden del 20 %–30 %— su aporte más valioso está en la ductilidad post-agrietamiento y en la absorción de energía, lo que mejora significativamente el comportamiento estructural ante cargas extremas (Van Chanh, 2005). Estudios recientes corroboran que, si bien la fuerza a compresión no se incrementa de forma sustancial, la inclusión de fibras mejora notablemente la capacidad de absorción de energía y la integridad tras el agrietamiento (Mostafaei et al., 2025).

Respecto a la resistencia a tracción, las fibras alineadas en la dirección de la carga pueden incrementar los valores de resistencia hasta en un 150 %, mientras que las distribuidas aleatoriamente aún ofrecen mejoras considerables—alrededor del 60 %—en comparación con concretos sin fibras (Van Chanh, 2005). Resultados similares se observan también en tracción indirecta (quiebre por flexión) (Mostafaei et al., 2025).

Los tipos de fibra (acero, polipropileno, basalto, PVA, etc.) difieren en términos de acción mecánica: fibra de acero (ST) aporta mayor resistencia a compresión, mientras que las sintéticas (SYN) mejoran la ductilidad y trabajabilidad (toleran mejor volumen sin afectar la consistencia de la mezcla) (Wafa 1990; Miao 2003). Las fibras sintéticas también son eficaces para controlar microfisuras generadas por contracción y plasticidad, apoyando la prevención de grietas tempranas.

Otra métrica clave es el volumen óptimo de fibra. Exceder este límite reduce el efecto beneficioso, especialmente para la compresión. La relación agua-cemento también influye, pero el parámetro crítico sigue siendo la relación de aspecto y geometría de la fibra —curvatura, anclajes, rugosidad—, que facilitan una mejor adherencia y absorción de energía luego del primer agrietamiento. Se ha demostrado que fibras con anclajes (como ganchos) optimizan la resistencia y tenacidad (Luis O. Gonzáles, 2013).

c) Humo de Sílice

El humo de sílice (puzolana) es un subproducto de la fabricación del silicio metálico y sus aleaciones. Se forma a partir de la reducción de cuarzo por carbón en hornos de arco eléctrico. Este material que se condensa en partículas microscópicas (con tamaño promedio de 0.15 micras) fue recuperado originalmente por razones de proyección del medio ambiente, sólo después se encontró el gran potencial de este material para la industria del concreto, siendo su eficiencia muy superior a la de otras puzolanas. (Abimael L. Guzmán, 1999).

Las puzolanas según su origen, se diferencian entre puzolanas naturales y artificiales.

En el concreto como una adición al cemento, actúa de dos formas principales:

- Como filler, (ajustador), consigue una gran capacidad de adherencia entre los materiales y por consiguiente se obtienen mayores resistencias mecánicas.
- Como puzolana, combinándose con la cal libre (como subproducto de hidratación del cemento) formando así silicatos hidratados muy similares a los producidos por el cemento Portland, por lo que disminuye la porosidad y aumentan sus resistencias físicas y químicas.

El efecto de humo de sílice sobre el concreto fresco, se presenta un incremento en la demanda de agua para mantener la misma trabajabilidad, como requiere mayor agua es necesario usar aditivos superplastificantes. Añadiendo humo de sílice al cemento del concreto fresco es mucho más cohesivo, menos propenso a la segregación y no presenta sangrado. La trabajabilidad del concreto es superior a la de un concreto normal, si se combina adecuadamente el humo de sílice con superplastificantes. (Abimael L. Guzmán, 1999).

El efecto que genera sobre el concreto endurecido, es que, agregando humo de sílice hasta un 10% del peso del cemento, combinado con un superplastificante

es un rango del 1.0 - 2.0% del mismo, se pueden fabricar concretos de altas resistencias.

Los concretos con humo de sílice tienen: mayor resistencia a la compresión y tensión, menor porosidad y permeabilidad, mayor resistencia a la corrosión, mayor resistencia química, mejor durabilidad y resistencia al desgaste. (Abimael L. Guzmán, 1999).

CAPÍTULO V

Determinación del módulo de elasticidad estático

La determinación del módulo de elasticidad estático consiste en medir la rigidez del concreto a partir de la relación entre esfuerzo y deformación cuando una probeta cilíndrica es sometida a compresión controlada, lo que permite conocer cuánto se deformará un elemento estructural bajo cargas de servicio. Esta propiedad influye en el diseño de vigas, columnas, losas y pavimentos, al definir su capacidad para resistir deflexiones, asentamientos y vibraciones.

5.1 Método de ensayo

La relación de poisson es el parámetro que relaciona las deformaciones unitarias transversal y longitudinal al estar sometido el concreto a esfuerzo de compresión axial dentro del comportamiento elástico (NMX-C-128-ONNCCE, 2020). Se determina como la relación entre la deformación unitaria transversal y longitudinal, en un ensayo de carga axial en compresión del concreto dentro del intervalo 0 - 40% de la resistencia máxima esperada.

5.1.1 Preparación y acondicionamiento de las muestras

Se establece que son requeridos 4 especímenes, donde dos se ensayan a compresión con el objeto de conocer el esfuerzo máximo del concreto y los dos restantes se determina el módulo de elasticidad estático, el no disponer de dos especímenes para determinar la resistencia a compresión se requiere extraer al

menos un corazón para estimar la resistencia y con ella calcular el 60% de dicha resistencia para el ensayo de módulo. Para el cálculo final del módulo se debe tomar el promedio de la carga obtenida en los dos cilindros ensayados para módulo a fin de obtener el 40% de la carga, la variación de la cantidad de especímenes ensayados se debe registrar en el informe final. (NMX-C-128-ONNCCE, 2020).

Los especímenes cilíndricos, deben elaborarse y curarse de acuerdo a la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 y durante el tiempo transcurrido entre el retiro de los especímenes del curado y el ensayo, se debe evitar que estos pierdan humedad (la edad del ensayo depende del tipo de concreto, en la edad que se requiera conocer el módulo de elasticidad).

Se debe colocar el espécimen en una superficie horizontal plana y firme, donde se instalan los deformímetros, el espécimen debe quedar al centro de los anillos, fijándose mediante tornillos de punta y se colocan los extensómetros que deben de quedar verticales, paralelos al eje longitudinal del espécimen.

Se requiere preparar el espécimen aplicando una base de resina verificando que si es espécimen se encuentra húmedo se seque superficialmente y se pueda adherir correctamente.

5.1.2 Procedimiento

El procedimiento que se lleva a cabo para el análisis de los agregados del concreto de tipo basalto y caliza es el siguiente, no obstante, es importante mencionar que en esta investigación los resultados obtenidos se engloban en formato de graficas divididas en calizas y basaltos, los datos recopilados de las pruebas de laboratorio se pueden observar en los anexos.

El estudio se basó en la recopilación de datos de 122 muestras de laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), donde se contaban con datos del lugar de procedencia de la muestra, fecha en que elaboro, el tipo de prueba que se realizó y otros datos técnicos como las medidas de las muestras cilíndricas, resistencias obtenidas, módulos de elasticidad y esfuerzos obtenidos.

Los datos recopilados se fueron agrupando por estados, ciudades o regiones, los cuales a su vez se separaban por el tipo de agregado grueso que contuviera (caliza o basalto). Se realizaron graficas comparativas del módulo de elasticidad de cada espécimen con la respectiva raíz cuadrada de su esfuerzo en kg/cm². Se dividieron en 64 muestras de caliza (Grafica 3, caliza) y 58 muestras de basalto (Grafica 2, basalto) respectivamente.

Las gráficas demostraron junto con una línea de tendencia lineal qué tipo de agregado mantenía más regularidad con respecto a la línea de tendencia. Se demostro que los materiales y las unidades que se utilizaron en su elaboración presentaban mejores resultados, en comparación con muestras de diferentes estados, ciudades o regiones se obtenían diferentes resultados. Aunque el tipo de agregado fuera el mismo, se observó que los agregados de algunas regiones tenían mejores propiedades que aumentaban la resistencia.

Para especímenes estándar de 150 mm x 300 mm

1. Deben ser colocados con el deformímetro sobre el bloque de la prensa y centrarlos centrados antes de la aplicación de carga.
2. Aplicar una precarga para así estabilizar la lectura de los micrómetros, entre el 10 % y 15 % del esfuerzo máximo obtenido del promedio de los especímenes ensayados a compresión (durante la primera precarga se debe verificar el funcionamiento de los extensómetros y descargar gradualmente).
3. Aplicar una segunda precarga hasta la misma carga que la anterior, registrando cargas y deformaciones cada tonelada hasta 5 t, después a cada 5 t.
4. Se deben realizar las precargas necesarias hasta observar que los deformímetros hayan regresado a la lectura inicial y si la deformación leída es similar, de lo contrario se debe verificar el centrado y ajustar los indicadores.
5. De 5 t en adelante, las deformaciones deben ser registradas cada 5 t, hasta llegar al 60 % del esfuerzo máximo, la velocidad de la carga debe ser tal que

las primeras 5 t se deben aplicar en 1 minuto aproximadamente, de ahí en adelante 5 t a cada 20 segundos.

6. Para determinar la relación de Poisson, se registra la deformación transversal en los mismos puntos en los que fue registrada la deformación longitudinal.
7. En el caso de corazones o cilindros de tamaño diferente al estándar el procedimiento es similar, con sus respectivas cargas proporcionales al área transversal del espécimen.

5.1.3 Cálculo y expresión de los resultados

Registro de las lecturas de deformación

- La determinación de los esfuerzos obtenidos en cada lectura de aplicación de carga de acuerdo con el área del espécimen.

$$Esfuerzo = \frac{Carga}{Área} \text{ (Ecuación 5)}$$

- Determinar las deformaciones con respecto a la longitud de medición.

$$\text{Deformación unitaria} = \frac{\text{Promedio de lectura de los extensómetros}}{\text{Longitud de medición}} \text{ (Ecuación 6)}$$

O

$$\frac{\text{Promedio de lectura de los extensómetros} \times \text{Factor de multiplicación}}{\text{Longitud de medición}} \text{ (Ecuación 7)}$$

En ambos casos la longitud de medición es la distancia de centro de los tornillos de los anillos, en el caso de deformímetros adheribles se toma la deformación unitaria del lector.

- Determinar mediante interpolación lineal, el esfuerzo (S1) correspondiente a una deformación unitaria de 50 millonésimas (e1), así como la deformación unitaria (e2) correspondiente al 40 % del esfuerzo máximo (S2).

Fórmula de interpolación lineal

$$= S - S1 = \left(\frac{S2-S1}{e2-e1}\right)(e - e1) \quad (\text{Ecuación 8})$$

S : esfuerzo requerido.

$S1$: esfuerzo menor.

$S2$: esfuerzo mayor.

e : deformación requerida.

$e1$: deformación menor.

$e2$: deformación mayor.

En caso requerirse, se debe de graficar la curva esfuerzo-deformación en un diagrama de coordenadas con las deformaciones unitarias y los esfuerzos calculados, en la cual deben ser considerados el esfuerzo (S) y la deformación (e).

La determinación del esfuerzo ($S1$), en unidades en MPa o kg/cm² según corresponda a la deformación unitaria ($e1$) que es igual a 0.000050. Respectivamente el esfuerzo ($S2$) es correspondiente al 40% del esfuerzo máximo ya antes calculado se determina la deformación ($e2$).

Fórmula para el cálculo del módulo de elasticidad

$$E = \left(\frac{S2-S1}{e2-0,000050}\right) \quad (\text{Ecuación 9})$$

E : módulo de elasticidad estático, en MPa (kg/cm²)

$S1$: esfuerzo a 50 millonésimas de deformación

$S2$: esfuerzo correspondiente al 40 % de f_c máxima

e_2 : deformación al 40 % de f_c máxima

Fórmula para el cálculo de la relación de Poisson

$$M = \left(\frac{e_{t2} - e_{t1}}{e_2 - 0,000050} \right) \text{ (Ecuación 10)}$$

M : relación de Poisson

e_{t2} : deformación transversal unitaria a la altura media, del esfuerzo S_2

e_{t1} : deformación transversal unitaria a la altura media, del esfuerzo S_1

5.2 Pruebas de laboratorio

5.2.1 Equipo utilizado

Extensómetros: Conocidos también como indicadores de carátula y sensores adheribles; pueden ser acoplables, ya sean analógicos, digitales o sensores adheribles.

Deformímetros: Dispositivos que se adaptan a los especímenes de concreto para medir las deformaciones longitudinales y transversales en los especímenes que se les generan al aplicarles cargas utilizando extensómetros, debe de usarse un dispositivo que pueda acoplarse o adherirse al espécimen cilíndrico y que permita realizar lecturas de deformación para calcular deformaciones unitarias con aproximación de 10 millonésimas.

Existen varios tipos de deformímetros que se pueden utilizar en el ensayo, los cuales son enlistados a continuación:

Dos anillos y dos extensómetros: Dispositivo con dos anillos metálicos separados entre sí (separación mínima a la altura del espécimen), para su

acoplamiento a los cilindros, cada anillo debe contar por lo menos con tres tornillos de sujeción y ser sujetados al espécimen.

Dos anillos y un extensómetro: Dispositivo con dos anillos separados entre sí, para su acoplamiento el anillo inferior debe contar por lo menos con tres tornillos de sujeción y ser sujetado al espécimen. En este caso la deformación se lee en un solo extensómetro colocado sobre el plano vertical, perpendicular al eje de rotación del anillo, separado del centro del espécimen.

Eléctricos adheribles: Son dispositivos en los cuales se lee el cambio de la resistividad eléctrica de una resistencia al variar su sección por cambio de su longitud al deformarse utilizando un deformímetro adherible. La longitud del deformímetro adherible debe ser al menos tres veces el tamaño máximo del agregado grueso y no mayor que dos tercios de la altura del espécimen.

Medidor de deformación transversal: Para obtener la relación de Poisson debe determinarse además de la deformación longitudinal, la transversal, con un dispositivo para medir el cambio en diámetro a la altura media del espécimen (existen dos tipos).

Tres anillos y dos extensómetros: El anillo central debe estar unido al pivote para permitir la rotación de los dos segmentos del anillo en un plano horizontal. En el lado opuesto deben de ser conectados los dos segmentos a través de un extensómetro de tal forma que esta deformación será el doble de la real cuando las distancias del eje de los apoyos del cilindro al centro de la articulación y al centro del medidor sean iguales.

Medidor adherible: Es un sistema formado por dos medidores eléctricos de deformación adheribles, colocados circunferencialmente en puntos diametralmente opuestos a la altura media del espécimen.

La deformación obtenida es la deformación unitaria de la circunferencia, en base a la cual debe calcularse la deformación diametral, se calcula de la siguiente manera:

$$H = \frac{c}{\pi} \quad (\text{Ecuación 11})$$

H : deformación unitaria transversal

c : deformación unitaria de la circunferencia

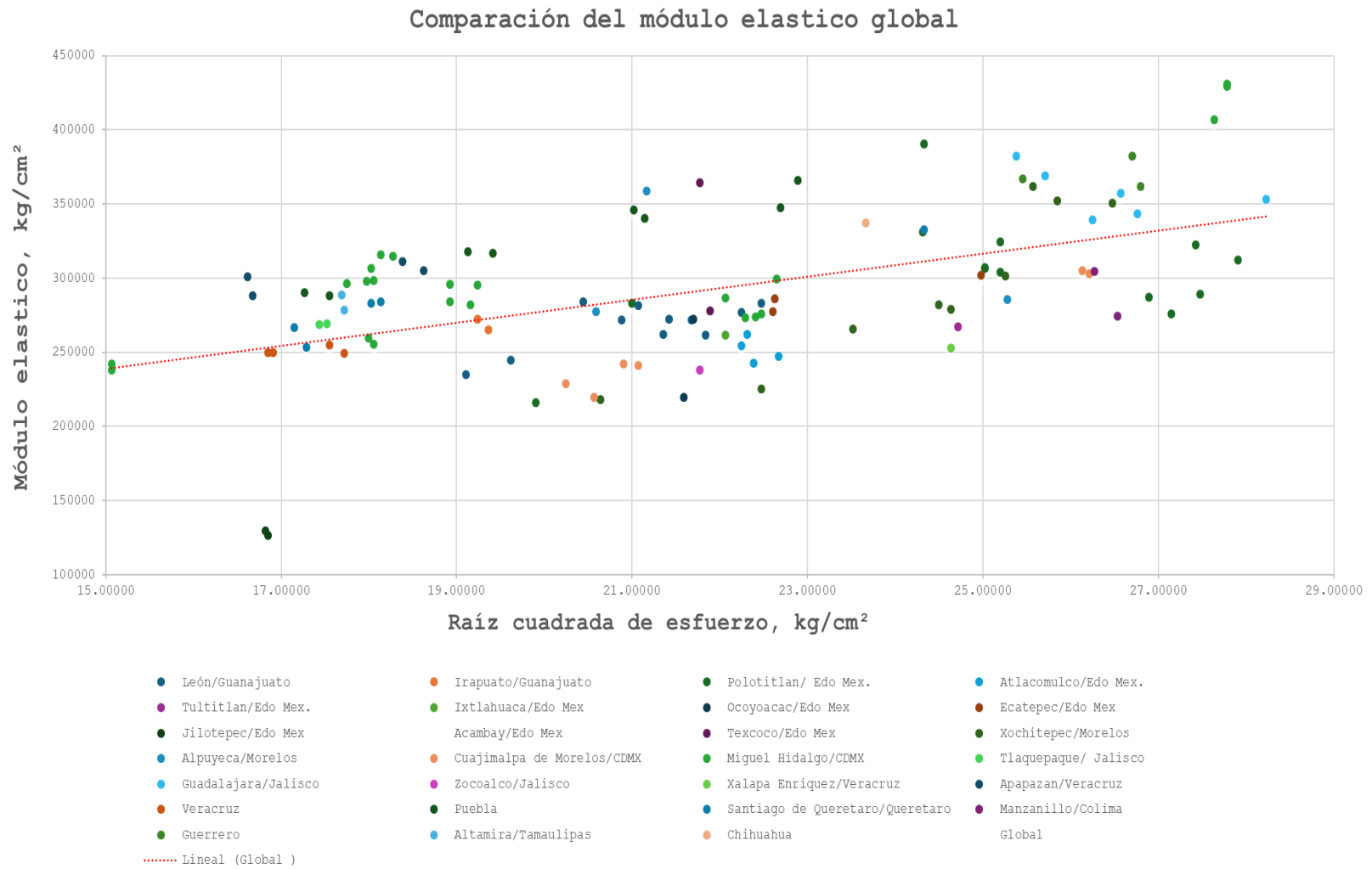
π : 3.1416

La determinación del módulo de elasticidad debe hacerse en un local libre de vibraciones o circulación de personal que pueda inferir con la lectura de los indicadores o con la aplicación de carga.

DISCUSIÓN

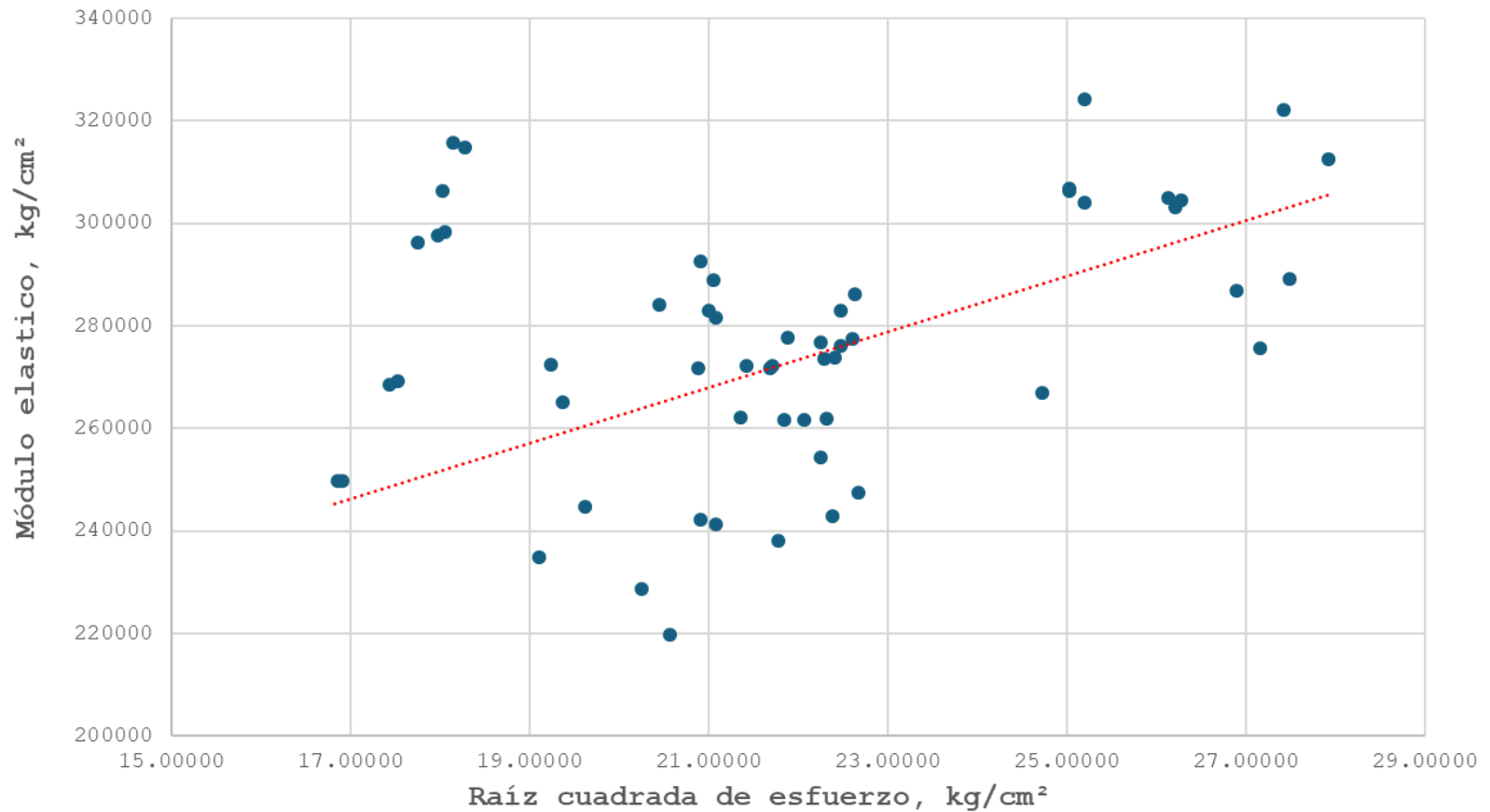
- a) El módulo de elasticidad se confirma como un parámetro fundamental para evaluar la rigidez del concreto, ya que describe su capacidad para deformarse dentro del rango elástico. Los resultados analizados demuestran que este parámetro depende principalmente del comportamiento del agregado grueso, el cual influye de manera directa en la deformación unitaria registrada en los ensayos normalizados.
- b) Importancia de los agregados: se comprobó que estos constituyen el esqueleto estructural del concreto, aportando soporte y resistencia al cambio de forma bajo cargas externas.
- c) Clasificación de agregados: los agregados ígneos (basálticos y graníticos) demostraron comportamientos superiores en términos de rigidez, en comparación con los agregados calizos de origen sedimentario.
- d) Tamaño de partículas: la granulometría adecuada mejora el empaquetamiento, reduce vacíos y aumenta la rigidez del concreto.
- e) Propiedades físicas y mecánicas: parámetros como densidad, absorción y resistencia interna del agregado afectan directamente la deformabilidad del concreto.

-
- f) Importancia granulométrica: una granulometría bien ajustada proporciona mayor conexión entre pasta y agregado, mejorando el módulo elástico.
 - g) Aunque el uso de agregados reciclados contribuye a la reducción del impacto ambiental, sus mayores niveles de porosidad y absorción pueden disminuir la rigidez del concreto. Por ello, su empleo debe evaluarse cuidadosamente para garantizar que las propiedades mecánicas requeridas no se vean comprometidas.
 - h) Propiedades físicas del concreto: una adecuada selección de agregados permite obtener concretos con menor porosidad y mayor densidad, favoreciendo su módulo elástico.
 - i) Propiedades mecánicas: aunque la resistencia a compresión y el módulo elástico se relacionan, este último depende significativamente del comportamiento del agregado.
 - j) La aplicación de procedimientos establecidos en las normas NMX-C-128-ONNCCE y ASTM C469 permitió validar de manera consistente la influencia del agregado grueso en la respuesta elástica del concreto. Estos métodos proporcionan parámetros adecuados para correlacionar las deformaciones medidas con las propiedades mecánicas asociadas al tipo de agregado.



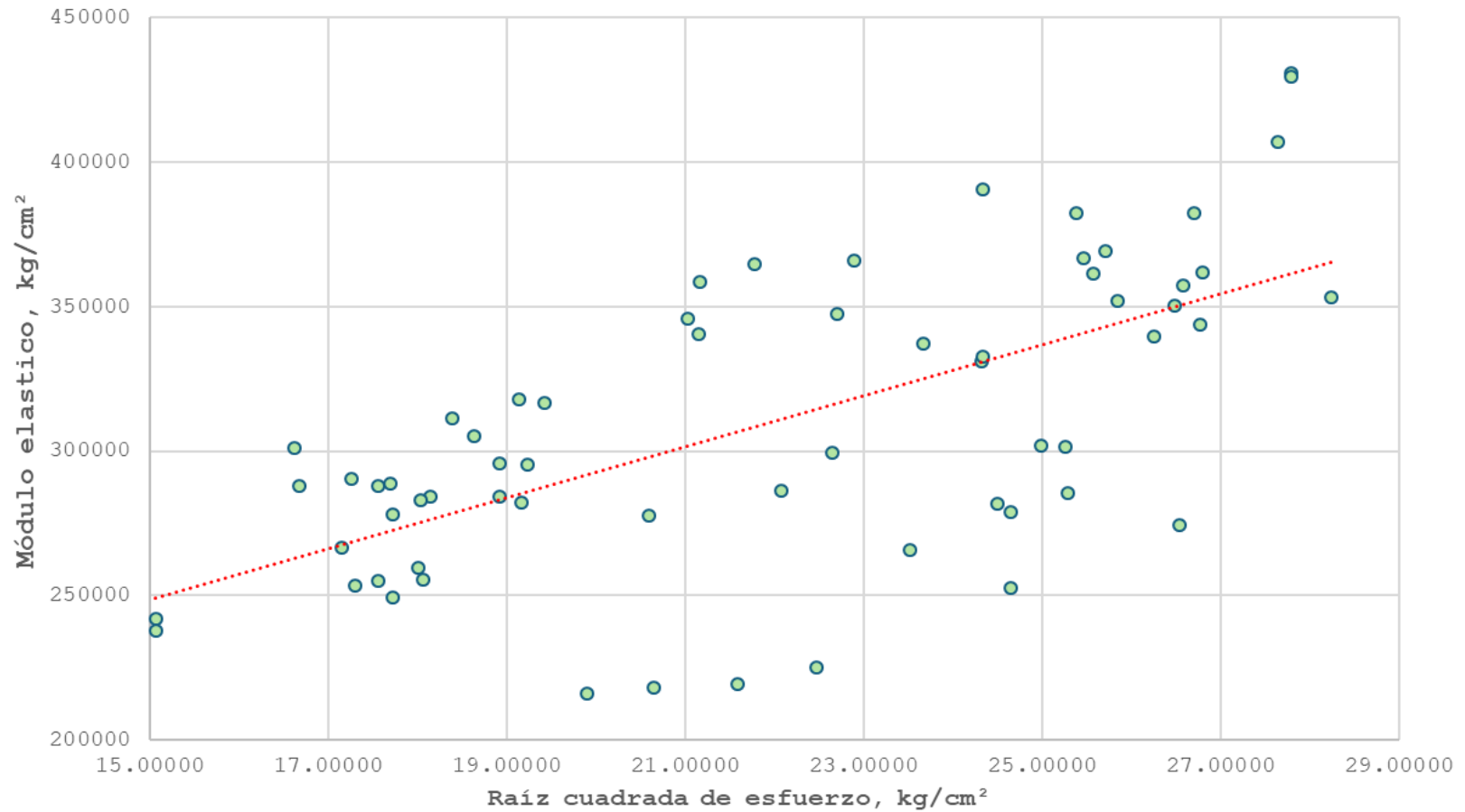
Grafica 1- Comparación del módulo elástico global - datos recopilados de pruebas de laboratorio del instituto mexicano del cemento y del concreto.

Comparación del módulo elástico por tipo de agregado
Agregado: Basalto



Grafica 2- Comparación del módulo elástico por tipo de agregado (Basalto) - datos recopilados de pruebas de laboratorio del instituto mexicano del cemento y del concreto.

Comparación del módulo elástico por tipo de agregado
Agregado: Caliza



Grafica 3 – Comparación del módulo elástico por tipo de agregado (Caliza) - datos recopilados de pruebas de laboratorio del instituto mexicano del cemento y del concreto.

CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como finalidad analizar la influencia de los agregados de diferente origen geológico/diferente estado de la república en el módulo elástico del concreto, considerando su papel como componente mayoritario del material y su incidencia directa en la rigidez, desempeño mecánico y deformacional del concreto estructural. A partir del análisis documental, normativo y comparativo de datos experimentales secundarios, se logró establecer una relación sólida entre las características físicas y mecánicas de los agregados y la capacidad del concreto para resistir deformaciones elásticas bajo carga. Este apartado presenta una síntesis reflexiva de los hallazgos, sustentada en los objetivos planteados, el marco teórico y los principios normativos estudiados.

Conclusiones Generales

1. Se confirma que los agregados son el factor más determinante en el comportamiento mecánico del concreto en estado endurecido, debido a que representan entre el 60 % y 80 % de su volumen total. Su incidencia es especialmente notable en el módulo de elasticidad estático, al influir directamente en la capacidad del material para deformarse dentro del rango elástico.
2. El módulo elástico del concreto está estrechamente asociado a las propiedades intrínsecas del agregado, tales como tipo de roca, dureza, densidad, porosidad, forma, textura superficial y granulometría. Agregados derivados de rocas ígneas como el basalto y el granito mostraron, según la literatura analizada, una mayor rigidez y menor deformabilidad, lo que repercute positivamente en el módulo elástico del concreto.
3. La microestructura del concreto y su zona de transición interfacial (ITZ) se consolidaron como elementos clave en la transferencia de esfuerzos entre pasta y agregado. Cuando esta interfase es compacta, con buena adherencia y menor porosidad, el módulo de elasticidad del concreto incrementa significativamente.

-
4. Las normas técnicas como NMX-C-128-ONNCCE (2020) y ASTM C469 (2021) establecen procedimientos estandarizados para la determinación del módulo de elasticidad estático, lo cual permite correlacionar los valores experimentales con las características del agregado, reforzando la importancia de la selección adecuada del mismo en el diseño estructural.
 5. La sostenibilidad en la selección de agregados representa un criterio creciente en la industria del concreto, ya que la elección de materiales reciclados o de procedencia local puede reducir la huella ambiental. Sin embargo, su incorporación debe evaluar cuidadosamente la posible disminución del módulo elástico debido a mayores porosidades o menor resistencia intrínseca.
 6. El análisis documental permitió establecer tendencias claras en los estudios previos, destacando que concretos elaborados con agregados calizos presentan módulos elásticos menores respecto a los fabricados con agregados ígneos, lo que confirma la importancia de la composición mineralógica del agregado en la respuesta mecánica del concreto.

La hipótesis planteada se confirma al comprobar que los agregados basálticos y graníticos, por su mayor densidad, dureza y módulo elástico intrínseco, producen concretos con mayor rigidez en comparación con aquellos elaborados con agregados calizos de menor resistencia estructural.

El estudio reafirma que el módulo elástico del concreto no debe analizarse únicamente desde la pasta cementante, sino desde la naturaleza del agregado, componente determinante en su rigidez estructural. La adecuada selección del agregado, basada en criterios mecánicos, granulométricos y de sostenibilidad, es fundamental para garantizar concretos con alto desempeño. Como resultado, se establece que la comprensión del aporte del agregado al módulo elástico constituye un aspecto clave en la mejora del diseño de mezclas, el desempeño estructural y la optimización constructiva en el ámbito de la ingeniería civil.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Aabid, A., Baig, M., & Hrairi, M. (2023). Advanced composite materials for structural maintenance, repair, and control. *Materials*, 16(2), 743. <https://doi.org/10.3390/ma16020743>
- 2) Aïtcin, P. C., & Mehta, P. K. (1990). Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 87(2), 103–107.
- 3) Alanazi, H. (2021). Effect of Aggregate Types on the Mechanical Properties of Traditional Concrete and Geopolymer Concrete. *Crystals*, 11(9), 1110. <https://doi.org/10.3390/cryst11091110>
- 4) American Concrete Institute (ACI). (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary. American Concrete Institute.
- 5) American Concrete Institute (ACI). (2021). Report on high-strength concrete (ACI 363R-20). American Concrete Institute.
- 6) American Concrete Institute (ACI). (2021). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1-21). American Concrete Institute.
- 7) American Society for Testing and Materials (ASTM). (2021). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression (ASTM C469-21). ASTM International. <https://www.astm.org/c469-21.html>
- 8) American Society for Testing and Materials (ASTM). (2021). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates (ASTM C136-21). ASTM International. <https://www.astm.org/c136-21.html>
- 9) American Society for Testing and Materials (ASTM). (2021). Standard specification for concrete aggregates (ASTM C33-21). ASTM International. <https://www.astm.org/c33-21.html>

-
- 10) Asocreto. (1997). *Tecnología y propiedades* (Tomo 1). Instituto del Concreto, ASOCRETO.
 - 11) Castano, J. E., & Abdel-Mohti, A. (2024). Assessing the Impact of Recycled Concrete Aggregates on the Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Concrete for Structural Precast Applications. *Infrastructures*, 9(10), 177. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9100177>
 - 12) Diamond, S. (2001). Consideration in image analysis as applied to investigation of the ITZ in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23, 171–178.
 - 13) Domone, P. (2021). *Concrete: Properties and applications*. CRC Press.
 - 14) Fernández Sánchez, G. (2010). *Propuesta de modelo para la evaluación de la sostenibilidad en la dirección integrada de proyectos de ingeniería civil* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].
 - 15) Gao, X., Zhang, J., & Liu, H. (2022). Effect of aggregate properties on the elastic modulus of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 323, 126602. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126602>
 - 16) Gobierno de la Ciudad de México. (2021). *Normas Técnicas Complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto*. Secretaría de Obras y Servicios.
 - 17) Gómez Gutiérrez, M. (2009). *Límites de consistencia de los agregados para mezclas de concreto* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio UNAM. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3504401>
 - 18) Gonzáles, L. O. (2013). *Influencia de los componentes del concreto reforzado con fibras en sus propiedades mecánicas* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Colombia].
 - 19) Gutiérrez, J. L. (2009, mayo). *Impacto ambiental* [Documento institucional]. ULADECH. <https://...> (coloca el enlace exacto)
 - 20) Guzmán, A. L. (1999). *Uso del humo de sílice y aditivos reductores de agua de alto rango (superplastificantes) en el concreto* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro].

-
- 21) Helvatjoglu-Antoniades, M., Papadopoulos, M., & Tsikouris, A. (2022). Experimental analysis of static elastic modulus of concrete based on aggregate type. *Materials Today: Proceedings*, 49, 1513-1521. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.014>
- 22) Jagadesh, P., Karthik, K., Kalaivani, P., Karalar, M., Althaqafi, E., Madenci, E., & Özkılıç, Y. O. (2024). Examining the Influence of Recycled Aggregates on the Fresh and Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 16(20), 9052. <https://doi.org/10.3390/su16209052>
- 23) Jamellodin, Z., Qian Yi, L., Latif, Q. B. A. I., Algaifi, H. A., Hamdan, R., & Al-Gheethi, A. (2022). Evaluation of Fresh and Hardened Concrete Properties Incorporating Glass Waste as Partial Replacement of Fine Aggregate. *Sustainability*, 14(23), 15895. <https://doi.org/10.3390/su142315895>
- 24) Jamil, S., Idrees, M., Akbar, A., & Ahmed, W. (2025). Investigating the Mechanical and Durability Properties of Carbonated Recycled Aggregate Concrete and Its Performance with SCMs. *Buildings*, 15(2), 201. <https://doi.org/10.3390/buildings15020201>
- 25) Li, Z., Hojati, M., Wu, Z., Piasente, J., Ashrafi, N., Duarte, J. P., Nazarian, S., Bilén, S. G., Memari, A. M., & Radlińska, A. (2020). Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review. *Sustainability*, 12(3), 849. <https://doi.org/10.3390/su12030849>
- 26) Márquez Moreno, J. R. (2012). *Mejoramiento de la calidad del concreto hidráulico optimizando la relación agua-cemento, grava, arena y propiedades físicas de los agregados pétreos para producir concretos de alto desempeño* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio UNAM. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/388554>
- 27) Martínez, D. P. (2008). *Hormigones de altas prestaciones* [Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Cartagena].
- 28) Maruyama, I. (2001). Optimization of mix of concrete under various severe conditions by applying the genetic algorithm. In *Proceedings of the 3rd*

International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading (CONSEC'01) (pp. 1400–1407). Vancouver.

- 29) Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2022). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- 30) Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2022). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- 31) Menegatti, L. C., Castrillon Fernandez, L. I., Caldas, L. R., Pepe, M., Pittau, F., Zani, G., ... & Martinelli, E. (2022). Environmental performance of deconstructable concrete beams made with recycled aggregates. *Sustainability*, 14(18), 11457. <https://doi.org/10.3390/su141811457>
- 32) Neville, A. M. (2020). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- 33) Ollivier, J., Maso, J., & Bourdette, B. (1995). Interfacial transition zone in concrete. *Advanced Cement Based Materials*, 2, 30–38.
- 34) Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). (2020). *Concreto sometido a compresión – Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson (NMX-C-128-ONNCCE-2020)*.
- 35) Ozcan, O., Musaoglu, N., & Seker, D. Z. (2012). Environmental impact analysis of quarrying activities established on and near a river bed by using remotely sensed data. *Fresenius Environmental Bulletin*, 21(11), 3147–3153.
- 36) Pujadas, A. P. (2008). *Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno* [Trabajo de grado, Universitat Politècnica de Catalunya].
- 37) Quiñones, A. D. (2013). *Contribución al análisis y estudio de la zona interfacial árido-pasta de cemento portland* [Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha].
- 38) Quiñones, J. A. (2022). *Efectos de los aditivos plastificantes ASTM C494 tipo A, sobre el asentamiento, tiempo de fraguado y resistencia a la compresión de un concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte].

-
- 39) Rakhmangulov, A., Burmistrov, K., & Osintsev, N. (2021). Sustainable open pit mining and technical systems: Concept, principles, and indicators. *Sustainability*, 13(3), 1101. <https://doi.org/10.3390/su13031101>
- 40) Salas, V. H. (2019). *Sostenibilidad de los agregados reciclados de residuos de concreto para obras civiles en la elaboración de concretos* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Federico Villarreal].
- 41) Sata, V., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2022). Geopolymer-Based Artificial Aggregates: A Review on Methods of Preparation, Properties, and Applications. *Materials*, 15(16), 5516. <https://doi.org/10.3390/ma15165516>
- 42) Scrivener, K. L. (2004). Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: Understanding and quantification. *Cement and Concrete Composites*, 26(8), 935–945.
- 43) Scrivener, K., & Gartner, E. (1988). Microstructural gradients in cement paste around aggregate particles. In *Cementitious composites: Symposium proceedings 114* (pp. 77–85). Materials Research Society.
- 44) Sevim, O., Alakara, E. H., & Guzelkucuk, S. (2023). Properties of Cementitious Composites Incorporating Firebrick Powder from Construction and Demolition Waste. *Buildings*, 13(1), 45. <https://doi.org/10.3390/buildings13010045>
- 45) Shoaib, S., El-Maaddawy, T., El-Hassan, H., El-Ariss, B., & Alsalami, M. (2022). Concrete Reinforced with Basalt Macro-Fibers: Fresh and Durability Properties. *Buildings*, 12(8), 1136. <https://doi.org/10.3390/buildings12081136>
- 46) Sidorova, A. (2013). *Estudio del efecto de la naturaleza del árido reciclado en la microestructura y propiedades de la zona de transición árido-pasta de cemento* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://hdl.handle.net/2117/95015>
- 47) Van Chanh, N. (2005). Steel fiber reinforced concrete. In K. Sakai & N. Van Chanh (Eds.), *Proceedings of JSCE – VIFCEA Joint Seminar on Concrete Engineering in Vietnam and Workshop* (pp. 108–116). Japan Society of Civil Engineering.

-
- 48)Wafa, F. F. (1990). Properties and applications of fiber reinforced concrete. *JKAU: Engineering Sciences*, 2, 49–63.
- 49)Zhang, J., Chen, S., & Wang, Y. (2023). Impact of recycled aggregate on the elastic modulus of high-performance concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2), 04022489. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004532](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004532)
- 50)Zhang, X., Gao, M., Zhang, D., Zhang, B., & Wang, M. (2024). Experimental Study on the Mechanical Properties of Metallurgical Slag Aggregate Concrete and Artificial Aggregate Concrete. *Buildings*, 14(8), 2548. <https://doi.org/10.3390/buildings14082548>

ANEXOS

Ciudad/Estado	Módulo elastico (Ec)	Esfuerzo Máximo (kg/cm²)	Raíz Cuadrada de Esfuerzo	Agregado
León/Guanajuato	261772	477	21.84033	Basalto
	272159	459	21.42429	Basalto
	262178	456	21.35416	Basalto
	271729	470	21.67948	Basalto
	234889	365	19.10497	Basalto
	244640	385	19.62142	Basalto
LEÓN DE ALDAMA / GUANAJUATO	284217	418	20.44505	Basalto
	271839	436	20.88061	Basalto
	281511	444	21.07131	Basalto
LEÓN/GUANAJUATO	282915	505	22.47221	Basalto
	276795	495	22.24860	Basalto
IRAPUATO / GUANAJUATO	265140	375	19.36492	Basalto
	272378	370	19.23538	Basalto
POLOTITLAN/ESTADO DE MEXICO	275672	737	27.14774	Basalto
	286971	723	26.88866	Basalto
POLOTITLAN/ESTADO DE MEXICO	289147	755	27.47726	Basalto
	312427	779	27.91057	Basalto
	322207	752	27.42262	Basalto
POLOTITLAN/ESTADO DE MEXICO	324304	635	25.19921	Basalto
	306439	626	25.01999	Basalto
	304143	635	25.19921	Basalto
	306909	626	25.01999	Basalto
POLOTITLAN/ESTADO DE MEXICO	283049	441	21.00000	Basalto
POLOTITLAN/ESTADO DE MEXICO	390341	592	24.33105	Caliza
POLOTITLAN/ESTADO DE MEXICO	216024	396	19.89975	Caliza
ATLACOMULCO/ ESTADO DE MEXICO	247417	514	22.67157	Basalto
	242779	501	22.38303	Basalto
	261933	498	22.31591	Basalto
	254220	495	22.24860	Basalto
TULTITLÁN /ESTADO DE MÉXICO	267036	611	24.71841	Basalto
IXTLAHUACA/ESTADO DE MÉXICO	261622	487	22.06808	Basalto
OCOYOACAC/ESTADO DE MÉXICO	272114	471	21.70253	Basalto
OCOYOACAC/ESTADO DE MÉXICO	219523	466	21.58703	Caliza
ECATEPEC DE MORELOS/ ESTADO DE MÉXICO	302003	624	24.97999	Caliza
ECATEPEC/ESTADO DE MÉXICO	277553	511	22.60531	Basalto
	286275	512	22.62742	Basalto
JILOTEPEC/ESTADO DE MÉXICO	129421	283	16.82260	Basalto
	126699	284	16.85230	Basalto
ACAMBAY/ESTADO DE MÉXICO	288951	443	21.04757	Basalto
	292674	437	20.90454	Basalto

TEXCOCO/ESTADO DE MÉXICO	364559	474	21.77154	Caliza
TEXCOCO/ESTADO DE MÉXICO	277799	479	21.88607	Basalto
XOCHITEPEC/MORELOS	301462	638	25.25866	Caliza
	351974	668	25.84570	Caliza
XOCHITEPEC/MORELOS	278867	607	24.63737	Caliza
	265747	553	23.51595	Caliza
XOCHITEPEC/MORELOS	218064	426	20.63977	Caliza
XOCHITEPEC/MORELOS	281898	600	24.49490	Caliza
XOCHITEPEC/MORELOS	350459	701	26.47640	Caliza
XOCHITEPEC/MORELOS	225072	505	22.47221	Caliza
XOCHITEPEC/MORELOS	361578	654	25.57342	Caliza
XOCHITEPEC/MORELOS	331185	591	24.31049	Caliza
ALPUYECA/MORELOS	285378	639	25.27845	Caliza
ALPUYECA/MORELOS	277611	424	20.59126	Caliza
ALPUYECA/MORELOS	358655	448	21.16601	Caliza
	228567	410	20.24846	Basalto
	242179	437	20.90454	Basalto
CUAJIMALPA DE MORELOS/ CDMX	304982	683	26.13427	Basalto
	219683	423	20.56696	Basalto
	241280	444	21.07131	Basalto
	303043	687	26.21068	Basalto
	315718	329	18.13836	Basalto
	314832	334	18.27567	Basalto
	306336	325	18.02776	Basalto
MIGUEL HIDALGO/CIUDAD DE MÉXICO	273501	497	22.29350	Basalto
	273913	502	22.40536	Basalto
	276049	505	22.47221	Basalto
	296289	315	17.74824	Basalto
	298365	326	18.05547	Basalto
	297616	323	17.97220	Basalto
	259472	324	18.00000	Caliza
MIGUEL HIDALGO/CIUDAD DE MÉXICO	255551	326	18.05547	Caliza
	295853	358	18.92089	Caliza
	284161	358	18.92089	Caliza
MIGUEL HIDALGO, CIUDAD DE MÉXICO	282086	367	19.15724	Caliza
	295379	370	19.23538	Caliza
CDMX	299337	513	22.64950	Caliza
	286365	487	22.06808	Caliza
CDMX	241916	227	15.06652	Caliza
	237852	227	15.06652	Caliza
	430769	772	27.78489	Caliza
CDMX	429444	772	27.78489	Caliza
	406812	764	27.64055	Caliza

SAN PEDRO TLAQUEPAQUE/ JALISCO	268561	304	17.43560	Basalto
	269200	307	17.52142	Basalto
	382120	644	25.37716	Caliza
	357098	706	26.57066	Caliza
GUADALAJARA/JALISCO	339538	689	26.24881	Caliza
	369021	661	25.70992	Caliza
	353234	797	28.23119	Caliza
	343558	716	26.75818	Caliza
ZOCOALCO/JALISCO	237962	474	21.77154	Basalto
XALAPA ENRIQUEZ/ VERACRUZ	252620	607	24.63737	Caliza
	305103	347	18.62794	Caliza
	311263	338	18.38478	Caliza
APAPAZAN/VERACRUZ	288025	278	16.67333	Caliza
	301097	276	16.61325	Caliza
VERACRUZ	249846	286	16.91153	Basalto
	249746	284	16.85230	Basalto
VERACRUZ	255000	308	17.54993	Caliza
	249209	314	17.72005	Caliza
	290395	298	17.26268	Caliza
	287937	308	17.54993	Caliza
PUEBLA	316733	377	19.41649	Caliza
	317906	366	19.13113	Caliza
	345733	442	21.02380	Caliza
	340286	447	21.14237	Caliza
PUEBLA	365914	524	22.89105	Caliza
	347519	515	22.69361	Caliza
SANTIAGO DE QUERETARO/QUERETAR O	332628	592	24.33105	Caliza
QUERETARO	253275	299	17.29162	Caliza
	266762	294	17.14643	Caliza
QUERETARO	284231	329	18.13836	Caliza
	283067	325	18.02776	Caliza
MANZANILLO/COLIMA	274501	704	26.53300	Caliza
MANZANILLO/COLIMA	304513	690	26.26785	Basalto
	382270	713	26.70206	Caliza
GUERRERO	366667	648	25.45584	Caliza
	361953	718	26.79552	Caliza
ALTAMIRA/TAMAULIPAS	288704	313	17.69181	Caliza
	278201	314	17.72005	Caliza
CHIHUAHUA	337331	560	23.66432	Caliza