



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
SISMORESISTENTES

TEMA:

OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA UN
HORMIGÓN DE $F'_c=300 \text{ kg/cm}^2$, ELABORADO CON MATERIAL RECICLADO DE
ADOQUÍN, CEMENTO “ARMADURO” Y MATERIAL GRANULAR DE LA MINA “SAN
JOAQUÍN” UBICADA EN EL CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI.

AUTOR:

ING. VERÓNICA LISSETH CONSTANTE PRÓCEL

TUTOR:

ING. WILSON OSWALDO CANDO TIPÁN

QUITO-ECUADOR

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO.....	8
CAPÍTULO I.....	9
1.1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1.1. JUSTIFICACIÓN	9
1.1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.1.3. CONTEXTUALIZACIÓN DEL TEMA U OBJETO	10
1.1.4. OBJETIVOS	10
1.1.5. ALCANCE.....	10
1.1.6. METODOLOGÍAS Y TÉCNICAS.....	11
CAPÍTULO II.....	12
2.1. MARCO TEÓRICO	12
2.1.1. ANTECEDENTES	12
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	14
2.2.1. CEMENTO	15
2.2.2. AGREGADO PÉTREO	16
2.2.3. HORMIGÓN.....	16
2.2.4. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL HORMIGÓN	16
2.2.5. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO	17
2.2.6. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO	18
2.2.7. MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	19
2.2.8. TIPOS DE FALLA	22
2.2.9. HORMIGÓN RECICLADO.....	22
CAPÍTULO III.....	24
3.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS DE LA MINA SAN JOAQUÍN.....	24
3.1.1. ABRASIÓN	24

3.1.2. COLORIMETRÍA	25
3.1.3. DENSIDAD REAL (PESO ESPECÍFICO)	26
3.1.4. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN.....	28
3.1.5. CONTENIDO DE HUMEDAD.....	29
3.1.6. DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTA	30
3.1.7. GRANULOMETRÍA.....	32
3.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CEMENTO ARMADURO	34
3.2.1. DENSIDAD DEL CEMENTO	34
3.3. DOSIFICACIÓN MÉTODO ACI	35
3.3.1. ASENTAMIENTOS	35
3.3.2. TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO	35
3.3.3. CANTIDADES APROXIMADAS DE AGUA DE MEZCLADO	35
3.3.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN BASADA EN LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO.....	36
3.3.5. VOLUMEN APARENTE DE GRAVA SECA Y COMPACTADA POR UNIDAD DE VOLUMEN DE HORMIGÓN	37
3.4. DISEÑO DE MEZCLA	37
3.5. DISEÑO DE HORMIGON CON MATERIAL RECICLADO.....	40
3.6. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EXPERIMENTAL.....	41
3.7. DETERMINACIÓN DEL FACTOR PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	41
3.8. DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD	42
CAPÍTULO IV	43
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	43
4.1.1. RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (F ² C) DE LA MUESTRA PATRÓN, 6%-8%- 10% DE MATERIAL RECICLADO.	43
4.1.2. RESUMEN DE RESULTADOS DE LA MUESTRA PATRÓN Y MUESTRAS CON MATERIAL RECICLADO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (F ² C).....	47
4.1.3. RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EXPERIMENTAL DE MUESTRA PATRÓN, 6%-8%- 10% DE MATERIAL RECICLADO.	49
4.1.4. RESUMEN DE RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EXPERIMENTAL	53

4.1.5. FACTORES PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA UN HORMIGÓN DE 300 KG/CM ²	54
4.1.6. ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD	56
CAPÍTULO V	57
5.1. CONCLUSIONES	57
5.2. RECOMENDACIONES	58
5.3. BIBLIOGRAFÍA	59
6. ANEXO FOTOGRÁFICO.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 ENSAYO DE ABRASIÓN AGREGADO GRUESO (RIPIO).....	25
TABLA 2 ENSAYO DE COLORIMETRÍA EN AGREGADO FINO (ARENA).....	26
TABLA 3 ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS.....	27
TABLA 4 ENSAYO DE CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS.....	28
TABLA 5. ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS	29
TABLA 6. ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTADA (AGREGADO GRUESO).....	30
TABLA 7. ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTADA (AGREGADO FINO).....	31
TABLA 8. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADO GRUESO (RIPIO)	32
TABLA 9 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADO FINO (ARENA)	33
TABLA 10 ENSAYO DENSIDAD ABSOLUTA DEL CEMENTO	34
TABLA 11 ASENTAMIENTOS POR TIPO DE CONSTRUCCIÓN.....	35
TABLA 12 TAMAÑOS MÁXIMOS DE GRAVA RECOMENDADOS PARA VARIOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN	35
TABLA 13 CANTIDADES APROXIMADAS DE AGUA DE MEZCLADO	36
TABLA 14 RELACIÓN AGUA/CEMENTO.....	36
TABLA 15 VOLUMEN DE GRAVA SECA Y COMPACTADA POR UNIDAD DE VOLUMEN DE HORMIGÓN PARA DIFERENTES MÓDULOS DE FINURA DE LA ARENA.....	37
TABLA 16 RESUMEN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LOS AGREGADOS DE LA MINA SAN JOAQUÍN.	37
TABLA 17 RESUMEN DE PARÁMETROS PARA DISEÑO DE LA MEZCLA	38
TABLA 18 INTERPOLACIÓN DE VOLUMEN DE GRAVA SECA Y COMPACTADA.....	38
TABLA 19 PARÁMETROS PARA DISEÑO DE LA MEZCLA DE AGREGADO GRUESO	39
TABLA 20 PARÁMETROS PARA DISEÑO DE LA MEZCLA DE AGREGADO FINO	39
TABLA 21 VOLUMEN Y MASA DE AGREGADO FINO.....	40
TABLA 22 DOSIFICACIÓN AL PESO	40
TABLA 23 CANTIDAD DE HORMIGÓN SOLICITADO.....	40
TABLA 24 DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN CON MATERIAL RECICLADO	41
TABLA 25 ENSAYO A COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS MUESTRA PATRÓN	43
TABLA 26 ENSAYO A COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS 6% DE MATERIAL RECICLADO	44
TABLA 27 ENSAYO A COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS 8% DE MATERIAL RECICLADO	45

TABLA 28 ENSAYO A COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS 10% DE MATERIAL RECICLADO	46
TABLA 29 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN F_c , MUESTRA PATRÓN Y PORCENTAJE DE MATERIAL RECICLADO.....	47
TABLA 30 MÓDULO DE ELASTICIDAD MUESTRA PATRÓN	49
TABLA 31 PROMEDIO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA MUESTRA PATRÓN.....	50
TABLA 32 CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 6% DE MATERIAL RECICLADO	50
TABLA 33 PROMEDIO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 6% DE MATERIAL RECICLADO	51
TABLA 34 CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 8% DE MATERIAL RECICLADO	51
TABLA 35 PROMEDIO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 8% DE MATERIAL RECICLADO	52
TABLA 36 CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 10% DE MATERIAL RECICLADO	52
TABLA 37 PROMEDIO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 10% DE MATERIAL RECICLADO	53
TABLA 38 RESUMEN DE MÓDULO DE ELASTICIDAD EXPERIMENTAL.....	53
TABLA 39 FACTORES PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA UN HORMIGÓN DE 300 KG/CM ²	55
TABLA 40 ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD OBTENIDO	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA No. 1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	13
FIGURA No. 2 CEMENTO “ARMADURO”	15
FIGURA No. 3 ENSAYO DEL CONO DE ABRAMS	17
FIGURA No. 4 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA TÍPICA DEL CONCRETO, CON CARGA DE CORTO PLAZO.	20
FIGURA No. 5 ENFOQUES PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD MEDIANTE LA CURVA TENSIÓN -DEFORMACIÓN	21
FIGURA No. 6 ESQUEMA DE LOS MODELOS DE FRACTURA TÍPICOS	22

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO No. 1 GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO (RIPIO)	32
GRÁFICO No. 2 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO (ARENA).....	33
GRÁFICO No. 3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPA)	48
GRÁFICO No. 4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (KG/CM ²)	48
GRÁFICO No. 5 MÓDULO DE ELASTICIDAD MPA.....	54
GRÁFICO No. 6 MÓDULO DE ELASTICIDAD KG/CM ²	54
GRÁFICO No. 7 FACTOR DE MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPA)	55
GRÁFICO No. 8 FACTOR DE MÓDULO DE ELASTICIDAD (KG/CM ²)	56

RESUMEN EJECUTIVO

El diseño estructural es un proceso secuencial en el que se determina la geometría y uso de la estructura, el análisis de carga, análisis estructural, diseño o dimensionamiento de los elementos para resistir esfuerzos, cumplimiento de requisitos de la normativa de diseño y posterior dibujo de planos de detalles constructivos; los cuales garantizan que una estructura sea segura y funcional.

Uno de los materiales más indispensables en la construcción es el hormigón, el mismo que está compuesto por cemento, agua y materiales pétreos y eventualmente aditivos. Dentro del diseño estructural es fundamental conocer el módulo de elasticidad del hormigón, siendo este una propiedad mecánica que permite caracterizar el comportamiento elástico del hormigón.

El módulo de elasticidad del hormigón esta dado por ecuaciones en normativas como la American Concrete Institute -ACI, y la Norma Ecuatoriana de la Construcción-NEC15, sin embargo, de acuerdo a varias investigaciones que se han realizado en el Ecuador, en relación al módulo de elasticidad del hormigón, se ha determinado que este valor depende de las propiedades del agregado. Es por eso que, mediante pruebas de laboratorio de los agregados del sector y de la resistencia del hormigón se puede precisar el módulo de elasticidad para llegar a un diseño estructural más confiable.

En relación a aspectos ambientales, se requiere contribuir desde el sector de la construcción, disminuyendo la contaminación ambiental de escombros y convertirlos en material reciclado para elaboración de nuevos hormigones, en dosificaciones adecuadas, alcanzado resistencias a la compresión del hormigón para elementos de edificaciones.

El reciclaje inicio principalmente a la escasez de materiales, por lo que la civilización aprovechaba y reutilizaba los mismos. Materiales de construcción como la piedra, ladrillo, madera se reutilizaban para nuevas estructuras. Después de las Guerras Mundiales, se desarrollaron técnicas para triturar escombros de edificios bombardeados y reutilizarlos como material de relleno o base de nuevas construcciones. A partir de 1960, las prácticas de reciclaje empezaron a institucionalizarse dando inicio a regulaciones y normativas para una gestión de desechos de construcción más eficiente. Países como Estados Unidos, Japón, China, Australia, entre otros; incluyen en su normativa la obligación de reciclar un porcentaje de los desechos de construcción y demolición y en algunos incluso la reutilización de material reciclado.

CAPÍTULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. JUSTIFICACIÓN

La determinación de nuevas alternativas de construcción sostenible, implementando material reciclado para la elaboración de hormigones para elementos estructurales, contribuye no solo a la contaminación ambiental sino al costo de los mismos.

En la actualidad la Norma Ecuatoriana de la Construcción-NEC15, no presenta la incorporación de material reciclado en la elaboración de hormigones en función de la resistencia a la compresión, sin afectar el comportamiento del hormigón. La aplicación de este estudio es un aporte a la normativa ecuatoriana de la construcción, para la determinar porcentajes de material reciclado de acuerdo a la resistencia del hormigón.

En varios sectores del Ecuador, se presencia escombreras o botaderos de materiales de construcción, dando un enfoque visual desagradable. Promover el manejo integral de residuos de la construcción es un aporte amigable al medio ambiente.

Además, es indispensable conocer los valores de módulos de elasticidad más exactos, a través de los ensayos de los agregados que se van a utilizar en la mezcla de hormigón, ya que es un parámetro que influye en el cálculo de las deflexiones, derivas y rigidez de la estructura.

Al tener variaciones en las propiedades mecánicas del hormigón pueden tener repercusión sobre el comportamiento estructural real de la construcción, en relación a nivel de deformaciones y respuesta sísmica.

1.1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El área de la construcción viene generando grandes avances para el desarrollo de las zonas urbanas y rurales, sin embargo, esto genera un gran impacto ambiental. El uso de materiales pétreos para la fabricación de materiales de la construcción, entre ellos hormigones, plantea la necesidad de implementar nuevas alternativas para su desarrollo.

Por lo que, se desea obtener del módulo de elasticidad para un hormigón de $f'c=300$ kg/cm², elaborado con material reciclado de adoquín, cemento “Armaduro” y material granular de la mina “San Joaquín” ubicada en el cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi.

De esta manera se aplica un proceso técnico para reducir la explotación de nuevas canteras, sustituyendo el material fino por material reciclado de adoquines. A la vez conocer el módulo de elasticidad para hormigones con materiales específicamente de la mina “San Joaquín” con inclusión de material reciclado, parámetro importante para el análisis y diseño estructural de edificaciones.

Si bien en el Ecuador no se ha planteado normas o leyes que regulen el manejo integral de residuos de construcción y demolición, la aplicación de este ensayo será un paso para determinar los porcentajes de material reciclado para obtener un hormigón de $f'c=300\text{kg/cm}^2$, sin alterar sus características.

1.1.3. CONTEXTUALIZACIÓN DEL TEMA U OBJETO

Obtener el porcentaje adecuado de material reciclado para obtener un hormigón de $f'c=300\text{Kg/cm}^2$.

1.1.4. OBJETIVOS

1.1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener la ecuación del módulo de elasticidad para la muestra patrón de $f'c= 300\text{ kg/cm}^2$ y obtener las ecuaciones del módulo de elasticidad para tres tipos de porcentajes 6%, 8% 10% de incremento de material reciclado.

1.1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las características de los materiales granulares para la muestra patrón de $f'c= 300\text{ kg/cm}^2$.
- Obtener el diseño eficiente del hormigón de $f'c=300\text{ kg/cm}^2$ utilizando cemento “armaduro” y material granular de la mina “San Joaquín” de la ciudad de Latacunga de la Provincia de Cotopaxi.
- Determinar la resistencia del hormigón añadiendo el 6%, 8% y 10% de material reciclado de adoquín como material fino y obtener el módulo de elasticidad.

1.1.5. ALCANCE

Implementar un porcentaje de material reciclado de adoquín para un hormigón de resistencia a la compresión de 300kg/cm^2 y obtener la ecuación del módulo de elasticidad. Para lo cual, se debe definir el diseño del hormigón para dicha resistencia, con el material pétreo extraído

de la mina San Joaquín y cemento “Armaduro”; se realizará cilindros en los que se añadirá porcentajes de material reciclado de adoquín a la mezcla. Se ensayará los cilindros a los 28 días, verificando cual es el porcentaje que cumpla la resistencia y con esos resultados se obtendrá la ecuación del módulo de elasticidad para un hormigón de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$, utilizando el material de la mina San Joaquín en la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi, el mismo que será comparado con el valor propuesto por la normativa A.C.I. y la Norma Ecuatoriana de Construcción-NEC 2015.

1.1.6. METODOLOGÍAS Y TÉCNICAS

1.1.6.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El presente estudio se enfoca en la realización de ensayos experimentales mediante probetas cilíndricas para alcanzar una resistencia de hormigón de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$, con la inclusión de material reciclado.

La variable independiente se expresará en porcentajes de material reciclado como son el 6%, 8% y 10%, para la mezcla del hormigón.

La variable dependiente será la resistencia del hormigón de acuerdo a los días de curado siendo estos a los 28 días, así como también la obtención del módulo de elasticidad.

El proceso para llevar a cabo el presente estudio se describe a continuación:

- Identificar la mina de la cual se va a extraer el material pétreo, estos son agregados gruesos y finos.
- Conocer las características específicas de cada uno de los materiales como: abrasión, colorimetría, densidad real y peso específico, capacidad de absorción, contenido de humedad, densidad aparente suelta y compactada, granulometría, densidad del cemento y tiempo de fraguado del cemento, mediante ensayo de laboratorios ya realizados.
- Conocer la dosificación del diseño de hormigón para $f'c=300\text{kg/cm}^2$.
- Mediante ensayos de laboratorio se determina que la dosificación cumple la resistencia a la compresión esperada.
- Identificada la dosificación de materiales mediante el diseño de hormigones, se reemplazará porcentajes de agregado fino por porcentajes de material reciclado de adoquín.

- Una vez se determine la dosificación y porcentajes de material reciclado, se realizará los cilindros y se ensayarán a los 28 días, para verificar si cumple la resistencia requerida.
- Se obtendrá la ecuación del módulo de elasticidad para la muestra patrón y para los porcentajes de adoquín reciclado.
- Establecer conclusiones y recomendaciones.

1.1.6.2. METODOLOGÍA DOCUMENTAL

Esta metodología nos permite recopilar y analizar la información existente en relación a las investigaciones del módulo de elasticidad del hormigón, con agregados de varias minas del Ecuador. Así como también, la revisión y aplicación de normativa vigente en el Ecuador y otros países.

La normativa en relación al reciclaje de materiales de construcción en países como Colombia, Chile y España permiten construir una base más sólida en esta investigación con agregados y materiales reciclados del Ecuador.

CAPÍTULO II

2.1.MARCO TEÓRICO

2.1.1. ANTECEDENTES

El módulo de elasticidad del hormigón esta normado de acuerdo a la American Concrete Institute, 2015, mediante ecuaciones, una de ellas se establece como: $E_c=4700\sqrt{f'c}$ (en MPa), siendo $f'c$ la resistencia a la compresión del hormigón.

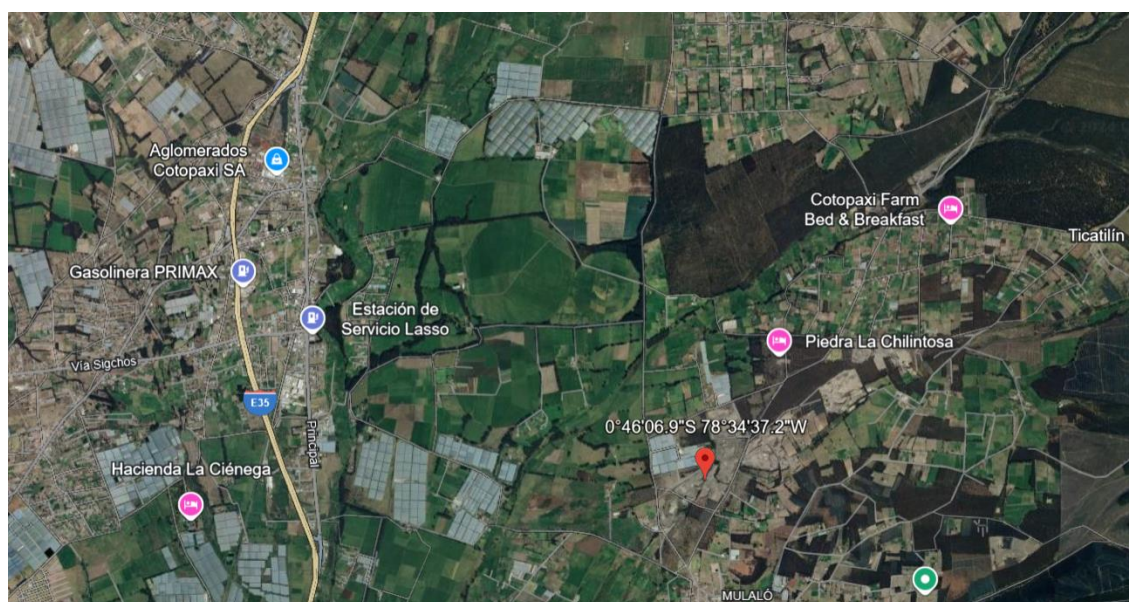
Basada en la ACI-2015, la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS-2015, establece el módulo elástico de estructuras que se diseñan para acciones sísmicas, para hormigones de densidad normal la ecuación $E_c=4.7\sqrt{f'c}$ (GPa), siendo $f'c$ la resistencia a la compresión del hormigón en (MPa).

Sin embargo, en el Ecuador se han realizado varias investigaciones para verificar que la ecuación sea aplicable para los agregados de diferentes minas que tiene el Ecuador, dando como resultado un módulo de elasticidad inferior al de la normativa vigente.

En el ámbito de la construcción, para la ciudad de Latacunga y sus alrededores se utiliza el material pétreo de la parroquia Mulaló, zona minera en la que se da la explotación de piedra pómez (chasqui), material pétreo (piedra, arena y ripio) y materiales de sedimentos de las erupciones del volcán Cotopaxi.

De acuerdo al PDYOT 2020-2023, Mulaló geográficamente se encuentra situado en la provincia de Cotopaxi al noreste de las faldas del volcán Cotopaxi, geológicamente se encuentra asentado sobre cangahuas, materiales de depósitos de lahares, coluviales y lacustres, así como de cenizas, tobas vulcano-sedimentarias y materiales conglomerados dispuestos irregularmente y recubiertos por estratos potentes de pómez de diferentes granulometrías de color blanco plomizo.

Figura No. 1 Ubicación de la zona de estudio



Fuente: <https://maps.google.com/?q=-0.768573,-78.576988>

En el sector de la construcción tanto la arena como la grava son los materiales más explotados a nivel global, inclusive llegando a superar a los combustibles fósiles. Presentando a la escasez de arena como un tema sumamente vital (Torres et al., 2017).

En el continente europeo, varios estados generan cerca de 350 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD), teniendo entre los más destacados al concreto y los escombros rocosos (Comisión Europea, 2017). Siendo un 35% de estos residuos arrojados en los diferentes vertederos que existen a nivel mundial (Kabirifar, Mohammad, Wang, & Tam, 2020). Y

según el informe del Banco Mundial, en el año 2025 llegarán a alcanzar 5000 millones de toneladas, por este motivo se está gestionando diversos métodos de reutilización para crear un ecosistema sostenible (Jayatheja et al. 2020). Además, del deber que corresponde de preservar los recursos naturales, ya que los materiales de buena calidad se están agotando (Ikau, Corina, & Tawie, 2016).

2.2.MARCO CONCEPTUAL

En Río de Janeiro, ciudad de Brasil, que en la última década ha tenido una fuerte inversión económica producto del Mundial de fútbol en el año 2014 y los Juegos Olímpicos en 2016, los que para ser posible su ejecución se tuvo que construir obras de gran envergadura, como carreteras, aeropuertos y hoteles, desencadenando fuertes cantidades de residuos de construcción y demolición (RCD) (Cruz et al. 2019). La Asociación Brasileña de Residuos de Demolición (ABRECON), indica que generan cerca de 84 Mm³/año, siendo el 70% de estos residuos desechados en vertederos (Peixoto et al. 2019). A raíz de esto, se creó una legislación de reciclaje, siempre y cuando se utilice como mínimo un 5% en otras obras civiles (Contreras et a. 2019).

Posteriormente adecuando leyes donde el reciclar no sería una opción, sino un acto que se tiene que cumplir de manera obligatoria (Brasileiro & Mato, 2015) y lograr así darle un uso adecuado, por ejemplo, ser arrojados en áreas donde se necesiten rellenos sanitarios, es decir emplear la técnica de las 3R para reducir, reutilizar y reciclar estos RCD (Patty, Bera, & Rath, 2020).

Un ejemplo de ello es que, se han realizado investigaciones en las que se ha desarrollado del uso del material reciclado, en la que (Soni & Shukla, 2021), indican que ciertos lugares de la India presentan escasez de arena, para esto, la trituración de agregados gruesos reciclados para obtener la arena es completamente necesaria, dando como resultado una arena reciclada con menor rendimiento y alta absorción de agua, respecto a la natural. Sin embargo, resulta positivo, ya que es posible utilizar esta arena precedente de agregados gruesos reciclados para elaborar concreto.

De igual forma, en Argelia estudian la creación de concretos nuevos utilizando cierto porcentaje de residuos de construcción, para comprender las características físicas y mecánicas y así concluir si es viable el uso de estos residuos (Sekkel et al. 2020), no obstante, abundan países que carecen de lineamientos para enfrentar este problema (Liu, Yi, & Wang, 2020).

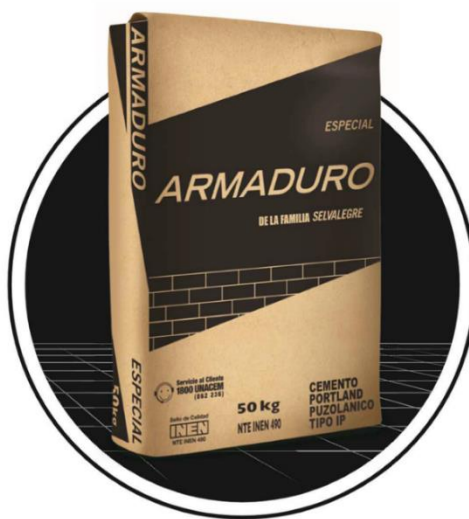
En la normativa chilena reformada en agosto de 2024, no quedó nada especificado respecto a la resistencia de los hormigones, pero en general se recomienda el uso de áridos reciclados hasta hormigones de 40 MPa. Si se considera que los hormigones que se utilizan en edificaciones de hasta 5 pisos son hormigones G25 o G30, y son además los más comercializados, incorporar un 10% de áridos reciclados no va a generar ningún inconveniente si se cumplen los requerimientos que se le piden al árido reciclado. (Viviana Letelier,2024)

2.2.1. CEMENTO

Se llaman conglomerantes hidráulicos aquellos productos que, amasados con el agua, fraguan y endurecen tanto expuestos al aire como sumergidos en agua, por ser estables en tales condiciones los compuestos resultantes de su hidratación. Los conglomerantes hidráulicos más importantes son los cementos. (García, Morán, Arroyo,2008)

En el presente estudio se aplica el cemento con nombre comercial “Armadero”, es un Cemento Portland Pozolánico Tipo IP, diseñado para la elaboración de toda clase de prefabricados de hormigón y hormigones para obras de infraestructura. Cumple con los requerimientos de la norma NTE INEN 490 (Norma Técnica Ecuatoriana) y ASTM C 595.

Figura No. 2 Cemento “ARMADURO”



Fuente: Ficha técnica cemento Armadero

2.2.2. AGREGADO PÉTREO

Los materiales pétreos se definen como aquellos materiales inorgánicos naturales o procesados por el hombre, provenientes de la roca o con una calidad similar. Los materiales pétreos, han sido utilizados desde la antigüedad en las actividades de construcción, su bajo costo y accesibilidad, han hecho que hasta el momento se constituyan como materia prima principal en esta área. (ASOBANCA, 2022).

Los agregados, son elementos que dan cuerpo al concreto, teniendo de cumplir especificaciones y proporciones de grava y arena, su tamaño requerido, limpieza, lugar de procedencia, calidad y por sus características físicas, químicas y mecánicas dependen los resultados buscados. (Zúñiga,2022).

2.2.3. HORMIGÓN

El hormigón es un material compuesto por arena, grava, cemento, agua y en algunos casos aditivos. Es un material dispuesto a durar décadas gracias a su resistencia. Se adapta según las necesidades constructivas, puede ser de diferentes tipologías y calidades. La resistencia mecánica como la durabilidad del hormigón dependen de muchos factores: tipo, clase y cantidad de cemento, características, granulometría y tamaño máximo del árido, vertido, compactación y curado del hormigón y, sobre todo, de la relación agua/cemento. (García, Morán, Arroyo,2008).

2.2.4. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

Las propiedades del hormigón pueden ajustarse ampliamente mediante la selección cuidadosa de sus componentes y su proporción en la mezcla. Estas propiedades varían desde el momento en que el hormigón es fabricado hasta después de su endurecimiento.

Por esta razón, se distingue entre hormigón fresco, que es el material recién mezclado con características como trabajabilidad y fluidez, y hormigón endurecido, que ha pasado por el proceso de fraguado y ha adquirido resistencia y durabilidad.

Las condiciones de humedad y temperatura durante la fabricación y el curado influyen significativamente en su desempeño final. Aunque el fraguado y el endurecimiento suelen considerarse etapas separadas, en realidad son parte de un mismo proceso continuo de hidratación del cemento.

2.2.5. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

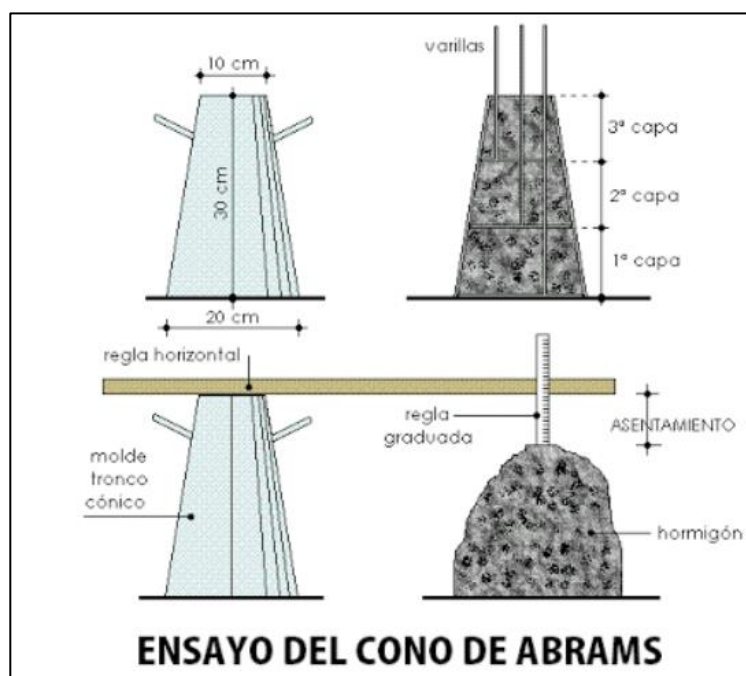
La característica del hormigón fresco es que puede moldearse por su plasticidad, es decir desde que se prepara la mezcla de hormigón hasta que inicia su tiempo de fraguado. El hormigón fresco es una mezcla heterogénea de componentes sólidos (áridos y cemento), líquidos (agua) y gaseosos (aire).

Las principales propiedades del hormigón fresco son:

2.2.5.1. Consistencia

Es la capacidad del hormigón fresco para deformarse bajo su propio peso. Se mide mediante el ensayo del cono de Abrams.

Figura No. 3 Ensayo del cono de Abrams



Fuente: <https://ingenieriaymas.com/2016/09/ensayo-del-cono-de-abrams-consistencia-del-hormigon.html>

Los hormigones pueden clasificarse por su consistencia en seca, plásticos, blandos fluidos y líquidos, siendo este último no admisible para hormigón armado.

Tabla No. 1 Consistencia del hormigón

Consistencia	Asiento en cono de Abrams (cm)
Seca (S)	0 a 2
Plástica (P)	3 a 5
Blanda (B)	6 a 9
Fluida (F)	10 a 15
Líquida (L)	≥ 16

Fuente: García, Morán y Arroyo, (2018)

2.2.5.2.Trabajabilidad

Se refiere a la capacidad del hormigón para ser mezclado, transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación. Una trabajabilidad adecuada es crucial para asegurar la uniformidad y la calidad del hormigón una vez endurecido.

2.2.5.3.Homogeneidad

Es la uniformidad en la distribución de los componentes del hormigón dentro de la mezcla. Una mezcla homogénea asegura que las propiedades del hormigón sean consistentes en toda su masa, evitando zonas débiles o defectuosas.

2.2.5.4.Densidad

Es la relación entre la masa del hormigón fresco y el volumen que ocupa. Esta propiedad influye en la resistencia y durabilidad del hormigón endurecido.

2.2.6. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

2.2.6.1.Densidad

La densidad del hormigón endurecido depende, entre otros, de la naturaleza de los áridos, de la granulometría y del método de compactación empleado (García, Morán y Arroyo, 2018). Este se refiere a la cantidad de peso del material por unidad de volumen. En un hormigón bien compactado con áridos normales, varía entre 2300-2500 kg/m³. Con áridos ligeros, oscila entre 1000-1300 kg/m³, y con áridos pesados, entre 3000-3500 kg/m³.

2.2.6.2.Compacidad

La compactación se refiere a la cantidad de material sólido dentro de un volumen determinado y está directamente relacionada con la densidad. Su valor depende de varios factores, especialmente del método de compactación utilizado al colocar el hormigón. El propósito de estos métodos es acomodar la mayor cantidad posible de áridos en el espacio disponible y asegurar que los huecos entre ellos se llenen completamente con la pasta de cemento. Además, buscan eliminar las burbujas de aire atrapadas para mejorar la resistencia y durabilidad del hormigón. (García, Morán y Arroyo, 2018).

2.2.6.3.Permeabilidad

Mide la facilidad con la que líquidos o gases pueden penetrar el hormigón. La relación agua/cemento es el factor clave: a mayor proporción de agua, mayor permeabilidad y menor durabilidad. Cuanto mayor es esta relación mayor es la permeabilidad y por tanto más expuesto el hormigón a potenciales agresiones.

2.2.6.4.Resistencia

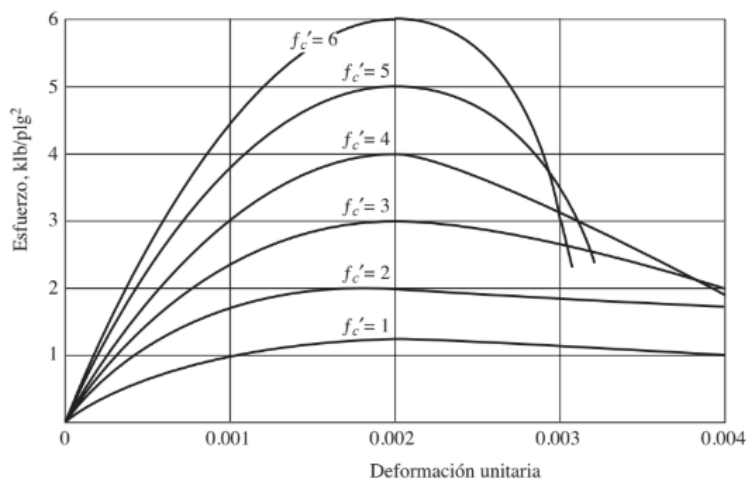
La resistencia a la compresión del concreto se determina por medio de pruebas a la falla de cilindros de concreto de 15cm x 30cm, de 28 días a una velocidad especificada de carga. Durante el periodo de 28 días, los cilindros suelen mantenerse sumergidos en agua. Para aplicaciones comunes, se utilizan concretos con resistencias de 210 a 280 kg/cm². En estructuras de concreto presforzado, se emplean resistencias de 350 a 420 kg/cm². Para aplicaciones especiales, como en columnas de los pisos inferiores de edificios altos, se pueden alcanzar resistencias de 630 a 700 kg/cm², suministradas por empresas de concreto premezclado. (MacCormac & Brown,2018)

2.2.7. MÓDULO DE ELASTICIDAD

El concreto no tiene un módulo de elasticidad bien definido. Su valor varía con las diferentes resistencias del concreto, con la edad de éste, con el tipo de carga, las características y proporciones del cemento y los agregados. (MacCormac & Brown,2018)

El módulo de elasticidad del concreto es una propiedad mecánica que refleja su capacidad para deformarse elásticamente. La ACI 318-19 (American Concrete Institute), sección 19, numeral 19.2.2.1; la contextualiza como la relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material.

Figura No. 4 Curva esfuerzo-deformación unitaria típica del concreto, con carga de corto plazo.



Fuente: McCormac, 2018. Diseño de concreto reforzado.

Esta normativa permite calcular el módulo de elasticidad mediante:

- Para valores de w_c entre 1440 y 2560 kg/m^3 : $E_c = w_c^{1.5} \cdot 0.043 \sqrt{f'_c}$ (en MPa) [19.2.2.1.a]
- Para concreto de peso normal: $E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$ (en MPa) [19.2.2.1.b]

w_c : Densidad, peso unitario del concreto de peso normal o densidad de equilibrio del concreto liviano, kg/cm^3 .

El módulo de elasticidad del concreto es sensible a parámetros como las características de los agregados, la dosificación de la mezcla, la adherencia entre la mezcla agua-cemento y el agregado, así como también la edad del hormigón. La exactitud del valor del módulo de elasticidad, durante la construcción, compromete diferencias entre los valores medidos y los valores calculados de la deflexión, deriva, período de vibración y otros parámetros de dependen del módulo de elasticidad.

La importancia de obtener el módulo de elasticidad más preciso, especialmente para estructuras con deflexiones críticas, edificios altos o estructuras en las cuales las deformaciones axiales o la rigidez lateral puedan afectar el comportamiento sísmico, se lo puede determinar mediante ensayos de laboratorios.

2.2.7.1. Módulo de elasticidad experimental

La norma ASTM C 469 (American Society for Testing and Materials, 2014), establece el procedimiento para obtener el módulo de elasticidad mediante la siguiente ecuación:

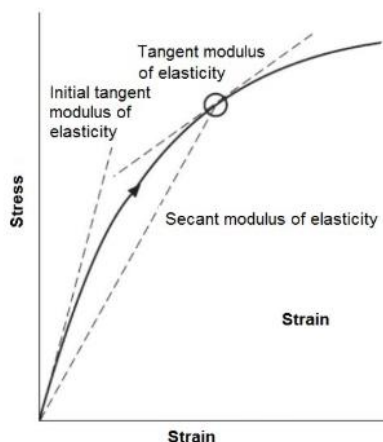
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{\varepsilon_2 - 0.00005}$$

Dónde:

- E es el módulo estático de elasticidad del hormigón en MPa
- σ_1 es el esfuerzo en MPa correspondiente a una deformación unitaria de 0,00005
- σ_2 es el esfuerzo correspondiente al 40% de la máxima resistencia.
- ε_2 es la deformación unitaria que ocurre en ese punto.

En base a ensayos estáticos, se puede obtener el módulo de elasticidad, varía según los puntos considerados de la curva tensión-deformación. El módulo tangente inicial es la pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación en el origen de la curva. El módulo por tangente es la pendiente de una tangente a la curva en algún punto de ésta. El módulo por secante está representado por la pendiente de la recta secante a la curva desde el origen hasta cualquier punto en la curva.

Figura No. 5 Enfoques para determinar el módulo de elasticidad mediante la Curva tensión -deformación



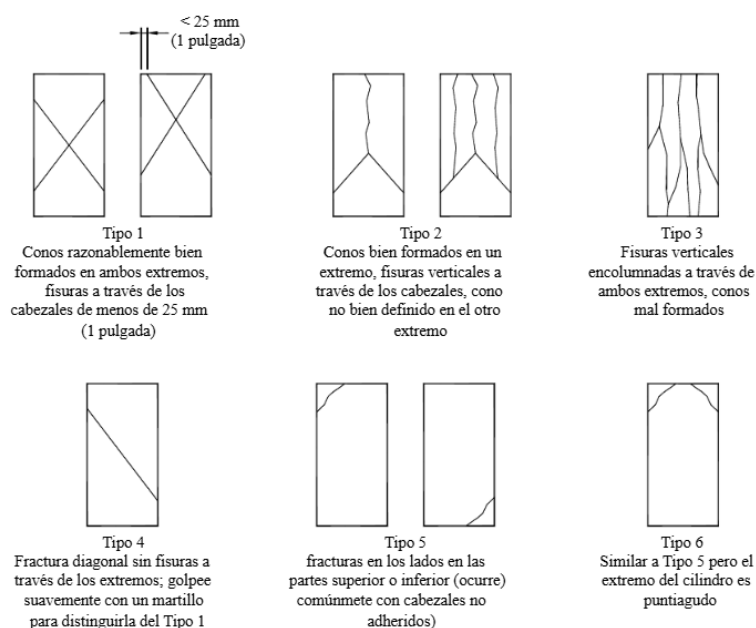
Fuente: <https://www.sonelastic.com/es/fundamentos/bases/ensayo-de-hormig%C3%B3n.html>

2.2.8. TIPOS DE FALLA

Cuando el hormigón alcanza el esfuerzo máximo a la compresión, es decir en el pico de la curva entre el esfuerzo y la deformación, se alcanza la densidad crítica de fisuras. Después de este pico, se presenta una reducción del esfuerzo global en la probeta, acompañada del decrecimiento de la deformación en las zonas no fisuradas, y el aumento de esta en la zona fisurada. (Amaya, 2021)

El ASTM (American Society for Testing and Materials) presenta el esquema de los modelos de fractura típicos.

Figura No. 6 Esquema de los modelos de fractura típicos



Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC673/ American Society for Testing and Materials (2017).

2.2.9. HORMIGÓN RECICLADO

Son hormigones reciclados (HR) los que se fabrican con árido grueso reciclado procedente de trituración de residuos de hormigón. Cuando el porcentaje de árido reciclado no supera el 20 % todas las características del hormigón reciclado (peso específico, resistencias, módulo de deformación longitudinal, retracción, fluencia, fisuración, deformaciones, etc.) son análogas a las

del hormigón convencional, por lo que no es necesario variar ningún parámetro, fórmula, etc. Por el contrario, si el porcentaje de árido reciclado es superior al 20 % puede haber diferencias más o menos acusadas, según se irá viendo en los apartados que siguen. El tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4 mm. (García, Morán y Arroyo, 2018)

Sin embargo, el gobierno español, considera únicamente la utilización de arenas recicladas procedentes del triturado de residuos de hormigón puro. Para la fabricación de hormigones estructurales, se recomienda la utilización de arenas recicladas de buena calidad, que presenten una humedad crítica inferior al 10%. Para la fabricación de hormigones no estructurales y morteros se puede admitir la utilización de arenas recicladas con humedad crítica hasta el 13%. (Ministerio de transportes y Movilidad sostenible. Gobierno de España.)

Aunque se utilicen arenas recicladas de alta calidad y en pequeñas cantidades, las características mecánicas y la durabilidad del hormigón estructural pueden deteriorarse notablemente. Por ello, se sugiere limitar la inclusión de arena reciclada a un máximo del 10%. Con esta restricción, se espera que el hormigón resultante no sufra más de un 10% de reducción en la resistencia a compresión y un 5% en el módulo de elasticidad. Además, los ajustes en la mezcla, como aumentar la cantidad de cemento o disminuir la relación agua/cemento para compensar la pérdida de resistencia, también asegurarán un comportamiento adecuado en pruebas de penetración de agua y en procesos de carbonatación del hormigón. (Ministerio de transportes y Movilidad sostenible. Gobierno de España.)

De acuerdo a la normativa chilena se manifiesta lo siguiente: “En la normativa no quedó nada especificado respecto a la resistencia de los hormigones, pero en general se recomienda el uso de áridos reciclados hasta hormigones de 40 MPa. Si se considera que los hormigones que se utilizan en edificaciones de hasta 5 pisos son hormigones G25 o G30, y son además los más comercializados, incorporar un 10% de áridos reciclados no va a generar ningún inconveniente si se cumplen los requerimientos que se le piden al árido reciclado”. (Letelier, 2024)

CAPÍTULO III

3.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS DE LA MINA SAN JOAQUÍN.

Se seleccionó la mina “San Joaquín”, del sector de Mulaló del cantón Latacunga, de donde se obtuvo el agregado grueso o ripio triturado de tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ pulgada. El agregado fino es producto de la pulverización del agregado grueso.

Se indica que los ensayos de los materiales de las características de los agregados para la elaboración del hormigón fueron tomadas de la tesis de Ingeniería Civil “MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN EN BASE A SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE $f'c = 21\text{MPa}$ Y 30MPa .”, (*Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012*); debido a que el objetivo general del presente estudio es “Obtener la ecuación del módulo de elasticidad para la muestra patrón de $f'c = 300\text{ kg/cm}^2$ y obtener las ecuaciones del módulo de elasticidad para tres tipos de porcentajes 6%, 8% 10% de incremento de material reciclado”.

3.1.1. ABRASIÓN

El ensayo de abrasión se realiza con la máquina de los ángeles, la misma que consta de un tambor de acero cilíndrico y hueco, adicional tiene un motor conectado al eje del tambor de acero ocasionando un movimiento rotacional, junto con esferas sólidas de acero, generando una fuerza abrasiva que desgasta los agregados, expresando como resultado un coeficiente de uniformidad, tomado de acuerdo al porcentaje de pérdidas con respecto a la masa inicial.

Esta propiedad permite conocer el efecto de desgaste por fricción, en los agregados gruesos. Con esta se conoce la durabilidad y resistencia que tendrá el concreto.

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM C-131 (NTE INEN 0861:83).

En la Tabla 1, se presenta los resultados del ensayo de abrasión a agregado grueso (ripio), de la mina San Joaquín:

Tabla 1 Ensayo de abrasión agregado grueso (ripió)

ENSAYO DE ABRASIÓN AGREGADO GRUESO (RIPIO)													
NORMA: ASTM C 131 (NTE INEN 0861:83)													
ORIGEN: MULALÓ: MINA “SAN JOAQUIN” FECHA: 15-03-2011													
MUESTRA N°1													
GRADUACIÓN A													
<table border="1"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">RETIENE</th> <th style="width: 50%;">MASA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1250±25</td> </tr> <tr> <td>3/4</td> <td>1250±25</td> </tr> <tr> <td>1/2</td> <td>1250±10</td> </tr> <tr> <td>3/8</td> <td>1250±10</td> </tr> </tbody> </table>				RETIENE	MASA	1	1250±25	3/4	1250±25	1/2	1250±10	3/8	1250±10
RETIENE	MASA												
1	1250±25												
3/4	1250±25												
1/2	1250±10												
3/8	1250±10												
		MUESTRA No.1	MUESTRA No.1										
1	Masa inicial	5010.00 g	5020.50 g										
2	Retenido en el tamiz N° 12 después de 100 revoluciones	4557.80 g	4554.50 g										
3	Pasa de el tamiz N° 12 después de 100 revoluciones	447.70 g	458.80 g										
4	Pérdida después de 100 revoluciones	452.20 g	466.00 g										
5	Porcentaje de pérdida después de 100 revoluciones	9.03%	9.28%										
6	Retenido en el tamiz N° 12 después de 500 revoluciones	2875.20 g	2908.60 g										
7	Pérdida después de 500 revoluciones	2134.80 g	2111.9 g										
8	Porcentaje de pérdida después de 500 revoluciones	42.61%	42.07%										
9	Coefficiente de uniformidad	0.21	0.22										

Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

3.1.2. COLORIMETRÍA

Según García, Á., Pérez, J., & López, C. (2019), definen la colorimetría de agregados pétreos como el estudio y medición del color de las arenas, gravas o piedras trituradas utilizadas para mezclas de

hormigón. La colorimetría de agregados pétreos es importante ya que ciertos colores indican propiedades específicas, ya sean estos minerales o impurezas, evaluando así las características de los agregados. Cabe resaltar que el color de los agregados también influye en la resistencia al envejecimiento, o la exposición de condiciones ambientales. En la Tabla 2, se presenta el resultado del ensayo de colorimetría del agregado fino de la mina San Joaquín:

Tabla 2 Ensayo de colorimetría en agregado fino (arena)

ENSAYO DE COLORIMETRÍA EN AGREGADO FINO (ARENA)		
NORMA: ASTM C 40 (NTE INEN 0855:2010 1R)		
ORIGEN: MULALÓ: MINA “SAN JOAQUIN” FECHA: 15-03-2011		
FIGURA	COLOR	PROPIEDADES
1	Blanco a claro Transparente	Arena de muy buena calidad por no contener materia orgánica, limo o arcillas
2	Amarillo pálido	Arena de poca presencia de materia orgánica, limos o arcillas. Se considera de buena calidad
3	Amarillo encendido	Contiene materia orgánica en altas cantidades. Puede usarse en hormigones de baja resistencia.
4	Café	Contiene materia orgánica en concentraciones muy elevadas. Se considera de mala calidad.
5	Café Chocolate	Arena de muy mala calidad. Existe demasiada materia orgánica, limos o arcilla. No se usa
RESULTADO DEL ENSAYO		
Blanco a claro transparente, la muestra no contiene presencia de materia orgánica.		

Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

3.1.3. DENSIDAD REAL (PESO ESPECÍFICO)

En la Tabla 3, se indica los resultados del ensayo de peso específico promedio del agregado grueso de 2.472 g/cm^3 ; y el peso específico promedio del agregado fino 2.296 g/cm^3 . Agregados de la mina San Joaquín.

Tabla 3 Ensayos de peso específico de los agregados

ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS						
NORMA: ASTM C – 127 y C - 128 (NTE INEN 0856:83 y 0857:83)						
ORIGEN: MULALÓ: MINA “SAN JOAQUIN” FECHA: 15-03-2011						
AGREGADO GRUESO						
Masa del recipiente + ripio en SSS	g	2240.90	2156.40	2143.70	1959.00	2484.10
Masa del recipiente	g	148.40	130.40	130.40	130.40	130.40
Masa del ripio en SSS	g	2092.50	2026.00	2013.30	1828.60	2353.70
Masa de la canastilla sumergida en agua	g	1664.00	1656.00	1653.00	1654.00	1650.00
Masa de la canastilla + ripio sumergido en agua	g	2909.00	2856.00	2853.00	2746.00	3053.00
Masa del ripio en agua	g	1245.00	1200.00	1200.00	1092.00	1403.00
Volumen desalojado	cm ³	847.50	826.00	813.30	736.60	950.70
Peso específico	g/cm ³	2.47	2.45	2.48	2.48	2.48
Peso específico (promedio)	g/cm ³	2.472				
Peso específico (promedio)	kg/m ³	2472				
AGREGADO FINO						
Masa del picnómetro	g	173.80	157.4	157.40	173.80	173.80
Masa del picnómetro + arena en SSS	g	633.30	530.80	463.60	461.70	502.30
Masa de arena en SSS	g	459.50	373.40	306.20	287.90	328.50
Masa del picnómetro calibrado	g	672.30	655.90	655.90	672.30	672.30
Masa del picnómetro + arena + en SSS + agua	g	929.80	867.20	828.70	835.10	857.90
Masa de arena en agua	g	257.50	211.30	172.80	162.80	185.60
Volumen desalojado	cm ³	202.00	162.10	133.40	125.10	142.90
Peso específico	g/cm ³	2.28	2.30	2.30	2.30	2.30
Peso específico (promedio)	g/cm ³	2.296				
Peso específico (promedio)	kg/m ³	2296				

Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

3.1.4. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN

En la Tabla 4, se indica la capacidad de absorción promedio del agregado grueso con 2.40 % y la capacidad de absorción promedio del agregado fino con 1.32%.

Tabla 4 Ensayo de capacidad de absorción de los agregados

ENSAYO DE CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS						
NORMA: ASTM C – 70 (NTE INEN 0856:83 y 0857:83)						
ORIGEN: MULALÓ: MINA “SAN JOAQUIN” FECHA: 16-03-2011						
AGREGADO GRUESO						
Masa del recipiente	g	129.40	271.40	137.70	130.60	191.70
Masa del recipiente + ripio SSS	g	2277.90	1498.40	2120.70	2276.90	2165.50
Masa del recipiente + ripio seco	g	2228.00	1469.80	2074.90	2226.80	2117.30
Masa del agua	g	49.90	28.60	45.80	50.10	48.20
Masa del ripio seco	g	2098.60	1198.40	1937.20	2096.20	1925.60
Capacidad de absorción	%	2.38	2.39	2.36	2.39	2.50
Capacidad de absorción (promedio)	%	2.40				
AGREGADO FINO						
Masa del recipiente	g	193.30	195.30	209.20	130.40	129.40
Masa del recipiente + ripio SSS	g	727.90	618.30	693.10	738.50	727.80
Masa del recipiente + ripio seco	g	721.10	612.80	686.10	730.40	720.10
Masa del agua	g	6.80	5.50	6.40	8.10	7.70
Masa del ripio seco	g	527.80	417.50	475.50	600.00	590.70
Capacidad de absorción	%	1.29	1.32	1.34	1.35	1.30
Capacidad de absorción (promedio)	%	1.32				

Fuente: Arequipa- Caba- Garzón- Vargas, 2012

3.1.5. CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad del agregado grueso es de 0.20% y el contenido de humedad del agregado fino es de 2.27%, según la Tabla 5:

Tabla 5. Ensayo de contenido de humedad de los agregados

ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS						
NORMA: ASTM C – 566 (NTE INEN 0862:83)						
ORIGEN: MULALÓ: MINA “SAN JOAQUIN” FECHA: 22-03-2011						
AGREGADO GRUESO						
Masa del recipiente + ripio húmedo	g	1129.70	910.70	1866.20	636.90	1610.80
Masa del recipiente + ripio seco	g	1127.90	909.30	1863.10	635.40	1607.50
Masa del recipiente	g	129.40	130.40	191.50	56.50	137.70
Masa del agua	g	1.80	1.40	3.10	1.50	3.30
Masa del ripio seco	g	998.50	778.90	1671.60	578.90	1469.80
Porcentaje de humedad	%	0.18	0.18	0.19	0.26	0.22
Porcentaje de humedad	%	0.20				
AGREGADO FINO						
Masa del recipiente + arena húmeda	g	876.50	850.80	1108.20	1010.70	875.00
Masa del recipiente + arena seca	g	858.80	832.20	1087.20	990.00	863.10
Masa del recipiente	g	20.80	137.30	137.80	186.30	186.60
Masa del agua	g	17.70	18.60	21.00	20.70	11.90
Masa del ripio seco	g	838.00	694.90	949.40	803.70	676.50
Porcentaje de humedad	%	2.11	2.68	2.21	2.58	1.76
Porcentaje de humedad	%	2.27				

Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

3.1.6. DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTA

Respecto al agregado grueso, la densidad aparente suelta es 1.26 g/cm³, y la densidad aparente compactada es de 1.41 g/cm³, según se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6. Ensayo de densidad aparente suelta y compactada (agregado grueso)

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTADA						
NORMA: ASTM C – 29 (NTE INEN 0858:83)						
ORIGEN: MULALÓ: MINA “SAN JOAQUÍN” FECHA: 21-03-2011; 25-03-2011						
AGREGADO GRUESO (RIPIO)						
DENSIDAD APARENTE SUELTA						
Masa del recipiente vacío	g	5233.00	5378.00	5233.00	5378.00	5378.00
Volumen del recipiente vacío	cm ³	15710.00	15810.00	15710.00	15810.00	15810.00
Masa del ripio suelto + recipiente						
Primera muestra	kg	24.50	24.40	24.90	25.90	25.50
Segunda muestra	kg	25.00	24.80	25.00	25.40	25.20
Tercera muestra	kg	24.80	25.40	24.80	25.20	25.30
Cuarta muestra	kg	24.90	25.80	24.10	25.20	25.00
Quinta muestra	kg	25.20	25.80	25.20	-	-
Promedio	kg	24.88	25.24	25.05	25.43	25.25
Densidad aparente suelta del ripio	g/cm³	1.25	1.26	1.26	1.27	1.26
Densidad aparente suelta del ripio (Prom)	g/cm³	1.26				
DENSIDAD APARENTE COMPACTADA						
Masa del recipiente vacío	g	5233.00	5378.00	5233.00	5378.00	5378.00
Volumen del recipiente vacío	cm ³	15710.00	15810.00	15710.00	15810.00	15810.00
Masa del ripio suelto + recipiente						
Primera muestra	kg	27.40	27.30	27.30	27.80	27.50
Segunda muestra	kg	27.00	27.40	27.50	27.70	27.30
Tercera muestra	kg	27.30	27.60	27.40	27.70	27.90
Cuarta muestra	kg	27.10	27.00	27.50	27.50	28.20
Quinta muestra	kg	27.80	27.80	27.50	-	-
Promedio	kg	27.32	27.42	27.44	27.68	27.73
Densidad aparente compactada del ripio	g/cm³	1.41	1.39	1.41	1.41	1.41
Densidad aparente compactada del ripio (Prom)	g/cm³	1.41				

Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

En relación al agregado fino, la densidad aparente suelta es 1.50 g/cm^3 , y la densidad aparente compactada es de 1.67 g/cm^3 , según se indica en la Tabla 7.

Tabla 7. Ensayo de densidad aparente suelta y compactada (agregado fino)

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTADA						
NORMA: ASTM C – 29 (NTE INEN 0858:83)						
ORIGEN: MULALÓ: MINA “SAN JOAQUÍN” FECHA: 21-03-2011; 28-03-2011						
AGREGADO FINO (ARENA)						
DENSIDAD APARENTE SUELTA						
Masa del recipiente vacío	g	1983.00	1981	1983	1983	1942
Volumen del recipiente vacío	cm ³	2924.00	2891	2924	2924	2928
Masa del ripio suelto + recipiente						
Primera muestra	kg	6421	6340	6254	6390	6391
Segunda muestra	kg	6488	6348	6338	6356	6375
Tercera muestra	kg	6495	6349	6376	6410	6347
Cuarta muestra	kg	6254	6348	6345	6358	6367
Quinta muestra	kg	6338	6351	6410	6367	6295
Promedio	kg	6399	6347	6340	6380	6360
Densidad aparente suelta del ripio	g/cm ³	1.51	1.51	1.49	1.50	1.51
Densidad aparente suelta del ripio (Prom)	g/cm ³	1.50				
DENSIDAD APARENTE COMPACTADA						
Masa del recipiente vacío	g	1983.00	1981.00	1983	1983	1942
Volumen del recipiente vacío	cm ³	2924.00	2891.00	2924	2924	2928
Masa del ripio suelto + recipiente						
Primera muestra	kg	6967	6895	6867	6913	6844
Segunda muestra	kg	7000	6867	6845	6875	6812
Tercera muestra	kg	6905	6854	6879	6877	6798
Cuarta muestra	kg	6867	6806	6898	6914	6805
Quinta muestra	kg	6845	6800	6856	6899	6824
Promedio	kg	6920	6844	6870	6900	6820
Densidad aparente compactada del ripio	g/cm ³	1.67	1.68	1.67	1.68	1.66
Densidad aparente compactada del ripio (Prom)	g/cm ³	1.67				

Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

3.1.7. GRANULOMETRÍA

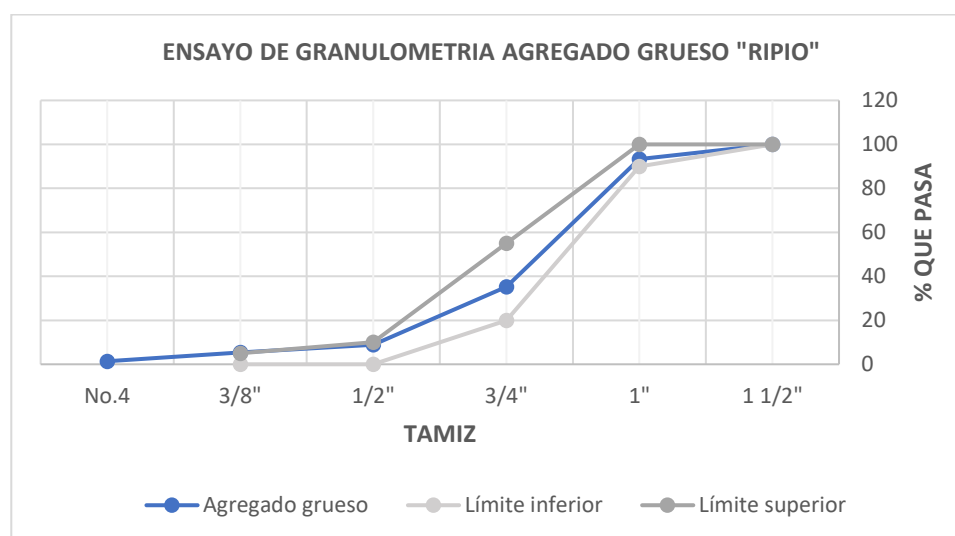
La Tabla 8, se presenta los resultados del ensayo de granulometría del agregado grueso de la mina San Joaquín. Así como también se observa en el Gráfico 1 que el agregado grueso se encuentra entre los límites inferior y superior.

Tabla 8. Ensayo de granulometría de agregado grueso (ripio)

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADO GRUESO (RIPIO)					
NORMA: ASTM C – 136 (NTE INEN 0696:83)					
ORIGEN: MULALÓ: MINA "SAN JOAQUÍN" FECHA: 25-03-2011					
TAMIZ	RETENIDO		%RETENIDO	%PASA	LÍMITES ESPECÍFICOS
	PARCIAL	ACUMULADO			
2"	-	-	0	100	-
1 1/2"	0	0	0	100	100
1"	340.96	340.96	7	93	90-100
3/4"	2956.56	3297.52	65	35	20-55
1/2"	1335.94	4633.46	91	9	0-10
3/8"	178.24	4811.7	95	5	0-5
No.4	205.98	5017.68	99	1	-
No.8	24.06	5041.74	99	1	-
No.16	7.32	5049.06	99	1	-
No.30	4.74	5053.8	99	1	-
Bandeja	33.8	5087.6	100	0	-
<i>Módulo de finura</i>			6.56		

Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

Gráfico No. 1 Granulometría agregado grueso (ripio)



Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

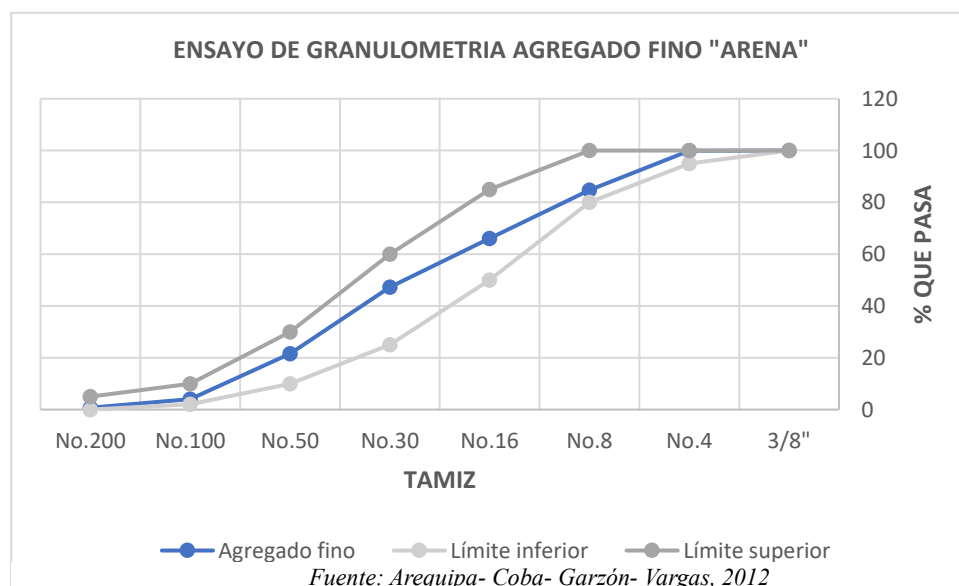
Los resultados del ensayo de granulometría del agregado fino de la mina San Joaquín, se presentan en la Tabla 9. Así como también se observa en el Gráfico 2 que el agregado fino se encuentra entre los límites inferior y superior.

Tabla 9 Ensayo de granulometría de agregado fino (arena)

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADO FINO (ARENA)					
NORMA: ASTM C – 136 (NTE INEN 0696:83)					
ORIGEN: MULALÓ: MINA "SAN JOAQUÍN" FECHA: 25-03-2011					
TAMIZ	RETENIDO		%RETENIDO	%PASA	LÍMITES ESPECÍFICOS
	PARCIAL	ACUMULADO			
3/8"	0	0	0	100	100
No.4	0.16	0.16	0	100	95-100
No.8	82.84	83	15	85	80-100
No.16	100.88	183.88	34	66	50-85
No.30	101.94	285.82	53	47	25-60
No.50	139.9	425.72	78	22	10-30
No.100	95.14	520.86	96	4	2-10
No.200	17.94	538.8	99	1	0-5
Bandeja	3.94	542.74	100	0	-
<i>Módulo de finura</i>			2.76		

Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

Gráfico No. 2 Ensayo de granulometría agregado fino (arena)



3.2.PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CEMENTO ARMADURO

3.2.1. DENSIDAD DEL CEMENTO

La Tabla 10, indica los resultados del ensayo de la densidad del cemento “ARMADURO”, mediante el método del picnómetro y el método de Le-Chatelier. Para el presente estudio de consideró el resultado del método de Le-Chatelier, con una densidad del cemento promedio de 3.01 g/cm³.

Tabla 10 Ensayo densidad absoluta del cemento

ENSAYO DENSIDAD ABSOLUTA DEL CEMENTO				
NORMA: NTE INEN 156:2009 (ASTM-C188)				
ORIGEN: ARMADURO ESPECIAL-LAFARGE FECHA: 20/05/2013				
MÉTODO DEL PICNOMETRO				
Masa del picnómetro vacío	g.	158.90	158.90	158.90
Masa del picnómetro + cemento	g.	458.90	446.40	423.90
Masa del cemento	g.	300.00	287.50	265.00
Masa del picnómetro + cemento + gasolina	g.	749.30	740.20	723.30
Masa del picnómetro + 500 cm ³ . de gasolina	g.	525.80	525.80	525.80
Volumen de gasolina	cm ³	104.25	99.62	91.99
DENSIDAD DEL CEMENTO	g/cm ³	2.88	2.89	2.88
DENSIDAD DEL CEMENTO (promedio)	g/cm ³	2.88		
MÉTODO DE LE-CHATELIER				
Lectura inicial del frasco de lechatelier + gasolina	cm ³	0.60	0.70	0.60
Masa del frasco + gasolina	g.	322.60	325.20	322.60
Lectura final del frasco + cemento + gasolina	cm ³	18.70	19.00	18.00
Masa final del frasco + cemento + gasolina	g.	377.10	380.60	374.80
DENSIDAD DEL CEMENTO	g/cm ³	3.01	3.03	3.00
DENSIDAD DEL CEMENTO (promedio)	g/cm ³	3.01		

Fuente: (Chiluisa J., 2014)

3.3.DOSIFICACIÓN MÉTODO ACI

3.3.1. ASENTAMIENTOS

Tabla 11 Asentamientos por tipo de construcción

Tipo de construcción	Asentamiento (cm)	
	Máximo	Mínimo
Fundaciones, paredes y zapatas reforzadas	8	2
Zapatas simples, caissons y muros de subestructura	8	2
Losas, vigas y paredes reforzadas	10	2
Columnas de edificios	10	2
Pavimentos	8	2
Construcción en masa	5	2

Fuente: American Concrete Institute, 1997

De acuerdo a la Tabla 11, para la presente investigación se escogió **10cm**, ya que se requiere obtener un hormigón de resistencia de 300kg/m^2 , para construcción de elementos de edificaciones.

3.3.2. TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO

Como se señaló en el numeral 3.1, el tamaño nominal del agregado grueso es de $\frac{3}{4}$ ". Es decir, el tamaño máximo de la grava es de 20mm.

Tabla 12 Tamaños máximos de grava recomendados para varios tipos de construcción

Dimensión Mínima de la sección (cm)	Tamaño Máximo de la Grava (mm)			
	Paredes, vigas y columnas reforzadas	Muros sin Refuerzo	Losas fuertemente armadas	Losas Ligeramente armadas o sin refuerzo
6-13	13-19	20	20-25	19-38
15-28	19-38	38	38	38-76
30-74	38-76	76	38-76	76
75 o mas	38-76	150	38-76	76-150

Fuente: Arequipa- Caba- Garzón- Vargas, 2012

3.3.3. CANTIDADES APROXIMADAS DE AGUA DE MEZCLADO

Según la Tabla 13, la cantidad aproximada de agua de mezclado, para un asentamiento de 10 cm y un tamaño de grava de 20mm, el hormigón sin inclusión de aire es de 200 lt/m^3 y la cantidad aproximada de aire atrapado en hormigón sin inclusión de aire es 2%.

Tabla 13 Cantidades aproximadas de agua de mezclado

Asentamiento cm	Agua: litros por metro cúbico de hormigón para los tamaños máximos de grava indicados (mm).							
	10	12.5	20	25	38	50	70	150
HORMIGÓN SIN INCLUSIÓN DE AIRE								
2 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en hormigón sin inclusión de aire (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
HORMIGÓN CON INCLUSIÓN DE AIRE								
2 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	-
Contenido de aire total Promedio Recomendado (%)	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

Fuente: Arequipa- Coba- Garzón- Vargas, 2012

3.3.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN BASADA EN LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO

Para un hormigón de resistencia a la compresión de $f'c=300\text{kg/cm}^2$ o 30 MPa, de acuerdo a la Tabla 14, la relación agua/cemento es de 0.52, para un hormigón sin inclusión de aire.

Tabla 14 Relación agua/cemento

Resistencia a la compresión a los 28 días (Mpa)	Relación Agua/cemento	
	Hormigón sin inclusión de aire	Hormigón con inclusión de aire
45	0.37	-
40	0.42	-
35	0.47	0.35
30	0.52	0.43
25	0.56	0.48
22	0.58	0.53

Fuente: Método ACI 211

3.3.5. VOLUMEN APARENTE DE GRAVA SECA Y COMPACTADA POR UNIDAD DE VOLUMEN DE HORMIGÓN

En base a la Tabla 9, el módulo de finura para el agregado fino es de 2.76. Interpolamos los valores en la Tabla 15, dando como resultado de volumen de grava seca y compactada por unidad de volumen de hormigón 0.624.

Tabla 15 Volumen de grava seca y compactada por unidad de volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena

Tamaño máximo de la grava (mm)	Volumen de grava seca y compactada por unidad de volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena						
	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
10	0.5	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44
12.5	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53
20	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.6
25	0.71	0.7	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65
38	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.7
50	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72
70	0.81	0.8	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75
150	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81

Fuente: Método ACI 211

3.4.DISEÑO DE MEZCLA

Requerimientos:

- Se va a utilizar moldes cilíndricos de 15cm de diámetro y 30cm de altura.
- La resistencia a la compresión requerida es $f'c=300\text{kg/cm}^2$
- Condiciones de Exposición Ambiental: Normales
- Tamaño Nominal Máximo (T.N.M): 20 mm
- Resumen de los ensayos realizados en los agregados de la mina San Joaquín.

Tabla 16 Resumen de los ensayos realizados en los agregados de la mina San Joaquín.

DESCRIPCIÓN	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO	UNIDAD
D.sss	2.296	2.472	g/cm^3
% Absorción	1.32	2.40	%
D.ap Compactada	1.67	1.41	g/cm^3
D.ap suelta	1.50	1.26	g/cm^3
Módulo de Finura	2.76	6.56	%
% Humedad	2.27	0.20	%

- Para el presente ensayo se consideró el método de LE-CHATELIER con una densidad promedio de 3.01 g/cm^3 o 3010 kg/m^3 .

Tabla 17 Resumen de parámetros para diseño de la mezcla

Parámetro	Valor	Observación
Densidad del cemento	3.01 g/cm^3	Tabla 10
Asentamiento	100 mm	Tabla 11
Tamaño Nominal Máximo Agregado Grueso	20mm (3/4")	Tabla 12
Cantidad de agua y aire incluido por m^3 de hormigón	Agua = 200 cm^3 Aire Incluido = 2%	Tabla 13
Relación Agua Cemento	0.52	Tabla 14
Masa de cemento (cantidad de agua/(A/C))	$200/0.52 =$ 384.62 kg	
Volumen de cemento (masa de cemento/densidad)	$384.62/3.01$ $127.78 \text{ dm}^3 = 0.128 \text{ m}^3$	

El contenido de cemento por metro cúbico se calcula dividiendo el contenido total de agua para la relación agua-cemento, siendo este 384.62kg.

El volumen de cemento se calcula dividiendo la masa de cemento para la densidad del cemento, dando como resultado 0.128 m^3 .

AGREGADO GRUESO

Volumen de grava seca y compactada por unidad de volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena:

$$\text{M.F.} = 2,76 \text{ (arena)}$$

Tabla 18 Interpolación de Volumen de grava seca y compactada

Tamaño máximo de la grava (mm)	Volumen de grava seca y compactada por unidad de volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena		
	2.7	2.76	2.8
20	0.63	0.624	0.62

Interpolamos estos valores para obtener el volumen de acuerdo a nuestro módulo de finura y obtenemos el siguiente valor:

$$\text{Volumen grava} = 0,624 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \text{ hormigón} \text{ ó } 624 \text{ dm}^3 / \text{m}^3 \text{ hormigón}$$

La masa de grava se calcula multiplicando la densidad aparente compactada por el volumen de grava, siendo este igual a 879.84kg, como se explica en la Tabla 19.

El volumen de grava se calcula dividiendo la masa de la grava para la densidad.

Tabla 19 Parámetros para diseño de la mezcla de agregado grueso

Parámetro	Valor	Unidades
M.F. Arena:	2.76	
D.ap Compactada	1410	kg/m ³
Volumen Grava	0.624	m ³
Masa de la grava (D.ap Compactada* Volumen Grava)	879.84	kg
D.sss	2472	kg/m ³
Volumen Grava sss (masa de la grava/D.sss)	0.356 355.92	m ³ dm ³

AGREGADO FINO

En base a la masa de grava o agregado grueso y la masa del cemento, determinamos la masa del agregado fino como se indica en la Tabla 20 y Tabla 21.

Tabla 20 Parámetros para diseño de la mezcla de agregado fino

Material	Cantidad	D. real	V. real
	kg	kg/m ³	m ³
Agua	200	1000	0.20
Cemento	384.62	3010	0.1278
Agregado grueso	879.84	2472	0.3559
Aire	-	-	0.02
		Total	0.7037

Tabla 21 Volumen y masa de agregado fino

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen de arena = (1- 0.7037)	0.2963	m ³
D.sss	2296	kg/m ³
Masa de arena (Volumen de arena* D.sss)	680.30	kg

Una vez que obtenemos la cantidad aproximada de agua, masa de cemento, masa de agregado grueso, masa de agregado fino y masa de cemento, determinamos la dosificación al peso, como se señala en la Tabla 22.

Tabla 22 Dosificación al peso

Material	Cantidad	Dosificación	Cantidad	C.A.	C.H.	Corrección		Cant. Correg.	Dosificación
	kg	peso	kg	%	%	%	kg		(peso)
Agua	200	0.52	26.00	-			-1.63	27.63	0.55
Cemento	384.62	1.00	50.00	-				50	1
Arena	680.30	1.77	88.44	1.32	2.27	0.95	0.83	89.27	1.79
Ripio	879.84	2.29	114.38	2.4	0.2	-2.2	-2.46	111.92	2.24

Se requiere elaborar cinco cilindros de hormigón para la muestra patrón, es decir se necesita 70kg de mezcla. En la Tabla 23, se describe la dosificación al peso:

Tabla 23 Cantidad de hormigón solicitado

Material	Dosificación	Cantidad
	(peso)	kg
Agua	0.55	6.9
Cemento	1.00	12.6
Arena	1.79	22.4
Ripio	2.24	28.1
Total	5.58	

3.5.DISEÑO DE HORMIGON CON MATERIAL RECICLADO

El material reciclado de adoquín se obtuvo de una vía en mantenimiento, en el que se reemplazaba por asfalto. Otros adoquines se obtuvieron como material sobrante de una constructora. Este material se trituró con el apoyo de la administración de la mina San Joaquín del

cantón Latacunga. En la Tabla 24, se indica la dosificación de la mezcla de hormigón, en el que se reemplaza el 6%, 8% y 10% de material fino por material reciclado.

Se elaboran cinco cilindros para la muestra patrón, cinco cilindros para el 6% de material reciclado, cinco cilindros para el 8% de material reciclado y cinco cilindros para el 10% de material reciclado. Dando un total de 20 cilindros para ensayarse.

Tabla 24 Dosificación de hormigón con material reciclado

Material	Muestra patrón	Muestra con material reciclado adoquín		
	(kg)	(kg)		
% Reciclado	0%	6%	8%	10%
Agua	6.9	6.8	6.8	6.8
Cemento	12.6	12.6	12.6	12.6
Arena	22.4	21.06	20.61	20.16
Reciclado	0.0	1.34	1.79	2.24
Ripio	28.1	28.1	28.1	28.1

3.6.DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EXPERIMENTAL

En aplicación de la sección 2.2.71. Módulo de elasticidad experimental, se determina el módulo de elasticidad para la muestra patrón.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{\varepsilon_2 - 0.00005}$$

Dónde:

- E es el módulo estático de elasticidad del hormigón en MPa
- σ_1 es el esfuerzo en MPa correspondiente a una deformación unitaria de 0,00005
- σ_2 es el esfuerzo correspondiente al 40% de la máxima resistencia.
- ε_2 es la deformación unitaria que ocurre en ese punto.

3.7.DETERMINACIÓN DEL FACTOR PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para poder determinar el factor para el módulo de elasticidad utilizaremos la ecuación del American Concret Institute, que se muestra a continuación:

$$E = factor * \sqrt{f'c}$$

$$factor = \frac{E}{\sqrt{f'c}}$$

3.8.DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

La ecuación del módulo de elasticidad para la muestra patrón como para los ensayos de hormigones con material reciclado de adoquín, se determinará utilizando los módulos de elasticidad experimentales y los factores obtenidos en el capítulo de resultados.

CAPÍTULO IV

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los ensayos de compresión se cilindros para determinar la resistencia y módulo de elasticidad se realizaron en el Laboratorio de suelos y materiales de construcción de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

4.1.1. Resultados de la resistencia a la compresión (f'_c) de la muestra patrón, 6%-8%-10% de material reciclado.

En la Tabla 25, se indican los resultados del Ensayo a compresión de probetas cilíndricas de la mezcla de hormigón para la muestra patrón, con una resistencia esperada de 300kg/cm^2 .

Tabla 25 Ensayo a compresión en probetas cilíndricas muestra patrón

MUESTRA PATRÓN					
Probeta No.	1	2	3	4	5
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (kg/cm^2)	300	300	300	300	300
Fecha de fabricación	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025
Fecha de ensayo	07/03/2025	07/03/2025	07/03/2025	07/03/2025	07/03/2025
Edad (días)	32	32	32	32	32
Hora de ensayo	16:11	9:37	9:51	10:14	10:27
Diámetro 1 (mm)	152.87	151.43	152.18	152.98	154.76
Diámetro 2 (mm)	153.26	151.15	152.61	153.81	153.96
Diámetro promedio (mm)	153.00	151.20	152.40	153.40	154.40
Relación entre diámetros (%)	0.26	0.19	0.28	0.54	0.53
Altura promedio (mm)	308	303	302	307	305
Relación H/D	2.01	2.00	1.98	2.00	1.98
Área (mm^2)	18385	17955	18241	18482	18723
Volumen (m^3)	0.0057	0.0054	0.0055	0.0057	0.0057
Masa (kg)	12.83	12.36	12.46	12.75	12.83
Peso unitario (kg/m^3)	2270	2270	2260	2250	2250
Carga máxima (kN)	624.6	522.2	525.1	605.7	616.8
Tipo de falla	5	4	4	4	5
Factor de corrección	1	1	1	1	1
Resistencia a la compresión (MPa)	34.0	29.1	28.8	32.8	32.9
Resistencia a la compresión (kg/cm^2)	346.80	296.82	293.76	334.56	335.58

En la Tabla 26, se indican los resultados del Ensayo a compresión de probetas cilíndricas de la mezcla de hormigón con el 6% de material reciclado.

Tabla 26 Ensayo a compresión en probetas cilíndricas 6% de material reciclado

6% DE MATERIAL RECICLADO					
Probeta No.	1	2	3	4	5
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (kg/cm ²)	300	300	300	300	300
Fecha de fabricación	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025	12/02/2025
Fecha de ensayo	06/03/2025	06/03/2025	06/03/2025	06/03/2025	06/03/2025
Edad (días)	31	31	31	31	22
Hora de ensayo	15:02	15:12	15:38	15:47	15:58
Diámetro 1 (mm)	150.32	153.36	153.18	152.11	149.27
Diámetro 2 (mm)	149.73	152.09	152.42	151.94	150.33
Diámetro promedio (mm)	150.00	152.80	152.80	152.00	149.80
Relación entre diámetros (%)	0.39%	0.83%	0.50%	0.11%	-0.71%
Altura promedio (mm)	303	305	303	303	304
Relación H/D	2.02	2.00	1.98	1.99	2.03
Área (mm ²)	17671	18337	18337	18146	17624
Volumen (m ³)	0.0054	0.0056	0.0056	0.0055	0.0054
Masa (kg)	12.18	12.38	12.4	12.36	10.55
Peso unitario (kg/m ³)	2270	2210	2230	2250	1970
Carga máxima (kN)	448.5	450.5	453.1	440.2	118.3
Tipo de falla	5	4	5	4	5
Factor de corrección	1	1	1	1	1
Resistencia a la compresión (MPa)	25.4	24.6	24.7	24.3	6.7
Resistencia a la compresión (kg/cm²)	259.08	250.92	251.94	247.86	68.34

En la Tabla 27, se indican los resultados del Ensayo a compresión de probetas cilíndricas de la mezcla de hormigón con el 8% de material reciclado.

Tabla 27 Ensayo a compresión en probetas cilíndricas 8% de material reciclado

8% DE MATERIAL RECICLADO					
Probeta No.	1	2	3	4	5
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (kg/cm ²)	300	300	300	300	300
Fecha de fabricación	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025
Fecha de ensayo	05/03/2025	05/03/2025	05/03/2025	05/03/2025	05/03/2025
Edad (días)	30	30	30	30	30
Hora de ensayo	15:00	15:20	15:40	16:00	16:20
Diámetro 1 (mm)	149.14	153.29	152.48	151.53	149.15
Diámetro 2 (mm)	150.09	153.37	153.1	151.92	150.87
Diámetro promedio (mm)	149.60	153.40	152.79	151.80	150.00
Relación entre diámetros (%)	0.64%	0.05%	0.41%	0.26%	1.15%
Altura promedio (mm)	302	307	301	300	302
Relación H/D	2.02	2.00	1.97	1.98	2.01
Área (mm ²)	17577	18482	18335	18098	17671
Volumen (m ³)	0.0053	0.0057	0.0055	0.0054	0.0053
Masa (kg)	11.92	12.76	12.39	12.01	11.87
Peso unitario (kg/m ³)	2250	2250	2240	2210	2220
Carga máxima (kN)	385.6	403.6	407.1	400.2	380.9
Tipo de falla	5	5	5	4	5
Factor de corrección	1	1	1	1	1
Resistencia a la compresión (MPa)	21.9	21.8	22.2	22.1	21.6
Resistencia a la compresión (kg/cm²)	223.38	222.36	226.44	225.42	220.32

En la Tabla 28, se indican los resultados del Ensayo a compresión de probetas cilíndricas de la mezcla de hormigón con el 10% de material reciclado.

Tabla 28 Ensayo a compresión en probetas cilíndricas 10% de material reciclado

10% DE MATERIAL RECICLADO					
Probeta No.	1	2	3	4	5
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (kg/cm ²)	300	300	300	300	300
Fecha de fabricación	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025	03/02/2025
Fecha de ensayo	05/03/2025	05/03/2025	05/03/2025	05/03/2025	05/03/2025
Edad (días)	30	30	30	30	30
Hora de ensayo	12:45	14:30	14:45	15:10	15:23
Diámetro 1 (mm)	152.37	151.37	152.12	156.67	152.04
Diámetro 2 (mm)	151.88	151.87	152.15	156.33	152.97
Diámetro promedio (mm)	152.20	151.60	152.20	156.60	152.60
Relación entre diámetros (%)	0.32%	0.33%	0.02%	0.22%	0.61%
Altura promedio (mm)	304	305	308	302	306
Relación H/D	2.00	2.01	2.02	1.93	2.01
Área (mm ²)	18194	18050	18194	19261	18289
Volumen (m ³)	0.0055	0.0055	0.0056	0.0058	0.0056
Masa (kg)	12.36	12.36	12.56	13	12.48
Peso unitario (kg/m ³)	2250	2250	2240	2230	2230
Carga máxima (kN)	422	417.2	450.1	424.9	419.1
Tipo de falla	5	4	4	4	5
Factor de corrección	1	1	1	1	1
Resistencia a la compresión (MPa)	23.2	23.1	24.7	22.1	22.9
Resistencia a la compresión (kg/cm²)	236.64	235.62	251.94	225.42	233.58

4.1.2. Resumen de resultados de la muestra patrón y muestras con material reciclado de la resistencia a la compresión (f'_c).

En la Tabla 29 se presenta el resumen de resultados del ensayo a compresión de la muestra patrón cuyo promedio es de 321.50 kg/cm², este valor supera la resistencia esperada. Sin embargo, para los ensayos de material reciclado de 6%, 8% y 10 % no alcanzaron a llegar a la resistencia de 300 kg/cm²; existiendo una diferencia de 21.48%, 30.46% y 26.40% respectivamente.

Tabla 29 Resistencia a la compresión f'_c , muestra patrón y porcentaje de material reciclado.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN f'_c (unidades)					
Porcentaje de material reciclado	No. cilindro	(MPa)	Promedio (MPa)	(kg/cm²)	Promedio (kg/cm²)
Muestra Patrón 0%	1	34.0	31.52	346.8	321.50
	2	29.1		296.82	
	3	28.8		293.76	
	4	32.8		334.56	
	5	32.9		335.58	
6%	1	25.4	24.75	259.08	252.45
	2	24.6		250.92	
	3	24.7		251.94	
	4	24.3		247.86	
	5	6.7		68.34	
8%	1	21.9	21.92	223.38	223.58
	2	21.8		222.36	
	3	22.2		226.44	
	4	22.1		225.42	
	5	21.6		220.32	
10%	1	23.2	23.20	236.64	236.64
	2	23.1		235.62	
	3	24.7		251.94	
	4	22.1		225.42	
	5	22.9		233.58	
<i>Observación: Respecto a la muestra 5 con el 6% de material reciclado, fue alterada; razón por la cual para el promedio no se consideró dicho valor.</i>					

En el Gráfico 3, se visualiza la diferencia de los resultados entre la muestra patrón y las muestras con material reciclado, las mismas que son inferiores a la resistencia esperada de 30 MPa, y en el Gráfico 4 se presenta los resultados en unidades de kg/cm^2 .

Gráfico No. 3 Resistencia a la compresión (MPa)

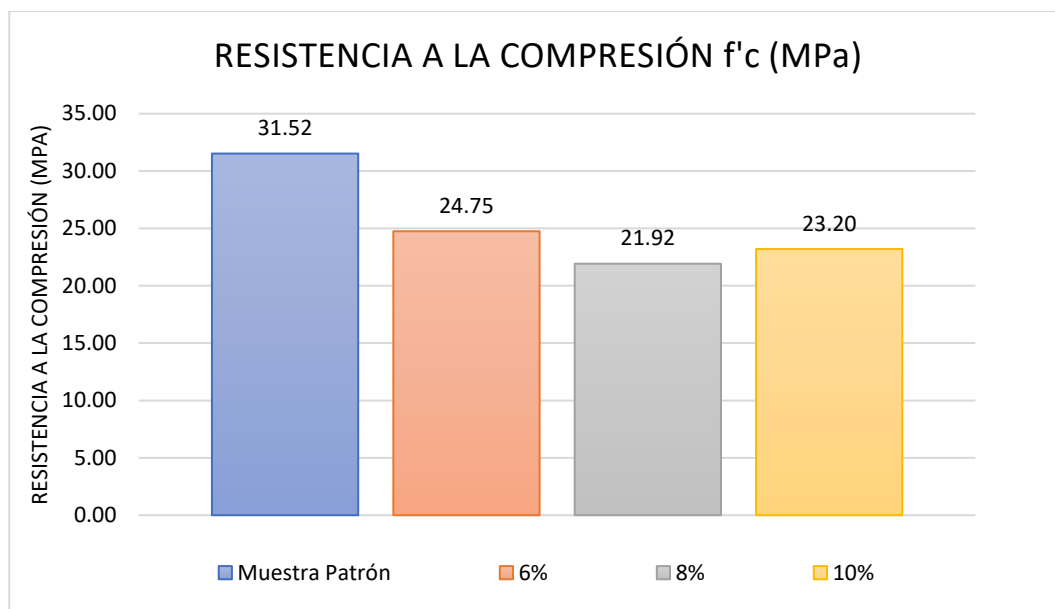
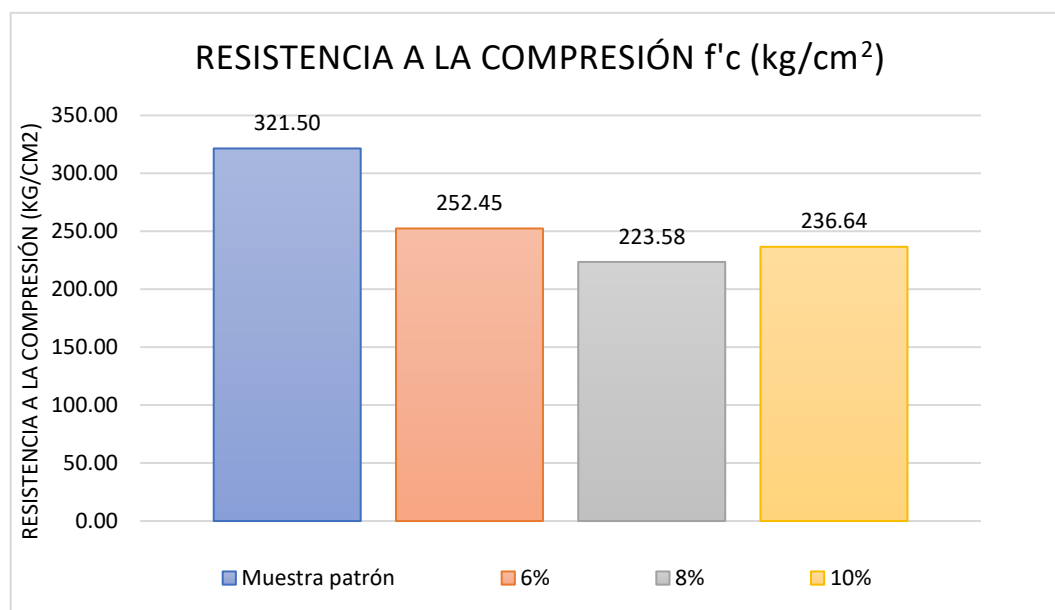


Gráfico No. 4 Resistencia a la compresión (kg/cm^2)



4.1.3. Resultados del módulo de elasticidad experimental de muestra patrón, 6%-8%-10% de material reciclado.

Aplicamos la fórmula del numeral 3.6 para obtener el módulo de elasticidad de los cilindros de la muestra patrón, como se refleja en la Tabla 30.

$$E = \frac{(13.6 - 1.2)}{(0.00072 - 0.00005)} = 18507.46 \approx 18600$$

Tabla 30 Módulo de elasticidad muestra patrón

CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD MUESTRA PATRÓN						
PROBETA	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		E (MÓDULO DE ELASTICIDAD MPa)	A LOS 200 MPa MÁS CERCANOS
1	ϵ_1	0.00005	S ₁	1.2	18507.46	18600
	ϵ_2	0.00072	S ₂	13.6		
2	ϵ_1	0.00005	S ₁	1.1	15441.18	15400
	ϵ_2	0.00073	S ₂	11.6		
3	ϵ_1	0.00005	S ₁	1.1	16250.00	16200
	ϵ_2	0.00069	S ₂	11.5		
4	ϵ_1	0.00005	S ₁	1.2	18593.75	18600
	ϵ_2	0.00069	S ₂	13.1		
5	ϵ_1	0.00005	S ₁	1.3	18593.75	18600
	ϵ_2	0.00069	S ₂	13.2		

En la Tabla 31, se puede comparar el módulo de elasticidad para un hormigón de resistencia de 300kg/cm², según la normativa y el promedio obtenido de la muestra patrón. Para unidades en MPa, la normativa establece un módulo de elasticidad de 25493 MPa, mientras que la obtenida mediante ensayo para la muestra patrón fue de 17480, existiendo una diferencia del 31.43%.

Tabla 31 Promedio del módulo de elasticidad de la muestra patrón

PROMEDIO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA MUESTRA PATRÓN						
No. cilindro	(MPa)	Promedio (MPa)	(kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Normativa $E_c=4700 \sqrt{f'c}$ MPa	Normativa $E_c=15100 \sqrt{f'c}$ kg/cm ²
1	18600	17480	189720	178296	25493 MPa	261540 kg/cm ²
2	15400		157080			
3	16200		165240			
4	18600		189720			
5	18600		189720			

Se repite el cálculo para los resultados de deformación y esfuerzo para los cilindros de material reciclado del 6%, como se observa en la Tabla 32.

Tabla 32 Cálculo del módulo de elasticidad 6% de material reciclado

CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 6% DE MATERIAL RECICLADO						
PROBETA	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		E (MÓDULO DE ELASTICIDAD MPa)	A LOS 200 MPa MÁS CERCANOS
1	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	14375.00	14400
	ϵ_2	0.00069	S ₂	10.2		
2	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	13333.33	13400
	ϵ_2	0.00071	S ₂	9.8		
3	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	13906.25	14000
	ϵ_2	0.00069	S ₂	9.9		
4	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	14032.26	14000
	ϵ_2	0.00067	S ₂	9.7		
5	ϵ_1	0.00005	S ₁	0.5	7333.33	7400
	ϵ_2	0.00035	S ₂	2.7		

Para unidades en MPa, la normativa establece un módulo de elasticidad de 25493 MPa, mientras que la obtenida mediante ensayo para el 6% de material reciclado fue de 13950, existiendo una diferencia del 45.28%.

Tabla 33 Promedio del módulo de elasticidad 6% de material reciclado

PROMEDIO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 6% DE MATERIAL RECICLADO (<i>unidades</i>)						
No. cilindro	(MPa)	Promedio (MPa)	(kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Normativa $E_c=4700 \sqrt{f'_c}$ MPa	Normativa $E_c=15100 \sqrt{f'_c}$ kg/cm ²
1	14400	13950	146880	142290	25493 MPa	261540 kg/cm ²
2	13400		136680			
3	14000		142800			
4	14000		142800			
5	7400		75480			

Aplicando la fórmula del numeral 3.6, se determina el módulo de elasticidad con los resultados de deformación y esfuerzo para los cilindros de material reciclado del 8%, como se observa en la Tabla 34.

Tabla 34 Cálculo del módulo de elasticidad 8% de material reciclado

CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 8% DE MATERIAL RECICLADO						
PROBETA	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		E (MÓDULO DE ELASTICIDAD MPa)	A los 200 MPa más cercanos
1	ϵ_1	0.00005	S ₁	0.9	13620.69	13600
	ϵ_2	0.00063	S ₂	8.8		
2	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	13275.86	13200
	ϵ_2	0.00063	S ₂	8.7		
3	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	13389.83	13400
	ϵ_2	0.00064	S ₂	8.9		
4	ϵ_1	0.00005	S ₁	0.9	12950.82	13000
	ϵ_2	0.00066	S ₂	8.8		
5	ϵ_1	0.00005	S ₁	0.9	12622.95	12600
	ϵ_2	0.00066	S ₂	8.6		

Para unidades en MPa, la normativa establece un módulo de elasticidad de 25493 MPa, mientras que la obtenida mediante ensayo para el 8% de material reciclado fue de 13160, existiendo una diferencia del 48.38%.

Tabla 35 Promedio del módulo de elasticidad 8% de material reciclado

PROMEDIO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 8% DE MATERIAL RECICLADO						
No. cilindro	(MPa)	Promedio (MPa)	(kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Normativa $E_c=4700 \sqrt{f'_c}$ MPa	Normativa $E_c=15100 \sqrt{f'_c}$ kg/cm ²
1	13600	13160	138720	134232	25493 MPa	261540 kg/cm ²
2	13200		134640			
3	13400		136680			
4	13000		132600			
5	12600		128520			

Repetimos el cálculo una vez más, en la Tabla 36, se presenta los resultados del módulo de elasticidad para los cilindros de material reciclado del 10 %.

Tabla 36 Cálculo del módulo de elasticidad 10% de material reciclado

CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 10% DE MATERIAL RECICLADO						
PROBETA	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		E (MÓDULO DE ELASTICIDAD MPa)	A LOS 200 MPa MÁS CERCANOS
1	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	14821.43	14800
	ϵ_2	0.00061	S ₂	9.3		
2	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	14642.86	14600
	ϵ_2	0.00061	S ₂	9.2		
3	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	15084.75	15000
	ϵ_2	0.00064	S ₂	9.9		
4	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	13684.21	13600
	ϵ_2	0.00062	S ₂	8.8		
5	ϵ_1	0.00005	S ₁	1	14642.86	14600
	ϵ_2	0.00061	S ₂	9.2		

Para unidades MPa, la normativa establece un módulo de elasticidad de 25493 MPa, mientras que la obtenida mediante ensayo para el 10% de material reciclado fue de 14520, existiendo una diferencia del 43.04%.

Tabla 37 Promedio del módulo de elasticidad 10% de material reciclado

PROMEDIO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD 10% DE MATERIAL RECICLADO (unidades)						
No. cilindro	(MPa)	Promedio (MPa)	(kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Normativa $E_c=4700 \sqrt{f'c}$ MPa	Normativa $E_c=15100 \sqrt{f'c}$ kg/cm ²
1	14800	14520	150960	148104	25493 MPa	261540 kg/cm ²
2	14600		148920			
3	15000		153000			
4	13600		138720			
5	14600		148920			

4.1.4. Resumen de resultados del módulo de elasticidad experimental

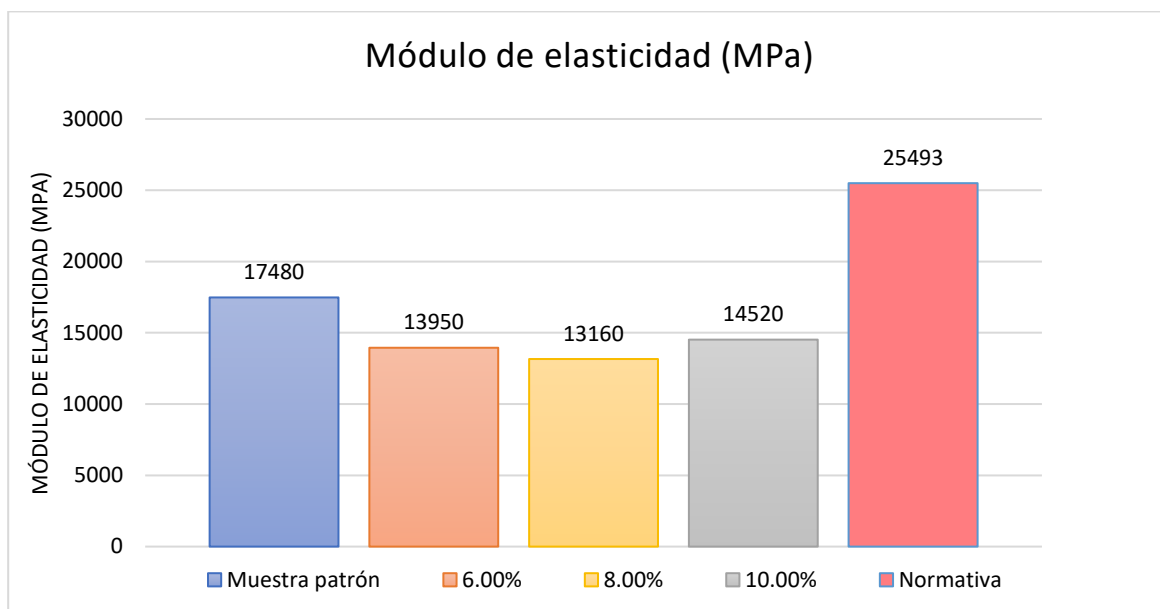
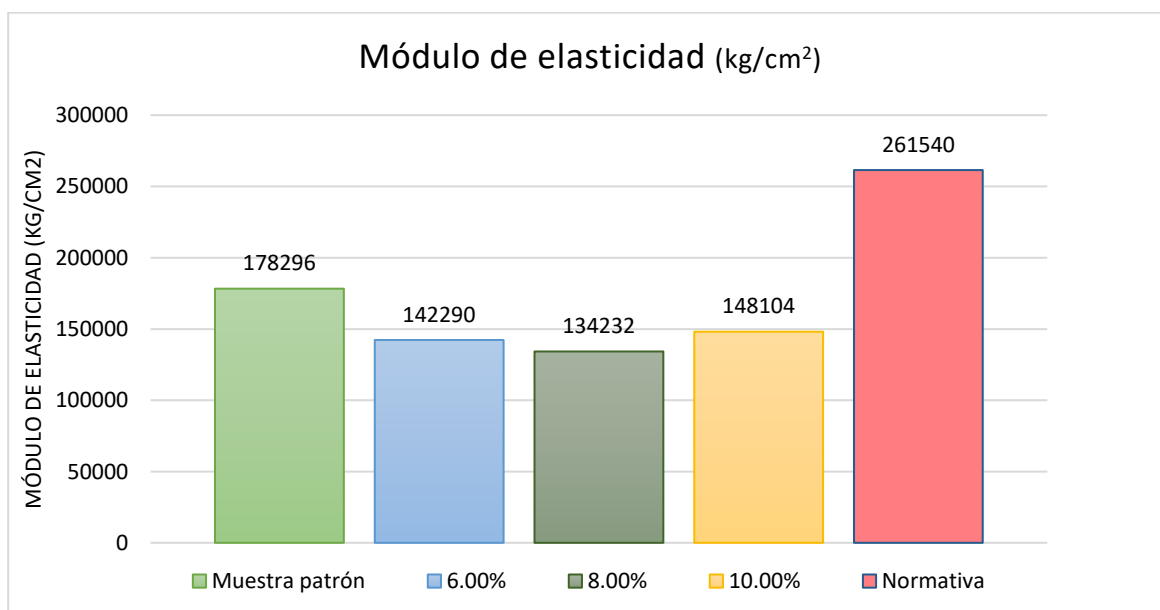
La Tabla 38, indica el resumen del módulo de elasticidad para la muestra patrón con 17480 MPa; para material reciclado del 6%, 13950 MPa; para material reciclado del 8%, 13160 MPa y para el material reciclado del 10%, 14520 MPa. Es decir, todas las muestras indican un módulo de elasticidad inferior al que establece la normativa con 25493 MPa.

Tabla 38 Resumen de Módulo de elasticidad experimental

MÓDULO DE ELASTICIDAD EXPERIMENTAL PARA LA MUESTRA PATRÓN Y PARA DISTINTO PORCENTAJE DE MATERIAL RECICLADO		
Porcentaje de material reciclado	Promedio (MPa)	Promedio (kg/cm ²)
Muestra patrón	17480	178296
6%	13950	142290
8%	13160	134232
10%	14520	148104

Se presenta en el Gráfico 5 y Gráfico 6 la comparación de los módulos de elasticidad para una muestra patrón, material reciclado de 6%, 8% y 10%, en unidades MPa y kg/cm², respectivamente.

Gráfico No. 5 Módulo de elasticidad MPa

Gráfico No. 6 Módulo de elasticidad kg/cm²

4.1.5. Factores para el módulo de elasticidad para un hormigón de 300 kg/cm²

En aplicación de la ecuación del numeral 3.7, se obtiene el factor para el módulo de elasticidad para un hormigón de 300kg/cm², resultados detallados en la Tabla 39.

Tabla 39 Factores para el módulo de elasticidad para un hormigón de 300 kg/cm².

Porcentaje de material reciclado	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de elasticidad promedio (MPa)	Factor (MPa)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad promedio (kg/cm ²)	Factor (kg/cm ²)
Muestra Patrón	29.42	17480	3222.70	300	178296	10293.92
6%	29.42	13950	2571.89	300	142290	8215.12
8%	29.42	13160	2426.24	300	134232	7749.89
10%	29.42	14520	2676.98	300	148104	8550.79

En el gráfico 7, se presenta los factores de módulo de elasticidad en unidades MPa, según los módulos de elasticidad obtenidos mediante ensayo de laboratorio. En relación al factor de 4700, según la normativa, para la muestra patrón existe una diferencia de 31.43%, para el material reciclado del 6% existe una diferencia de 45.28%; para el material reciclado de 8% existe una diferencia de 48.38% y para el material reciclado de 6% existe una diferencia de 43.04%.

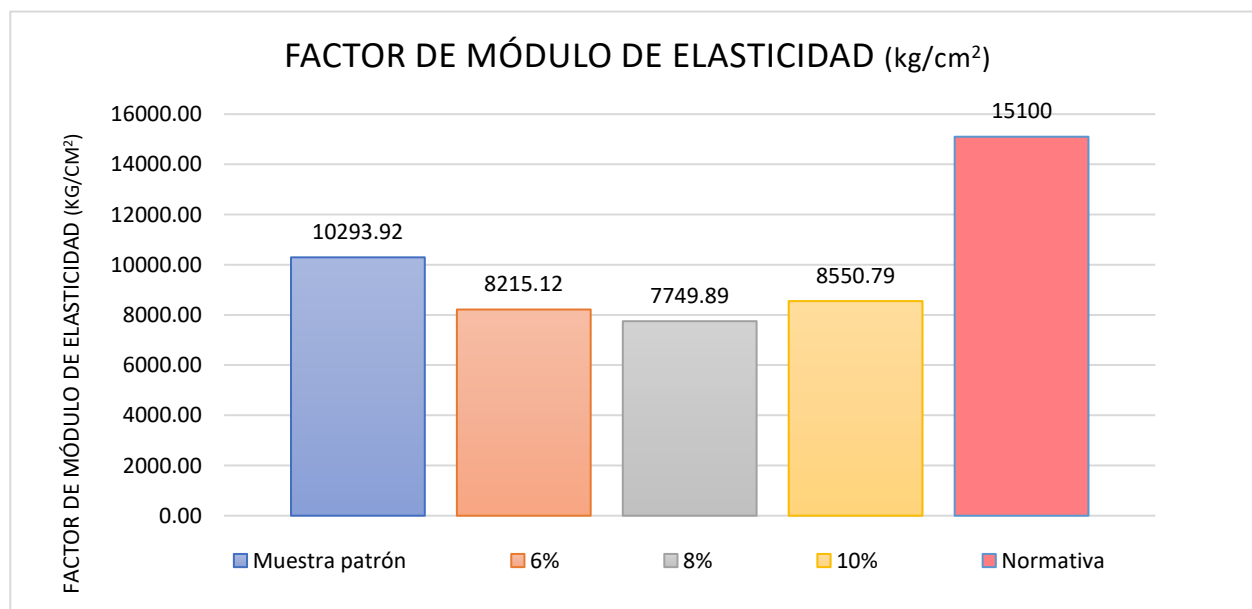


Gráfico No. 7 Factor de módulo de elasticidad (MPa)

El Gráfico 8, presenta resultados de factores de módulo de elasticidad en unidades kg/cm².

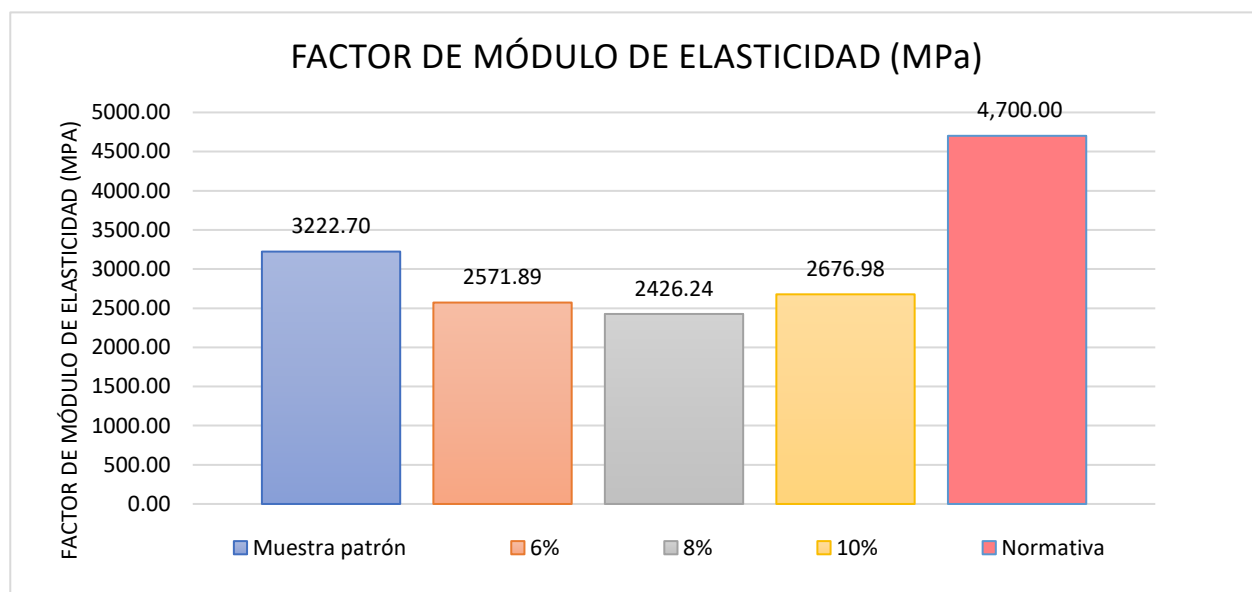


Gráfico No. 8 Factor de módulo de elasticidad (kg/cm²)

4.1.6. Ecuación del módulo de elasticidad

En el numeral 2.2.7. Módulo de elasticidad, se describió la ecuación de acuerdo a la normativa como $E = 4700 \sqrt{f'c}$. Con los factores obtenidos en la Tabla 39, establecemos la ecuación del módulo de elasticidad para un hormigón de resistencia de 300 kg/cm^2 , con material pétreo de la mina San Joaquín del cantón Latacunga, material reciclado de adoquín y cemento “ARMADURO”.

De la Tabla 40, podemos observar que el factor de la muestra patrón presenta una diferencia de 31.43%, con el factor de la normativa. Mientras que los de material reciclado varían entre el 43.04% y el 48.38%. El factor con menor diferencia corresponde al factor de material reciclado con el 10%.

Tabla 40 Ecuación del módulo de elasticidad obtenido

ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD		
	Para $f'c$ en MPa	Para $f'c$ en kg/cm^2
Normativa	$E = 4700 \sqrt{f'c}$	$E = 15100 \sqrt{f'c}$
Muestra Patrón	$E = 3223 \sqrt{f'c}$	$E = 10294 \sqrt{f'c}$
6%	$E = 2572 \sqrt{f'c}$	$E = 8215 \sqrt{f'c}$
8%	$E = 2426 \sqrt{f'c}$	$E = 7750 \sqrt{f'c}$
10%	$E = 2677 \sqrt{f'c}$	$E = 8551 \sqrt{f'c}$

CAPÍTULO V

5.1.CONCLUSIONES

- Las características del material fino de la mina San Joaquín de Mulaló del cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, cumple con la normativa NTE INEN 872 (Áridos para hormigón), del numeral 5.1.2.2 en el que indica que el módulo de finura no debe ser menor que 2.3 ni mayor que 3.1; dando un módulo de finura de 2.76, como se indica en la Tabla 9. Así como también, el material se encuentra dentro los límites del porcentaje que pasa.
- El agregado grueso de mina San Joaquín de Mulaló del cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, tiene un porcentaje de abrasión del 42.34%, la capacidad de absorción es de 2.40%, contenido de humedad 0.2% y la granulometría se encuentra dentro de los límites, de acuerdo a la normativa NTE INEN 696 (Análisis granulométrico en los áridos finos y gruesos), se puede utilizar en hormigones de resistencia de 300kg/cm², en edificaciones, pero hay que tener en cuenta el índice de abrasión supera el 30%, se debería realizar justes en la mezcla para asegurar la durabilidad y resistencia del concreto a largo plazo.
- De acuerdo a los resultados del ensayo de compresión de cilindros, se determinó que la resistencia de la muestra patrón cumplió el objetivo de diseño para un hormigón de 300 kg/cm² con una resistencia promedio de los cinco cilindros de 321.50 kg/cm², detallado en la tabla 29, mientras que las muestras con la sustitución del agregado fino con material reciclado al 6%, 8% y 10% no cumplieron la resistencia objetivo obteniendo resistencias de 252.45 kg/cm², 223.58 kg/cm² y 236.64 kg/cm², respectivamente.
- Como se mencionó, ninguno de los ensayos con material reciclado llego a la resistencia esperada, sin embargo, se puede indicar que la resistencia mayor fue la de 6% de material reciclado, le sigue los ensayos de 10% de material reciclado y con la resistencia más baja la del 8% de material reciclado.
- El módulo de elasticidad para la muestra patrón dio como resultado 17480 MPa, para el 6%, 8% y 10% de material reciclado, el módulo de elasticidad es de 13950 MPa, 13160MPa y 14520 MPa respectivamente.
- El módulo de elasticidad de acuerdo a la normativa es de 25493 MPa, es decir todos los ensayos fueron inferiores al establecido.

- El módulo de elasticidad para la muestra patrón difiere de la normativa en un 31.43%, mientras que para los porcentajes de 6%, 8% y 10% de material reciclado, difiere en 45.28%, 48.38% y 43.04%.
- Para el 10% de material reciclado, el módulo de elasticidad es mayor en comparación a los módulos de elasticidad obtenidos para el 8% y 6% de material reciclado, recordando que estos valores equivalen a casi la mitad del valor del módulo de elasticidad detallado en la normativa.
- La resistencia en la muestra patrón cumplió el objetivo esperado, en el cual se puede concluir que el material pétreo; tanto el material grueso como el material fino fue adecuado para llegar a la resistencia esperada, mientras que el material reciclado de adoquín no aportó al diseño de hormigón.
- El material reciclado pudo haber tenido una resistencia inferior a la del agregado fino, ya que estos se encontraron deteriorados o no se seleccionaron adecuadamente, pudiendo tener impurezas, cuyas características no fueron adecuadas para lograr la resistencia deseada en la mezcla de hormigón, afectando la adherencia entre los agregados reciclados, los agregados pétreos, el cemento y el agua.
- Respecto al proceso de curado del hormigón, no se podría decir que se realizó de manera incorrecta ya que se colocaron en agua la misma fecha y se ensayaron después de los 28 días.

5.2.RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer una clasificación y limpieza de los adoquines reciclados para asegurar de que no contienen impurezas o materiales que puedan debilitar el hormigón.
- Evaluar si la cantidad de adoquín reciclado es adecuada, realizando ajustes en la dosificación del cemento y la relación agua/cemento y probar con porcentajes de material reciclado inferior al 6%.
- El uso de materiales reciclados es muy beneficioso desde el ámbito ambiental, sin embargo, se debe tomar consideraciones técnicas de resistencia y durabilidad del material reciclado a utilizar. Si bien el porcentaje de material reciclado del 6%, 8% y 10% no son altos en comparación con la aplicación de otros países, la calidad del adoquín y la preparación de la mezcla son factores clave, se recomienda realizar más pruebas y ajustes en la mezcla para lograr la resistencia deseada, o probar para una resistencia más baja.

5.3.BIBLIOGRAFÍA

- Shahzad Aslam, M., Huang, B., & Cui, L. (2020). Review of construction and demolition waste management in China and Usa. *Journal of Environmental Management*, 264, <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>.
- Muñoz Pérez, S. P., Bayona Reyes, M. J., & Yovera Santisteban, J. R. (2021). *Gestión de residuos de construcción y demolición, para mitigar el impacto Ambiental y preservar nuestros recursos naturales: Una revisión de la literatura*. *Ecuadorian Science Journal*, 5(2) 100-106. DOI: <https://doi.org/10.46480/esj.5.2.90>
- Arequipa, E., Coba, W., Garzón, D., & Vargas, L. (2013). Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión simple $f'_c = 21\text{MPa}$ y 30MPa elaborado con agregados de la Mina San Joaquín Provincia del Cotopaxi y el cemento Selva Alegre. Quito, Ecuador: (Tesis de Ingeniería Civil). Universidad Central del Ecuador. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/155> [Links]
- Carvajal, J. (2013). Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión ($F_c = 21\text{MPa}$), fabricado con materiales de la Mina San Ramón, ubicada en la Parroquia de Mulaló en la Provincia de Cotopaxi y Cemento Chimborazo. Quito, Ecuador: (Tesis de Ingeniería Civil). Universidad Central del Ecuador. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1719/1/T-UCE-0011-48.pdf> [Links]
- Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Mulaló, Cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi 2020 – 2023.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015.
- NTE INEN 696. Áridos, Análisis Granulométrico de los áridos Finos y Gruesos
- NTE INEN 872. Áridos para Hormigón Requisitos
- ASTM C 127. (2001). Método Estándar para la Determinación de la Gravedad Específica y Absorción de los Agregados.
- ASTM, C. (2017). Resistencia a la compresión de cilindros de concreto.
- BECOSAN, (2021). *Hormigón fresco*. Retrieved from https://www.becosan.com/es/hormigon-fresco/?utm_source=chatgpt.com#Que_es_el_hormigon_fresco [Links]
- Mc Cormac & Brown, (2018). Diseño de concreto reforzado.

- Amaya M. (2021). *Modelo Meso-Mecánico del Proceso de Fractura del Concreto Simple*. (Tesis de Magister en Ingeniería-Estructuras). Universidad Nacional de Colombia.
- *Utilización de árido reciclado fino de hormigón para la fabricación de morteros y hormigones*. Retrieved from: https://www.secegsa.gob.es/utilizacion-de-arido-reciclado-fino-de-hormigon-para-la-fabricacion-de-morteros-y-hormigones?utm_source=chatgpt.com [Links]

6. ANEXO FOTOGRÁFICO

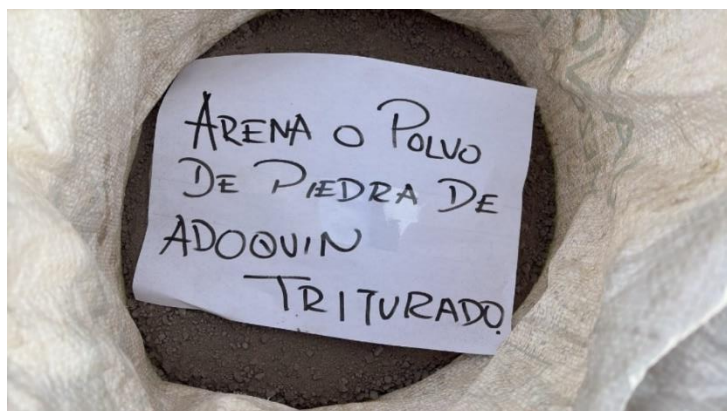


Mina San Joaquín, de Mulaló, cantón Latacunga, provincia Cotopaxi

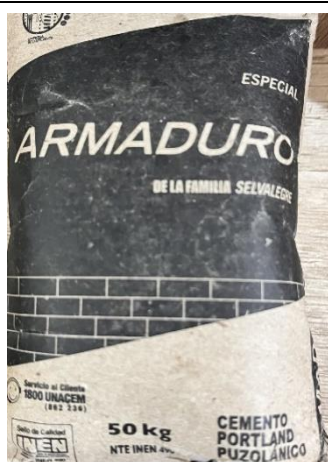


Trituradora ubicada en la mina San Joaquín.

	<p>Toma de agregado grueso triturado de la mina San Joaquín</p>
	<p>Toma de agregado fino de la mina San Joaquín</p>
	<p>Adoquín vehicular triturado</p>



Adoquín vehicular
triturado



Cemento
“ARMADURO”



Se realizó un primer ensayo con la dosificación al volumen tomada de Arequipa-Coba- Garzón- Vargas, 2012, para verificar la muestra patrón.

	<p>Cilindros de prueba para verificación de la muestra patrón.</p>
	<p>Dosificación al peso de agregado grueso</p>
	<p>Dosificación al peso de agregado fino</p>



Dosificación al peso de material reciclado de adoquín vehicular.



Mezcla de hormigón



Elaboración de probetas



Muestras cilíndricas de hormigón



Se colocan los cilindros en una cámara de agua.



Muestras membretadas e identificadas para ensayo a compresión más módulo de elasticidad.



ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES
INFORME DE ENSAYO
DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A COMPRESIÓN
EN PROBETAS CILÍNDRICAS

Determinación del Módulo de Elasticidad de un
PROYECTO : Hormigón con Resistencia de 300 Kg/cm² fabricado con Material Reciclado de Adoquín

SOLICITADO POR: Ing. Verónica Constante

LOCALIZACIÓN : PUCE -Quito

FISCALIZACIÓN :

CONTRATISTA :

MUESTRA: Tomada por el Cliente

FECHA DE RECEPCIÓN : 2025-02-28






FECHA DE EMISIÓN : 2025-03-07

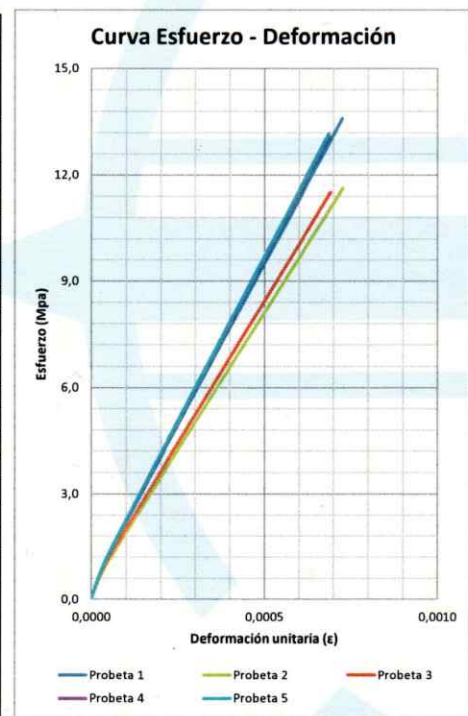
NORMA DE REFERENCIA DE ENSAYO : ASTM C39/C39M

ORDEN DE TRABAJO: 36847

NORMA DE REFERENCIA DE ENSAYO : ASTM C469/C469M

HOJA : 1 de 4

Probeta N° :	1	2	3	4	5
Identificación de la probeta*	.....	.....	.....	.....	.....
Descripción*	MUESTRA PATRÓN				
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Kg/cm ²)	300	300	300	300	300
Fecha de fabricación*	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03
Fecha de ensayo*	2025-03-07	2025-03-07	2025-03-07	2025-03-07	2025-03-07
Edad (días)	32	32	32	32	32
Hora de ensayo	16:11	9:37	9:51	10:14	10:27
Diámetro 1 (mm)	152,87	151,43	152,18	152,98	154,78
Diámetro 2 (mm)	153,26	151,15	152,61	153,81	153,96
Diámetro promedio (mm)	153,00	151,20	152,40	153,40	154,40
Relación entre diámetros (%)	0,26	0,19	0,28	0,54	0,53
Altura promedio (mm)	308	303	302	307	305
Relación H/D	2,01	2,00	1,98	2,00	1,98
Área (mm ²)	18385	17955	18241	18482	18723
Volumen (m ³)	0,0057	0,0054	0,0055	0,0057	0,0057
Masa (kg)	12,83	12,36	12,46	12,75	12,83
Peso unitario (kg/m ³)	2270	2270	2260	2250	2250
Carga máxima (KN)	624,6	522,2	525,1	605,7	616,8
Factor de corrección	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Resistencia a la Compresión (MPa)	34,0	29,1	28,8	32,8	32,9
Módulo de Elasticidad (MPa)	18200	15600	16200	18600	18800
Tipo de Falla					
	5	4	4	4	5



OBSERVACIONES:

* Datos proporcionados por el Cliente.

— Unidades de Conversión: 1 MPa = 10,2 Kg/cm²

— Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

— El módulo de elasticidad es calculado de la siguiente manera, a los 200 Mpa más cercanos:

$$\text{Módulo de Elasticidad (E)} = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0,000050)}$$

S₂ = Corresponde al 40% del esfuerzo último

S₁ = Esfuerzo producido en una deformación de 0,00005

ε₂ = deformación longitudinal producida por el esfuerzo S₂

Probeta	Deformación		Esfuerzo	
	ε ₁	ε ₂	S ₁	S ₂
1	0,00005	0,00072	1,2	13,6
	0,00005	0,00073	1,1	11,6
2	0,00005	0,00069	1,1	11,5
	0,00005	0,00069	1,2	13,1
3	0,00005	0,00069	1,3	13,2
	0,00005	0,00069	1,2	13,2


Ing. María Inés Calvo, M.Sc.
RESPONSABLE DE ÁREA


Ing. Jorge Maza, M.Sc. Ph.D.
COORDINADOR





ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES
INFORME DE ENSAYO
DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A COMPRESIÓN
EN PROBETAS CILÍNDRICAS

Determinación del Módulo de Elasticidad de un
PROYECTO: Hormigón con Resistencia de 300 Kg/cm² fabricado con Material Reciclado de Adoquín

SOLICITADO POR: Ing. Verónica Constante

LOCALIZACIÓN: PUCE -Quito

FISCALIZACIÓN:

CONTRATISTA:

MUESTRA: Tomada por el Cliente

FECHA DE RECEPCIÓN: 2025-02-28

FECHA DE EMISIÓN: 2025-03-07

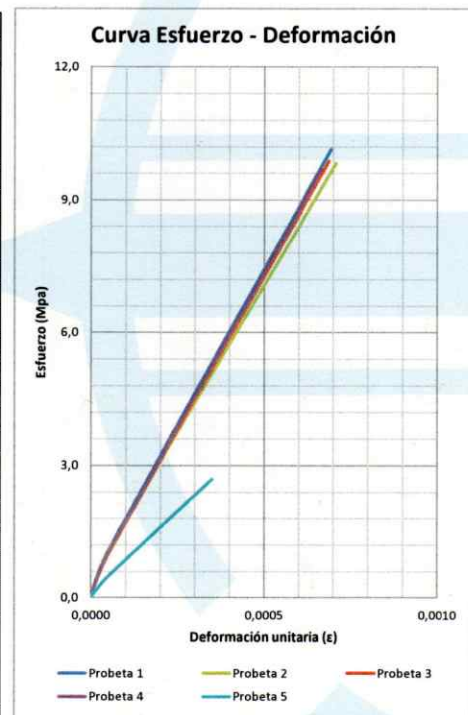
NORMA DE REFERENCIA DE ENSAYO: ASTM C39/C39M

ORDEN DE TRABAJO: 36847

NORMA DE REFERENCIA DE ENSAYO: ASTM C469/C469M

HOJA: 2 de 4

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Identificación de la probeta*	.....	.....	.....	.....	.....
Descripción*	6% DE MATERIAL RECICLADO				
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Kg/cm ²)	300	300	300	300	300
Fecha de fabricación*	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-12
Fecha de ensayo*	2025-03-06	2025-03-06	2025-03-06	2025-03-06	2025-03-06
Edad (días)	31	31	31	31	22
Hora de ensayo	15:02	15:12	15:38	15:47	15:58
Diámetro 1 (mm)	150,32	153,36	153,18	152,11	149,27
Diámetro 2 (mm)	149,73	152,09	152,42	151,94	150,33
Diámetro promedio (mm)	150,00	152,80	152,80	152,00	149,80
Relación entre diámetros (%)	0,39	0,84	0,50	0,11	0,71
Altura promedio (mm)	303	305	303	303	304
Relación H/D	2,02	2,00	1,98	1,99	2,03
Área (mm ²)	17671	18337	18337	18146	17624
Volumen (m ³)	0,0054	0,0056	0,0056	0,0055	0,0054
Masa (kg)	12,18	12,38	12,40	12,36	10,55
Peso unitario (kg/m ³)	2270	2210	2230	2250	1970
Carga máxima (KN)	448,5	450,5	453,1	440,2	118,3
Factor de corrección	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Resistencia a la Compresión (MPa)	25,4	24,6	24,7	24,3	6,7
Módulo de Elasticidad (MPa)	14200	13400	14000	14000	7400
Tipo de Falla					
	5	4	5	4	5



OBSERVACIONES:

* Datos proporcionados por el Cliente.

- Unidades de Conversión: 1 MPa = 10,2 Kg/cm²
- Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.
- El módulo de elasticidad es calculado de la siguiente manera, a los 200 Mpa más cercanos:

$$\text{Módulo de Elasticidad } (E) = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0,000050)}$$

S₂ = Corresponde al 40% del esfuerzo último

S₁ = Esfuerzo producido en una deformación de 0,00005

ε₂ = deformación longitudinal producida por el esfuerzo S₂

Probeta	Deformación		Esfuerzo	
	ε ₁	ε ₂	S ₁	S ₂
1	0,00005	0,00069	1,0	10,2
	0,00005	0,00071	1,0	9,8
2	0,00005	0,00069	1,0	9,9
	0,00005	0,00067	1,0	9,7
3	0,00005	0,00035	0,5	2,7
	0,00005	0,00035	0,5	2,7

Ing. María Inés Calvo, M.Sc.
RESPONSABLE DE ÁREA

Ing. Jorge Albuja, M.Sc., Ph.D.
COORDINADOR





ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES
INFORME DE ENSAYO
DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A COMPRESIÓN
EN PROBETAS CILÍNDRICAS

Determinación del Módulo de Elasticidad de un
PROYECTO : Hormigón con Resistencia de 300 Kg/cm² fabricado con Material Reciclado de Adoquín

SOLICITADO POR: Ing. Verónica Constante

LOCALIZACIÓN : PUCE -Quito

FISCALIZACIÓN :

CONTRATISTA :

MUESTRA: Tomada por el Cliente

FECHA DE RECEPCIÓN : 2025-02-28

FECHA DE EMISIÓN : 2025-03-07

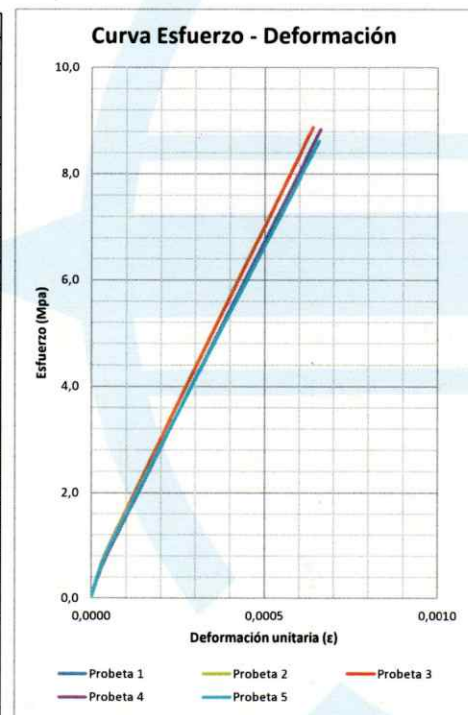
NORMA DE REFERENCIA DE ENSAYO : ASTM C39/C39M

ORDEN DE TRABAJO: 36847

NORMA DE REFERENCIA DE ENSAYO : ASTM C469/C469M

HOJA : 3 de 4

Probeta N° :	1	2	3	4	5
Identificación de la probeta*	.....	.....	.....	.....	.....
Descripción*	8% DE MATERIAL RECICLADO				
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Kg/cm ²)	300	300	300	300	300
Fecha de fabricación*	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03
Fecha de ensayo*	2025-03-05	2025-03-05	2025-03-05	2025-03-05	2025-03-05
Edad (días)	30	30	30	30	30
Hora de ensayo	15:00	15:20	15:40	16:00	16:20
Diámetro 1 (mm)	149,14	153,29	152,48	151,53	149,15
Diámetro 2 (mm)	150,09	153,37	153,10	151,92	150,87
Diámetro promedio (mm)	149,60	153,40	152,80	151,80	150,00
Relación entre diámetros (%)	0,64	0,05	0,41	0,26	1,15
Altura promedio (mm)	302	307	301	300	302
Relación H/D	2,02	2,00	1,97	1,98	2,01
Área (mm ²)	17577	18482	18337	18098	17671
Volumen (m ³)	0,0053	0,0057	0,0055	0,0054	0,0053
Masa (kg)	11,92	12,76	12,39	12,01	11,87
Peso unitario (kg/m ³)	2250	2250	2240	2210	2220
Carga máxima (KN)	385,6	403,6	407,1	400,2	380,9
Factor de corrección	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Resistencia a la Compresión (MPa)	21,9	21,8	22,2	22,1	21,6
Módulo de Elasticidad (MPa)	13400	13400	13400	13000	12600
Tipo de Falla					
	5	5	5	4	5



OBSERVACIONES:

* Datos proporcionados por el Cliente.

- Unidades de Conversión: 1 MPa = 10,2 Kg/cm²
- Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.
- El módulo de elasticidad es calculado de la siguiente manera, a los 200 Mpa más cercanos:

$$\text{Módulo de Elasticidad } (E) = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0,000050)}$$

S₂ = Corresponde al 40% del esfuerzo último
S₁ = Esfuerzo producido en una deformación de 0,00005
ε₂ = deformación longitudinal producida por el esfuerzo S₂

Probeta	Deformación		Esfuerzo	
	ε ₁	ε ₂	S ₁	S ₂
1	0,00005	0,00063	0,9	8,8
	0,00005	0,00063	1,0	8,7
2	0,00005	0,00063	1,0	8,9
	0,00005	0,00064	0,9	8,8
3	0,00005	0,00066	0,9	8,8
	0,00005	0,00066	0,9	8,6
4	0,00005	0,00066	0,9	8,6
	0,00005	0,00066	0,9	8,6
5	0,00005	0,00066	0,9	8,6
	0,00005	0,00066	0,9	8,6

Ing. María Inés Calvo, M.Sc.
RESPONSABLE DE ÁREA

Ing. Jorge Albuja, M.Sc., Ph.D.
COORDINADOR



ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES
INFORME DE ENSAYO
DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A COMPRESIÓN
EN PROBETAS CILÍNDRICAS

Determinación del Módulo de Elasticidad de un
PROYECTO : Hormigón con Resistencia de 300 Kg/cm² fabricado con Material Reciclado de Adoquín

SOLICITADO POR: Ing. Verónica Constante

LOCALIZACIÓN : PUCE -Quito

FISCALIZACIÓN :

CONTRATISTA :

MUESTRA: Tomada por el Cliente

FECHA DE RECEPCIÓN : 2025-02-28

FECHA DE EMISIÓN : 2025-03-07

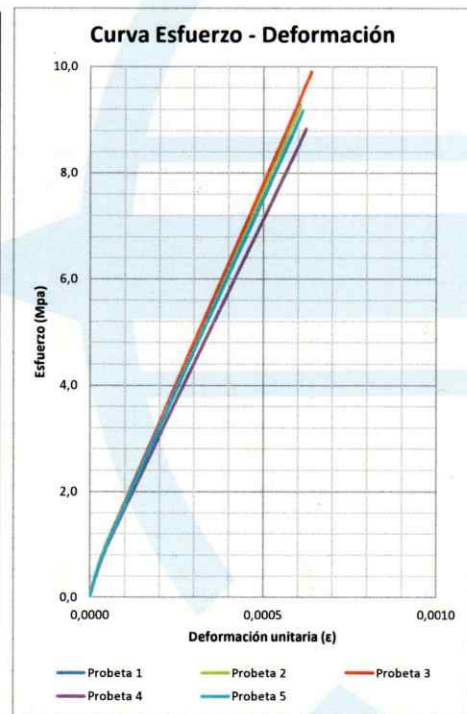
NORMA DE REFERENCIA DE ENSAYO : ASTM C39/C39M

ORDEN DE TRABAJO: 36847

NORMA DE REFERENCIA DE ENSAYO : ASTM C469/C469M

HOJA : 4 de 4

Probeta N° :	1	2	3	4	5
Identificación de la probeta*	.....	.....	.....	.....	.....
Descripción*	10% DE MATERIAL RECICLADO				
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Kg/cm ²)	300	300	300	300	300
Fecha de fabricación*	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03	2025-02-03
Fecha de ensayo*	2025-03-05	2025-03-05	2025-03-05	2025-03-05	2025-03-05
Edad (días)	30	30	30	30	30
Hora de ensayo	12:45	14:30	14:45	15:10	15:23
Diámetro 1 (mm)	152,37	151,37	152,12	156,67	152,04
Diámetro 2 (mm)	151,88	151,87	152,15	156,33	152,97
Diámetro promedio (mm)	152,20	151,60	152,20	156,60	152,60
Relación entre diámetros (%)	0,32	0,33	0,02	0,22	0,61
Altura promedio (mm)	304	305	308	302	306
Relación H/D	2,00	2,01	2,02	1,93	2,01
Área (mm ²)	18194	18050	18194	19261	18289
Volumen (m ³)	0,0055	0,0055	0,0056	0,0058	0,0056
Masa (kg)	12,36	12,36	12,56	13,00	12,48
Peso unitario (kg/m ³)	2230	2250	2240	2230	2230
Carga máxima (KN)	422,0	417,2	450,1	424,9	419,1
Factor de corrección	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Resistencia a la Compresión (MPa)	23,2	23,1	24,7	22,1	22,9
Módulo de Elasticidad (MPa)	15000	14800	15000	13800	14400
Tipo de Falla					
	5	4	4	4	5



OBSERVACIONES:

* Datos proporcionados por el Cliente.

— Unidades de Conversión: 1 MPa = 10,2 Kg/cm²

— Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

— El módulo de elasticidad es calculado de la siguiente manera, a los 200 Mpa más cercanos:

$$\text{Módulo de Elasticidad } (E) = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0,000050)}$$

S₂ = Corresponde al 40% del esfuerzo último

S₁ = Esfuerzo producido en una deformación de 0,00005

ε₂ = deformación longitudinal producida por el esfuerzo S₂

Probeta	Deformación		Esfuerzo	
1	ε ₁	0,00005	S ₁	1,0
	ε ₂	0,00061	S ₂	9,3
2	ε ₁	0,00005	S ₁	1,0
	ε ₂	0,00061	S ₂	9,2
3	ε ₁	0,00005	S ₁	1,0
	ε ₂	0,00064	S ₂	9,9
4	ε ₁	0,00005	S ₁	1,0
	ε ₂	0,00062	S ₂	8,8
5	ε ₁	0,00005	S ₁	1,0
	ε ₂	0,00061	S ₂	9,2

Ing. María Inés Calvo, M.Sc.
RESPONSABLE DE ÁREA

Ing. Jorge Albuja, M.Sc., Ph.D.
COORDINADOR

