PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE HÁBITAT, INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO MEDIANTE EL REEMPLAZO PARCIAL DEL 3 % Y 5 % DEL AGREGADO GRUESO NATURAL POR AGREGADO GRUESO RECICLADO

AUTORES:

LIBERMAN JOSSUE ORQUERA BUITRON

DILAN MARTIN PALMA GAVILANES

DIRECTOR:

ING. WILSON OSWALDO CANDO TIPÁN

QUITO DM, 7 DE JULIO DE 2026

AGRADECIMIENTO

Liberman Jossue Orquera Buitron

Agradezco profundamente a mis padres por su amor, apoyo, confianza y esfuerzo durante toda mi formación académica. Gracias por ser mi mayor fortaleza en los momentos difíciles y por motivarme siempre a seguir adelante hasta alcanzar esta meta. De igual manera, agradezco a mis amigos y docentes, quienes fueron parte importante de este proceso, compartiendo conocimientos, experiencias y aprendizajes que contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional. Finalmente, agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por brindarme la oportunidad de formarme como profesional en Ingeniería Civil y permitirme cumplir uno de los objetivos más importantes de mi vida.

Dilan Martin Palma Gavilanes

Agradezco profundamente a mis padres por su apoyo, confianza y esfuerzo a lo largo de toda mi formación académica. En los momentos más difíciles, siempre estuvieron presentes brindándome la fortaleza necesaria para continuar y alcanzar esta meta. De igual manera, agradezco a mis compañeros y amigos que me acompañaron durante este proceso, compartiendo momentos de aprendizaje, esfuerzo y dedicación. Su apoyo y colaboración fueron fundamentales para culminar esta etapa. Finalmente, agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y permitirme alcanzar uno de los objetivos más importantes de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Justificación e importancia 2
1.2 Planteamiento del problema 3
1.3 Objetivos 5
1.3.1 Objetivo General 5
1.3.2 Objetivos Específicos 5
1.4 Alcance 5
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 6
2.1 Áridos 6
2.1.1 Propiedades de los Áridos 7
2.1.1.1 Granulometría 7
2.1.1.2 Densidad y Gravedad Específica 8
2.1.1.3 Peso unitario volumétrico 8
2.1.1.4 Contenido de Humedad 8
2.1.1.5 Abrasión 9
2.2 Cemento 9
2.2.1 Consistencia de la pasta de cemento 10
2.3 Agregado grueso reciclado 11
2.3.1 Definición y origen del agregado grueso reciclado 11
2.3.2 Proceso de obtención del agregado grueso reciclado 11
2.3.3 Mortero Adherido en el agregado grueso 13
2.4 Hormigón 14
2.4.1 Propiedades de los Hormigones 15
2.4.1.1 Trabajabilidad 15
2.4.1.2 Resistencia a la compresión 15
2.4.1.3 Módulo de elasticidad del hormigón 16
3. METODOLOGÍA 17
3.1 Tipo de investigación 17
3.2 Materiales utilizados 17
3.2.1 Cemento 18
3.2.2 Agua 18
3.2.3 Agregado fino natural 18

3.2.4 Agregado grueso natural 18
3.2.5 Agregado grueso reciclado 18
3.3 Caracterización de los materiales 19
3.4 Caracterización del Agregado fino natural 20
3.4.1 Granulometría 20
3.4.2 Gravedad específica y Absorción 23
3.4.3 Peso unitario 26
3.4.4 Contenido de Humedad 28
3.5 Caracterización del Agregado grueso natural 30
3.5.1 Granulometría 30
3.5.2 Gravedad específica y Absorción 32
3.5.3 Peso Unitario 34
3.5.4 Contenido de Humedad 35
3.5.5 Abrasión 37
3.6 Caracterización de agregado grueso reciclado 39
3.6.1 Granulometría 40
3.6.2 Gravedad específica y Absorción 41
3.6.3 Peso unitario 41
3.6.4 Contenido de humedad 42
3.6.5 Abrasión 43
3.7 Dosificación de hormigón convencional 44
3.7.1 Dosificación del Hormigón convencional f'c = 280 kg/cm² 49
3.7.2 Dosificación del Hormigón con Agregado grueso reciclado 50
3.7.3 Compresión del Hormigón 51
3.7.4 Determinación del módulo de elasticidad del hormigón 52
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS 54
4.1 Ensayos del hormigón 54
4.1.1 Determinación de la Resistencia a la Compresión 54
4.1.2 Determinación del Módulo de Elasticidad 55
4.1.3 Determinación de Factores para fórmula de módulo de Elasticidad 61
5. CONCLUSIONES 62
6. RECOMENDACIONES 63
7. BIBLIOGRAFÍA 64

Figura 1 Agregados pétreos utilizados en la elaboración de las mezclas de hormigón.....7
Figura 2 Influencia de las propiedades evaluadas de los áridos en el comportamiento del hormigón.....9
Figura 3 Diagrama de flujo de una planta con sistema abierto para la producción de agregados reciclados. 12
Figura 4 Diagrama de flujo de una planta con sistema cerrado para la producción de agregados reciclados. 13
Figura 5 Cilindros de Hormigón.....15
Figura 6 Toma de muestra de agregado fino natural para el análisis granulométrico 20
Figura 7 Serie de tamices utilizada en el análisis granulométrico.....21
Figura 8 Ensayo con cono para verificar la condición SSS del agregado fino natural.....23
Figura 9 Picnómetro con muestra de agregado fino natural para ensayo de gravedad específica.....23
Figura 10 Determinación del peso unitario suelto del agregado fino natural.....26
Figura 11 Determinación del peso unitario compactado del agregado fino natural 26
Figura 12 Muestras de agregado fino natural utilizadas en el ensayo de humedad.....29
Figura 13 Muestras secas de agregado fino natural después del secado en horno 29
Figura 14 Curva granulométrica del agregado grueso natural y límites de especificación 32
Figura 15 Determinación del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso natural 34
Figura 16 Muestras de agregado grueso natural utilizadas en el ensayo de humedad.....36
Figura 17 Muestras secas de agregado grueso natural después del secado en horno 36
Figura 18 Muestra de agregado grueso natural para ensayo de abrasión 37
Figura 19 Muestra de agregado grueso natural posterior al ensayo de abrasión 38
Figura 20 Curva granulométrica del agregado grueso reciclado y límites de especificación.40
Figura 21 Muestras de agregado grueso reciclado para ensayo de humedad 43
Figura 22 Tipos de falla en cilindros de hormigón sometidos a compresión 52
Figura 23 Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra 1-P 55
Figura 24 Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra 2-P 56
Figura 25 Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra C1 57
Figura 26 Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra C2 58
Figura 27 Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra C3 59
Figura 28 Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra C4 60

Tabla 1 Resultados del ensayo granulométrico del agregado fino natural 22
Tabla 2 Curva granulométrica del agregado fino natural y límites de especificación.....22
Tabla 3 Resultados de gravedad específica y absorción del agregado fino natural.....25
Tabla 4 Resultados del peso unitario suelto y compactado del agregado fino natural 28
Tabla 5 Resultado del contenido de humedad del agregado fino natural 30
Tabla 6 Resultados del ensayo granulométrico del agregado grueso natural 31
Tabla 7 Resultados de gravedad específica y absorción del agregado grueso natural.....33
Tabla 8 Resultados del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso natural 35

Tabla 9 Resultado del contenido de humedad del agregado grueso natural 37
Tabla 10 Resultados del ensayo de abrasión del agregado grueso natural 39
Tabla 11 Resultados del ensayo granulométrico del agregado grueso reciclado.....40
Tabla 12 Resultados de gravedad específica y absorción del agregado grueso reciclado 41
Tabla 13 Resultados del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso reciclado..42
Tabla 14 Resultados del contenido de humedad del agregado grueso reciclado 43
Tabla 15 Resultados del ensayo de abrasión del agregado grueso reciclado.....44
Tabla 16 Asentamiento - Recomendaciones ACI.....45
Tabla 17 Estimación del agua de mezcla y contenido de aire – Recomendaciones ACI 46
Tabla 18 Relación agua/cemento en función de la resistencia a compresión y condiciones severas de exposición.....47
Tabla 19 Dosificación 280 kg/cm².....49
Tabla 20 Dosificación 280 kg/cm² con reemplazo parcial al 3% 50
Tabla 21 Dosificación 280 kg/cm² con reemplazo parcial al 5% 51
Tabla 22 Pérdida de resistencia del hormigón con incorporación de material reciclado.....54
Tabla 23 Módulo de elasticidad 1-P 55
Tabla 24 Módulo de elasticidad 2-P 56
Tabla 25 Módulo de elasticidad C1 57
Tabla 26 Módulo de elasticidad C2 58
Tabla 27 Módulo de elasticidad C3 59
Tabla 28 Módulo de elasticidad C4 60
Tabla 29 Determinación de factores para fórmula de módulo de elasticidad.....61
Tabla 30 Ecuación del módulo de elasticidad propuesta 61
Tabla 31 Determinación de factores para fórmula de módulo de elasticidad.....62

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción produce una cantidad importante de residuos de construcción y demolición, conocidos como RCD, los cuales pueden convertirse en un problema ambiental cuando no son gestionados de manera adecuada. Por consiguiente, se estima en la ciudad de Quito, los residuos de construcción generan unos 6000 m^3 diariamente, y que alrededor del 36% de ellos se puede aprovechar atendiendo criterios técnicos y ambientales plenamente acertados (Quito Informa, 2025).

En armonización con esta problemática, la utilización de agregados reciclados se presenta como una solución para reintegrar de parte de estos residuos en nuevos procesos, protocolos y procedimientos de construcción. Además, el agregado grueso reciclado se obtiene a partir del proceso de trituración, categorización y posterior tratamiento en planta de residuos de hormigón provenientes de obras de construcción y de demolición. De esta manera, un material que usualmente sería destinado a escombreras puede transformarse en un insumo granular útil para la elaboración de nuevas mezclas de hormigón (Silva et al., 2019).

No obstante, la incorporación de agregado grueso reciclado puede influir en la resistencia a compresión del hormigón, debido a que sus características físicas difieren de las del agregado natural. Al provenir de hormigón previamente utilizado, sus partículas pueden conservar mortero adherido después del proceso de trituración, lo que incrementa su porosidad y capacidad de absorción. Esta condición puede modificar la cantidad de agua efectiva disponible en la mezcla, afectar la trabajabilidad y alterar la relación agua/cemento, factores que inciden directamente en el desarrollo de la resistencia del hormigón endurecido (Zega, 2008).

A partir de esta consideración, resulta importante estudiar porcentajes bajos de reemplazo, como el 3 % y 5 %, debido a que permiten evaluar la influencia del agregado grueso reciclado sin modificar de forma significativa la dosificación de un hormigón convencional. Esto permite analizar si la mezcla conserva condiciones adecuadas de trabajabilidad, resistencia a compresión y rigidez, mediante la determinación del módulo de elasticidad. De esta manera, se genera información experimental útil para valorar el comportamiento mecánico del hormigón reciclado y su posible aplicación en nuevas mezclas de hormigón.

Para ello, se elaborarán cilindros de hormigón patrón y cilindros con agregado reciclado, los cuales serán sometidos a ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días de curado.

Con los resultados obtenidos, se comparará el desempeño de las mezclas y se determinará la variación de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad producida por la incorporación del agregado reciclado.

El agregado reciclado empleado en esta investigación proviene del Centro Piloto de Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición, el cual se halla ubicado en la zona parroquial de Pifo, una iniciativa local que tiene por objeto la ejecución de procesos interrelacionados al reciclaje, categorización y transformación de escombros en la zona Distrital Metropolitana de Quito. Esta iniciativa se vincula con la gestión de RCD mediante la participación de entidades como EMGIRS-EP, Sustainabuild y Holcim Ecuador, lo que permite relacionar el estudio con una problemática local y con materiales que podrían tener aplicación práctica dentro del sector de la construcción ecuatoriano (Holcim Ecuador, 2025).

1.1 Justificación e importancia

El hormigón es uno de los materiales más utilizado en el sector de la construcción de la nación ecuatoriana, debido a su alta resistencia, su durabilidad y la facilidad de colocación en las distintas obras de ingeniería civil. No obstante, el incremento en las actividades de construcción y demolición ha ocasionado cantidades considerables de estos residuos conocidos como RCD, en donde se remarca que esta clase de materiales, en la mayoría de los casos, no son reclasificados o considerados como materia reutilizable, de tal manera que son enviados directamente a botaderos o escombreras.

En consonancia con esta problemática, la utilización del agregado grueso reciclado es una oportunidad notable para reinvertir parte de esos residuos en nuevos procesos propios del sector de construcciones. En cuanto a la obtención de este material, se hace a partir del triturado y la clasificación de los residuos del hormigón, de tal forma que se pueda obtener un residuo, transformándose en un material granular que sea totalmente apto para ser implementado en nuevas mezclas. Complementariamente, el uso del agregado grueso reciclado ayuda a reducir la extracción de los agregados naturales, los cuales representan recursos no renovables y, a su vez, contribuye al impulse de la sostenibilidad en la gestión de residuos generados para el sector especializado en actividades de construcción

La investigación se justifica porque el agregado grueso reciclado presenta características distintas al agregado natural, principalmente por la presencia de mortero adherido y una mayor

capacidad de absorción. Estas condiciones pueden modificar el comportamiento de la mezcla y afectar tanto la resistencia a compresión como la rigidez del hormigón endurecido, evaluada mediante el módulo de elasticidad. Por lo tanto, resulta necesario analizar si su incorporación en porcentajes bajos influye en el comportamiento mecánico del hormigón (Zega, 2008).

Otro aspecto importante es el origen del material utilizado, ya que el agregado reciclado del Centro Piloto de Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición, el cual se halla ubicado en la zona parroquial de Pifo, en el distrito Metropolitano de Quito. Por lo tanto, este estudio permitiría relacionar la investigación con una problemática del contexto ecuatoriano y con una alternativa que podría tener una eventual aplicación práctica en el sector de la construcción de la localidad (Holcim Ecuador, 2025).

Desde una focalización experimental, esta investigación persigue la generación de información sobre la resistencia a compresión y la rigidez del hormigón, evaluada mediante el módulo de elasticidad, cuando se incorporan bajos porcentajes de agregado grueso reciclado. En consecuencia, este análisis de porcentajes de reemplazo de 3 % y 5 % es importante, ya que permite analizar si efectivamente esos porcentajes de sustitución podrían emplearse sin dañar significativamente la resistencia a compresión de un hormigón convencional de 280 kg/cm².De esta forma, será posible determinar si dichos niveles de sustitución mantienen un desempeño adecuado bajo condiciones controladas de laboratorio.

1.2 Planteamiento del problema

La ingeniería civil desempeña un papel fundamental en el desarrollo de la sociedad, debido a su influencia directa en los ámbitos económico, social y ambiental. Desde la perspectiva ambiental, el desarrollo de obras de infraestructura y edificaciones ha seguido tradicionalmente un modelo de suministro lineal basado en extraer, utilizar y desechar materiales. Este sistema ha generado impactos como el agotamiento progresivo de canteras de agregados naturales y la acumulación de residuos de construcción (Gonzales, 2020).

Dentro de este contexto, el hormigón prevalece como uno de los más materiales con mayor implementación en la delimitación concerniente el sector de la construcción. Según la Global Cement and Concrete Association, este material es el más empleado en el sector constructivo y constituye el segundo recurso más consumido a nivel mundial después del agua (GCCA, 2021). Debido a sus propiedades mecánicas, durabilidad y facilidad de aplicación, el hormigón

se utiliza en gran parte de las obras civiles y puede representar una proporción significativa del volumen total de las construcciones a escala global (UNACEM Ecuador, 2025).

A nivel nacional, una parte importante de los residuos de construcción y demolición no recibe una clasificación ni aprovechamiento adecuado, por lo que termina siendo depositada en botaderos o escombreras. Frente a esta situación, el uso de agregado grueso reciclado surge como una alternativa para reducir el impacto ambiental asociado tanto a la extracción de agregados naturales como a la disposición final de residuos. De esta manera, el procesamiento de RCD permite obtener un material granular que puede ser reincorporado en nuevas mezclas de hormigón.

No obstante, el uso de agregado grueso reciclado en el hormigón aún requiere ser más estudiado, ya que sus propiedades no son iguales a las de un agregado natural. Al provenir de hormigón previamente utilizado, este material puede presentar mortero adherido, mayor absorción de agua y una textura más irregular. Estas características pueden influir en la cantidad de agua necesaria para la mezcla, en su trabajabilidad y, finalmente, en la resistencia a la compresión del hormigón endurecido (Zega, 2008).

El problema específico de esta investigación se relaciona con la limitada información experimental disponible en el contexto ecuatoriano sobre el comportamiento del módulo de elasticidad del hormigón elaborado con agregado grueso reciclado. Seguidamente, se argumenta que esta limitación cobra relevancia debido a que el material que se emplea es proveniente del Centro Piloto de Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición, el cual se halla ubicado en la zona parroquial de Pifo, una iniciativa local que tiene por objeto la ejecución de procesos interrelacionados al reciclaje, categorización y transformación de escombros en la zona Distrital Metropolitana de Quito; esto justifica que, para asegurar que se lleven a cabo ensayos en cilindros de hormigón, sea necesario evaluar reemplazos bajos del 3 % y del 5 % con el objetivo de contrastar el comportamiento de dichos reemplazos frente a la mezcla convencional de 280 kg/cm² ,bajo condiciones estrictamente controladas en laboratorio.

A partir de lo expuesto, la pregunta de investigación que orienta este trabajo es la siguiente: ¿Cómo influye el reemplazo parcial del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado proveniente del Centro Piloto de Aprovechamiento de RCD ubicado en Pifo, en porcentajes del 3 % y 5 %, en la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de un hormigón convencional de 280 kg/cm²?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del hormigón elaborado con sustitución parcial del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado en porcentajes del 3 % y 5 %, mediante ensayos de resistencia a la compresión, considerando una dosificación correspondiente a un hormigón convencional de 280 kg/cm², utilizando agregados pétreos del sector de Pifo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades mecánicas del agregado natural y del agregado grueso reciclado provenientes del sector de Pifo mediante ensayos de laboratorio establecidos en la normativa técnica Ecuatoriana.
- Determinar la resistencia a la compresión de hormigones con sustitución parcial del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado en porcentajes del 3 % y 5 %, considerando una relación agua/cemento diseñado para un hormigón convencional de 280 kg/cm².
- Determinar la variación de la resistencia a la compresión del hormigón en función de los porcentajes de reemplazo parcial del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado.
- Determinar la ecuación del módulo de elasticidad estático de la mezcla patrón y de las mezclas con reemplazo parcial del 3 % y 5 % de agregado grueso reciclado, con el fin de comparar la rigidez del hormigón reciclado frente al hormigón convencional.

1.4 Alcance

El presente trabajo de integración curricular tiene como alcance evaluar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del hormigón reciclado mediante el reemplazo parcial del 3 % y 5 % del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado, comparando los resultados obtenidos con un hormigón convencional de 280 kg/cm².

El análisis tendrá lugar bajo condiciones de laboratorio controladas en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, comprendiendo cada uno de los procesos vinculados a la fabricación, curado y ensayo de cilindros de hormigón convencional, así como también del hormigón tipo reciclado, adoptando para su fabricación cada uno los procedimientos normalizados para su correcta fabricación.

Es imperativo señalar que, el estudio se asocia con un ensayo totalmente experimental y comparativo, a nivel de laboratorio. Por lo tanto, no se hace referencia al dimensionamiento de los elementos de hormigón ni a su aplicación a obras reales. Por lo tanto, la investigación solo cubre el ensayo de sustitución del 3 % y 5 % del agregado grueso natural, sin tomar en consideración el ensayo de otros porcentajes de sustitución ni propiedades complementarias tales como la resistencia a la flexión, la durabilidad, comportamiento a largo plazo, análisis económico, valoración ambiental detallada.

De este modo, se estableció que el enfoque del estudio es determinar si la sustitución parcial del agregado grueso natural por agregado reciclado afecta en la resistencia a la compresión del hormigón, de tal manera que los resultados experimentales obtenidos en este ejercicio investigador constituyan bases provechosas para la realización de futuros estudios y profundizaciones relacionadas con el tema.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Áridos

Los áridos, también denominados agregados pétreos, son materiales granulares que pueden obtenerse de fuentes naturales o mediante procesos de reciclaje. Dentro del hormigón, estos materiales son uno de los elementos que mayor proporción presentan, ya que los agregados finos y gruesos constituyen entre el 70 % y el 80 % en volumen del hormigón. Por este motivo, sus propiedades físicas y mecánicas impactan de una manera directa en el comportamiento del hormigón. Concretamente, el agregado grueso tiene un papel relevante en la resistencia mecánica del hormigón, ya que impacta en la carga que será capaz de soportar, rigidez, estabilidad en volumen y durabilidad (León & Ramírez, 2010).

Los agregados empleados en la presente investigación corresponden al material Rosado de Holcim, proveniente de la cantera ubicada en el sector de Pifo. Para la elaboración de las mezclas de hormigón se consideraron tres fracciones granulométricas. Como agregado fino se utilizó arena no lavada, con partículas que oscilan en cantidades de 0 mm y 4,75 mm. En concordancia con el agregado grueso natural, es importante mencionar que se utilizaron dos tipos de materiales: Piedra N.º 89, con un índice de distribución granulométrica de 1,18 mm a 9,5 mm, y Piedra N.º 67, con tamaño nominal entre 5 mm y 19 mm. La combinación de estos materiales permite conformar una estructura granular apropiada para el diseño de las mezclas de hormigón utilizadas en la investigación.

Figura 1 *Agregados pétreos utilizados en la elaboración de las mezclas de hormigón*



Fuente. Fotografías tomadas en la planta de Holcim ubicada en Pifo. Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

2.1.1 Propiedades de los Áridos

Entre las principales propiedades de los áridos que deben evaluarse se encuentran la granulometría, gravedad específica, peso unitario, contenido de humedad y resistencia a la abrasión, tanto para el agregado fino como para el agregado grueso correspondientemente. Estas características influyen directamente en la trabajabilidad del hormigón, en el diseño de la dosificación y en el comportamiento mecánico del hormigón.

2.1.1.1 Granulometría

La granulometría es una propiedad que permite conocer la distribución de tamaños de las partículas que conforman una muestra granular. Para determinarla, el material debe pasar por una serie de tamices normalizados, registrando la cantidad retenida en cada uno de ellos. A partir de estos datos, se calculan los porcentajes retenidos y los porcentajes que pasan en función de la masa inicial de la muestra, lo que permite representar gráficamente la curva granulométrica (García, 1996).

Esta curva permite verificar si el material cumple con los límites establecidos para su utilización en mezclas de hormigón. Por añadidura, permite determinar la granulometría dominante y proporcionar información para la práctica de ensayos posteriores. En contrapartida, el análisis granulométrico permite fundamentar una buena relación de proporción entre los materiales finos y gruesos, favoreciendo su buena distribución en la

mezcla y evitando las posibles alteraciones de trabajabilidad, la compacidad y contenido en vacíos del hormigón.

2.1.1.2 Densidad y Gravedad Específica

La gravedad específica permite establecer la relación entre la densidad del agregado y la densidad del agua por lo que resulta necesario para determinar las cantidades específicas de agregado dentro de la mezcla para un determinado volumen. Por su parte, la densidad permite conocer la masa del agregado en función del volumen que ocupa, considerando condiciones como el estado seco, húmedo o saturado (García, 1996).

2.1.1.3 Peso unitario volumétrico

El peso unitario volumétrico, también denominado densidad aparente del agregado, se describe como el vínculo entre el volumen total que ocupa en conjunto con la masa del material, incluyendo los vacíos presentes entre sus partículas Dicha propiedad puede establecerse en condición Compactada o suelta, dependiendo de la forma de procedimiento empleado en el ensayo. Referente a la condición suelta, se introduce el agregado en el recipiente normalizado (previamente pesado) y de volumen conocido, de forma que no se aplique compactación adicional al agregado; en cambio, en la condición compactada, el recipiente se incorpora en 3 capas aproximadamente iguales y cada una se compacta mediante 25 penetraciones con la varilla (distribuidas también sobre la superficie del agregado) (ASTM International, 2023).

2.1.1.4 Contenido de Humedad

El contenido de humedad de los agregados corresponde a la cantidad de agua presente en una muestra de material granular al momento de realizar el ensayo. Esta humedad puede encontrarse tanto en la superficie de las partículas como en los poros internos del agregado, por lo que su determinación permite conocer el estado real del material antes de incorporarlo en la mezcla de hormigón. Para obtener este valor, se registra inicialmente la masa húmeda de la muestra, preferiblemente un día antes de la dosificación, y posteriormente se somete a un proceso de secado en horno hasta alcanzar masa constante. La diferencia entre la masa húmeda y la masa seca permite calcular el porcentaje de humedad evaporable del agregado (ASTM International, 2019).

Esta propiedad es importante en el diseño de mezclas de hormigón, debido a que el agua contenida en los agregados puede modificar la cantidad de agua efectiva disponible durante el mezclado. Si este parámetro no se considera, la relación agua-cemento puede variar, afectando la trabajabilidad del hormigón fresco y la resistencia a compresión del hormigón endurecido.

En el caso del agregado grueso reciclado, el contenido de humedad adquiere mayor relevancia, ya que este material suele presentar mayor absorción debido a la presencia de mortero adherido y a una estructura más porosa en comparación con el agregado natural.

2.1.1.5 Abrasión

American Concrete Institute (2000) define la abrasión como la capacidad que posee un material para resistir el desgaste mecánico superficial ocasionado por acciones de fricción, impacto o rozamiento. Para los áridos, esta propiedad se puede considerar como un parámetro importante de calidad, ya que permite predecir su comportamiento ante los desgastes que se producen durante las fases del mezclado, compactado o en la vida del hormigón.

La resistencia a la abrasión de los áridos no se determina directamente, sino que se hace mediante métodos normalizados de ensayo, como la prueba de abrasión en la máquina de Los Ángeles, lo cual permite determinar la degradación del agregado grueso bajo parámetros controlados en cuanto al impacto y la fricción respectivamente. Un árido con baja resistencia al desgaste puede producir una mayor cantidad de partículas finas, lo cual podría incrementar la demanda de agua y modificar el comportamiento mecánico del hormigón.

Figura 2 *Influencia de las propiedades evaluadas de los áridos en el comportamiento del hormigón*

Propiedad	Influencia en el hormigón
Granulometría	Permite conocer la distribución de tamaños de las partículas del agregado y verificar si el material cumple con los límites establecidos para su uso en mezclas de hormigón. Influye en la proporción entre materiales finos y gruesos, favoreciendo la compacidad, la trabajabilidad y la reducción de vacíos.
Densidad y gravedad específica	Permiten determinar la relación entre masa y volumen del agregado, así como su comparación con la densidad del agua. Estas propiedades son útiles para establecer las proporciones de los materiales dentro de la mezcla y el volumen ocupado por el agregado.
Peso unitario volumétrico	Determina la relación entre la masa del agregado y el volumen total que ocupa, incluyendo los vacíos entre partículas. Influye en la estimación de la cantidad de material requerida por unidad de volumen, en la compacidad del agregado y en la dosificación del hormigón.
Contenido de humedad	Permite conocer la cantidad de agua presente en el agregado antes de incorporarlo a la mezcla. Su determinación es importante porque puede modificar el agua efectiva del hormigón, afectar la relación agua-cemento, la trabajabilidad y la resistencia a compresión.
Abrasión	Evalúa la capacidad del agregado para resistir el desgaste mecánico por fricción, impacto y rozamiento. Constituye un indicador de calidad del árido y permite estimar su comportamiento durante el mezclado, la compactación y la vida útil del hormigón.

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

2.2 Cemento

El cemento es un material que, al mezclarse con agua, forma una pasta que permite unir los agregados dentro del hormigón. Durante este proceso se producen reacciones químicas que

hacen que la mezcla primero sea moldeable y, con el paso del tiempo, pierda plasticidad y se endurezca hasta adquirir una consistencia similar a la piedra. Por esta razón, el cemento Portland se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en la construcción, ya que permite formar hormigones resistentes y duraderos (Vidaud, 2013).

Ahora, se argumenta que esta clase de material se obtiene, como fuente principal a partir del proceso de calcinación de caliza y arcilla sometidas a elevadas temperaturas. Como resultado de este proceso se produce el clínker, el cual posteriormente se muele junto con una cantidad controlada de yeso. El yeso cumple la función de regular el tiempo de fraguado, es decir, controla la rapidez con la que la pasta de cemento empieza a endurecerse. Según Vidaud (2013), el cemento Portland está compuesto principalmente por óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, elementos que contribuyen al desarrollo de resistencia del material.

Dentro del hormigón, el cemento tiene gran importancia, pues va a formar la pasta que va a recubrir y unirá las partículas tanto de agregado fino como de agregado grueso. Sus propiedades como la finura, la composición y la calidad de la misma, afectan la facilidad de utilización de la mezcla, el tiempo de fraguado, la resistencia del hormigón y su durabilidad en el tiempo. Por eso la elección del tipo de cemento tiene que realizarse en función del uso que se le va a aplicar al hormigón y de las características del proyecto.

En la presente investigación se utilizó cemento hidráulico Holcim Fuerte Tipo GU, debido a que es un cemento de uso general y de fácil disponibilidad en el mercado local. Este tipo de cemento se emplea comúnmente en elementos como cimentaciones, columnas, vigas, losas, aceras, bordillos, bloques, adoquines y trabajos generales de construcción.

2.2.1 Consistencia de la pasta de cemento

La consistencia de la pasta de cemento corresponde a la cantidad de agua necesaria para obtener una pasta cementante con plasticidad y fluidez normalizadas. Esta propiedad permite establecer una condición de referencia para evaluar el comportamiento físico del cemento bajo condiciones controladas de ensayo. Su determinación es importante porque sirve como base para realizar otros ensayos, especialmente los relacionados con el tiempo de fraguado inicial y final. Además, el contenido de agua influye directamente en la hidratación del cemento, en la trabajabilidad de la pasta y en la estructura que se forma durante el endurecimiento (ASTM International, 2023).

2.3 Agregado grueso reciclado

2.3.1 Definición y origen del agregado grueso reciclado

El agregado grueso reciclado es un material granular obtenido a partir del procesamiento de residuos de construcción y demolición, principalmente de elementos de hormigón endurecido que han sido triturados, clasificados y tamizados para ser reutilizados en nuevas mezclas de hormigón. A diferencia del agregado natural, que proviene de canteras o depósitos naturales, el agregado reciclado se origina a partir del aprovechamiento de materiales previamente utilizados en obras civiles, por lo que su uso representa una alternativa para reducir el consumo de recursos pétreos naturales.

En el panorama ecuatoriano, la construcción conforma una actividad de relevancia para la economía nacional, de tal manera que tiene una participación cercana al 7 % del Producto Interno Bruto de Ecuador. Este avance, no obstante, también da lugar a una cantidad elevada de residuos de construcción y demolición. En el caso de la ciudad de Quito, se estima una producción de aproximadamente 6 000 m^3 de RCD en un día, de los cuales alrededor del 36 % podría ser reutilizado bajo criterios técnicos y ambientales adecuados (Quito Informa, 2025).

Los residuos de construcción y demolición están compuestos, fundamentalmente, por hormigón, mampostería, cerámicos y demás elementos pétreos. Dichos residuos, tras la gestión y el adecuado procesamiento, pueden convertirse en agregados reciclados para ser incorporados a nuevas mezclas de hormigón. De este modo, se puede llegar a reducir la cantidad de residuos que se envían a los puntos de vertido, reducir la extracción de agregados naturales, de manera tal que se promueve un enfoque panorámico más sostenible en el sector de la construcción (Suárez-Silgado et al., 2019).

2.3.2 Proceso de obtención del agregado grueso reciclado

El agregado grueso reciclado se obtiene a partir del procesamiento de residuos de construcción y demolición. Para que este material pueda ser empleado en nuevas mezclas de hormigón, es necesario reducir el tamaño de sus partículas mediante procesos de demolición, trituración y clasificación. De esta manera, los RCD se transforman en partículas de menor tamaño, aptas para ser transportadas, tamizadas y utilizadas como agregado reciclado (Zega, 2008).

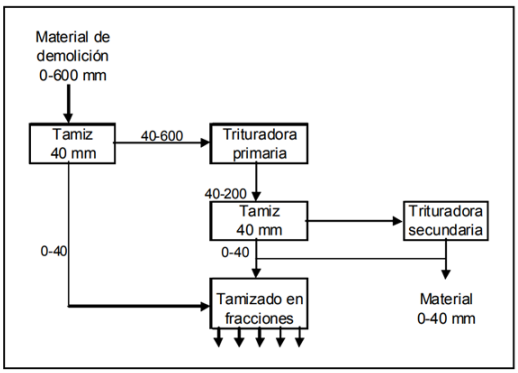
Una vez se han recogido los RCD, se inicia el proceso mediante la separación de los contaminantes del material que se va a procesar. Esta fase se puede llevar a cabo de forma manual para la separación de madera, plásticos, yeso u otros residuos no pétreos, mientras que

la separación del acero puede ser más sencilla con la utilización de la barra magnética o de separadores magnéticos de velocidad variable. Este control previo es importante ya que la presencia de impurezas en el producto final puede perjudicar la calidad del agregado reciclado. Por ejemplo, los fragmentos de cerámica triturada pueden conservar superficies lisas o vidriadas, lo cual genera una disminución notable de la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado, afectando directamente el comportamiento mecánico y la resistencia del hormigón.

Una vez seleccionado el material, se realiza la trituración. Generalmente, se emplea una trituración primaria para reducir los fragmentos de mayor tamaño y, si es necesario, una trituración secundaria para obtener partículas más uniformes. Tras el proceso de trituración, el material pasa por un sistema de tamizado el que clasifica las diferentes fracciones granulométricas y de esta manera, se logra el agregado grueso reciclado con el tamaño adecuado y para que sea utilizado en mezclas de hormigones.

A su vez, Zega (2008) comenta que las instalaciones que se encuentran destinadas a producir agregados reciclados son parecidas a las que producen agregados naturales, aunque requieren unas adaptaciones particulares, sobre todo, en el control de la eliminación de contaminantes y en el control del tamaño final de las partículas. Estas plantas pueden trabajar con sistemas abiertos o cerrados. En los sistemas abiertos, el material pasa por las etapas de trituración y tamizado sin recircular el material que no cumple con el tamaño requerido. En cambio, en los sistemas cerrados, las partículas que no alcanzan la granulometría deseada retornan nuevamente al proceso de trituración, lo que permite obtener un mayor control sobre el tamaño máximo del agregado producido.

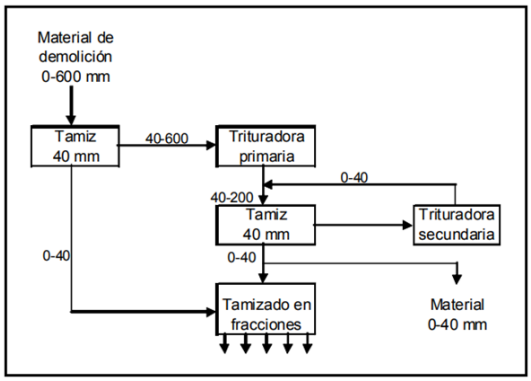
Figura 3 *Diagrama de flujo de una planta con sistema abierto para la producción de agregados reciclados.*



Fuente: Tomado de Hormigones reciclados: caracterización de los agregados gruesos reciclados, *por C. J. Zega, 2008, UNCPBA. En la fuente original, el esquema se presenta como adaptado de ACI (2002).*

En la Imagen 3, se presenta la esquematización propia de una planta, la cual dispone de un sistema abierto para ejecutar procesos de producción de agregados reciclados, en la cual el material de demolición pasa por procesos de tamizado, trituración primaria, trituración secundaria y clasificación granulométrica.

Figura 4 *Diagrama de flujo de una planta con sistema cerrado para la producción de agregados reciclados.*



Fuente: Tomado de Hormigones reciclados: caracterización de los agregados gruesos reciclados, *por C. J. Zega, 2008, UNCPBA. En la fuente original, el esquema se presenta como adaptado de ACI (2002).*

En la Imagen 4 se muestra la configuración estructural de una planta, la cual dispone de un sistema cerrado para la ejecución de procesos de agregados reciclados, donde el material de demolición es sometido a procesos de tamizado, así como a procesos de trituración de orden primario y secundario, conjuntamente con la recirculación del material, con el fin de controlar el tamaño final de las partículas obtenidas. En este sentido, la diferencia principal entre una planta con sistema abierto y una planta con sistema cerrado se relaciona con el control de la granulometría final del agregado reciclado, ya que el sistema cerrado permite recircular el material que no cumple con el tamaño requerido.

2.3.3 Mortero Adherido en el agregado grueso

La principal diferencia que existe entre el agregado grueso natural y el reciclado es la existencia de mortero adherido en el agregado reciclado. Este mortero corresponde a restos de pasta de cemento endurecida que quedan unidos a las partículas después de triturar elementos

de hormigón provenientes de residuos de construcción y demolición. Por esta razón, el agregado reciclado suele presentar una superficie más porosa, irregular y con mayor capacidad de absorción que un agregado natural de cantera (Zega, 2008).

El mortero que se encuentra en el interior de las partículas recicladas no siempre se reparte de la misma forma en todas ellas. Zega (2008) verifica que, en el agregado reciclado pueden distinguirse partículas formadas exclusivamente por roca original, partículas constituidas parcialmente por roca y mortero adherido, y partículas constituidas casi únicamente por mortero o pasta dura de cemento. La proporción de uno u otro tipo de partícula depende de la calidad del hormigón en el que se origina el agregado reciclado, del procedimiento de demolición y la técnica de trituración implementada.

Por eso, la existencia de mortero adherido en el agregado grueso reciclado, se vuelve un aspecto relevante que contribuye a incrementar la porosidad y la absorción del agregado reciclado. En consecuencia, esto puede causar variaciones en la cantidad de agua a implementar en el proceso de dosificación, modificando las propiedades de trabajabilidad de la mezcla, así como el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón.

2.4 Hormigón

En referencia al hormigón, es un material que se obtiene a partir de la unificación del cemento, agregado grueso, agregado fino, en medidas proporcionales acertadas. Su desempeño depende tanto de una correcta dosificación como de la calidad y características de los materiales que lo conforman. Asimismo, en función de las exigencias del proyecto, se pueden integrar aditivos a fin de mejorar la trabajabilidad, modificación del tiempo de fraguado, o bien modificar algunas propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido.

La resistencia a la compresión es una de las propiedades más destacadas del hormigón, ya que permite evaluar la capacidad de dicho material para soportar cargas aplicadas, que se ejercen sobre un área determinada. Esta resistencia se expresa de forma habitual en kg/cm^2 o MPa y depende de varios factores, entre los que se encuentran la relación agua/cemento, la calidad del cemento, las propiedades físicas de los agregados, el proceso de mezclado, la compactación y las condiciones de curado. Por esta razón, en esta investigación la resistencia a la compresión se considera el principal parámetro para analizar el comportamiento mecánico del hormigón convencional y del hormigón con agregado grueso reciclado.

Figura 5 *Cilindros de Hormigón*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

2.4.1 Propiedades de los Hormigones

2.4.1.1 Trabajabilidad

La trabajabilidad del hormigón se asocia con la capacidad con la que la mezcla pueda ser manipulada durante los procesos concernientes a la preparación, transporte, colocación y compactación, manteniendo una adecuada homogeneidad entre sus componentes. Esta propiedad está frontalmente vinculada con la consistencia del hormigón fresco y puede ser evaluada mediante el ensayo de asentamiento conocido como ensayo del Cono de Abrams. Conforme a la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1578, el presente procedimiento tiene la facultad de determinar el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico, el que nos permite determinar si la mezcla tiene suficiente consistencia para ser colocada bien en obra o en laboratorio (INEN, 2010).

Una mezcla que es plenamente trabajable facilita el llenado de los moldes, la compactación, la distribución uniforme de los agregados dentro de la pasta cementante; una mayor fluidez no entiende mejor calidad de una mezcla, ya que el exceso de agua puede dar lugar a la segregación, y a la pérdida de cohesión, y una disminución de la resistencia final del hormigón.

2.4.1.2 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión simple es una de las propiedades mecánicas más importantes del hormigón, ya que permite evaluar su capacidad para soportar cargas aplicadas sobre una determinada área. Esta propiedad se expresa como esfuerzo y comúnmente se representa en unidades como kg/cm², MPa o, en algunos casos, libras por pulgada cuadrada, conocidas como psi. De acuerdo con la NTE INEN 1573, resulta posible mencionar que esta

clase de ensayo permite determinar satisfactoriamente el índice de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico (INEN, 2010).

Para determinar esta resistencia se realiza un ensayo sobre especímenes cilíndricos de hormigón, elaborados y curados bajo procedimientos normalizados. En esta investigación, la preparación y curado de los cilindros se relaciona con la norma ASTM C31/C31M, mientras que el ensayo de resistencia a la compresión se basa en la norma ASTM C39/C39M. Estos procedimientos permiten evaluar el comportamiento del hormigón endurecido frente a cargas de compresión y comparar el desempeño entre las mezclas convencionales y aquellas con agregado grueso reciclado.

2.4.1.3 Módulo de elasticidad del hormigón

El módulo de elasticidad del hormigón es una propiedad mecánica que permite evaluar la rigidez del material frente a la aplicación de cargas. Esta propiedad relaciona el esfuerzo aplicado con la deformación que experimenta el hormigón dentro de un rango determinado de comportamiento. En términos generales, un hormigón con mayor módulo de elasticidad presenta menor deformación ante una misma carga, mientras que un hormigón con menor módulo tiende a deformarse con mayor facilidad.

Esta propiedad es importante porque permite comprender el comportamiento del hormigón endurecido más allá de su resistencia a la compresión. Aunque dos mezclas puedan alcanzar valores similares de resistencia, su rigidez puede ser diferente dependiendo de la calidad de los materiales, la relación agua/cemento, la compactación, el curado y las características de los agregados utilizados. Por esta razón, el módulo de elasticidad constituye un parámetro útil para analizar el desempeño mecánico del hormigón.

De acuerdo con la norma ASTM C469/C469M, el módulo de elasticidad estático del hormigón se determina mediante el ensayo de compresión en especímenes cilíndricos, registrando la relación entre esfuerzo y deformación longitudinal. Esta norma permite obtener un valor de módulo dentro del rango de trabajo del hormigón endurecido, generalmente considerando esfuerzos hasta aproximadamente el 40 % de la resistencia última del espécimen (ASTM International, 2022).

En el caso del hormigón elaborado con agregado grueso reciclado, el módulo de elasticidad puede verse influenciado por las características propias del material reciclado. La presencia de mortero adherido, una mayor porosidad y capacidad de absorción pueden

modificar la unión entre la pasta cementante y el agregado, así como la rigidez general de la mezcla. Por ello, el hormigón con agregado reciclado puede presentar valores de módulo de elasticidad diferentes a los de un hormigón convencional elaborado únicamente con agregado natural (Zega, 2008).

3. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se emplea es el experimental, dado que se realizaron ensayos a nivel de laboratorio para determinar el comportamiento mecánico del hormigón fabricado con agregado grueso reciclado, que fueron obtenidos del Centro Piloto de Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición, que se ubica en el sector de Pifo. La investigación se realizó con condiciones totalmente controladas, para lo cual se utilizaron materiales caracterizados de manera previa y también, mezclas preparadas específicamente para este estudio.

Se comenzó con la caracterización, para lo cual se emplearon el agregado grueso natural, agregado fino natural y el agregado grueso reciclado. El proceso de caracterización de los materiales nos permitió conocer las propiedades físicas de éstos y obtener los parámetros que eran requeridos para el diseño de las mezclas del hormigón.

Posteriormente, se realizaron mezclas patrón con diferentes relaciones agua/cemento, con el objetivo de definir la dosificación que permitiera alcanzar una resistencia de diseño de 280 kg/cm². Una vez seleccionada la mezcla de referencia, se procedió al reemplazo parcial del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado en porcentajes del 3 % y 5 %.

La investigación también presenta un enfoque comparativo, ya que se analizaron los resultados obtenidos entre el hormigón convencional y las mezclas elaboradas con agregado grueso reciclado. Esta comparación se realizó mediante ensayos de resistencia a la compresión en cilindros de hormigón, con el fin de determinar la influencia del agregado reciclado en el comportamiento del material.

3.2 Materiales utilizados

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron materiales empleados en la elaboración de hormigón, junto con agregado grueso reciclado obtenido a partir de residuos de construcción y demolición procesados para su reutilización. Estos materiales fueron empleados

tanto en las mezclas de referencia como en las mezclas con reemplazo parcial del agregado grueso natural.

3.2.1 Cemento

Se utilizó cemento Holcim tipo GU como material cementante para la elaboración de las mezclas de hormigón. Este cemento cumple la función de unir los agregados con el agua, formando una pasta que permite el desarrollo de la resistencia mecánica del hormigón durante el proceso de endurecimiento. Para mantener condiciones uniformes en el estudio, se utilizó el mismo tipo de cemento en todas las dosificaciones.

3.2.2 Agua

El agua empleada en la investigación fue utilizada tanto para la preparación de las mezclas de hormigón como para el proceso de curado. Su incorporación permitió la hidratación del cemento y contribuyó a obtener una mezcla con la trabajabilidad adecuada durante el proceso de elaboración.

3.2.3 Agregado fino natural

El agregado fino natural empleado en esta investigación fue obtenido de la planta Holcim ubicada en el sector de Pifo. Este material corresponde a una arena de origen pétreo, utilizada en la elaboración de hormigón y se empleó en todas las mezclas desarrolladas durante el estudio.

3.2.4 Agregado grueso natural

El agregado grueso natural empleado en la investigación provino de la planta Holcim ubicada en el sector de Pifo. Este material está constituido por partículas pétreas de tamaño superior al agregado fino y cumple una función fundamental dentro de la mezcla de hormigón, aportando resistencia mecánica y contribuyendo a la estabilidad del material endurecido.

3.2.5 Agregado grueso reciclado

El agregado grueso reciclado empleado en esta investigación fue obtenido a partir de residuos de hormigón procesados en el Centro Piloto de Aprovechamiento de Escombros de Pifo. Este material forma parte de una iniciativa desarrollada con la participación de Holcim Ecuador, orientada a la reutilización de residuos de construcción y demolición mediante su transformación en agregados reciclados aptos para nuevos procesos constructivos.

En el presente estudio, el agregado grueso reciclado se utilizó como reemplazo parcial del agregado grueso natural en porcentajes del 3 % y 5 %, manteniendo constantes los demás componentes de la mezcla. Su incorporación permitió evaluar la influencia de este material en la resistencia a la compresión del hormigón, mediante ensayos realizados bajo condiciones controladas de laboratorio.

3.3 Caracterización de los materiales

Antes de elaborar las mezclas de hormigón convencional y hormigón con agregado reciclado, se realizó la caracterización de los materiales empleados en la investigación. Esta etapa tuvo como finalidad conocer sus propiedades físicas y obtener los parámetros necesarios para el diseño de mezcla, ya que las características de los agregados influyen directamente en la dosificación, trabajabilidad y comportamiento del hormigón en estado fresco y endurecido (ACI Committee 211, 2009).

Los materiales evaluados fueron el agregado fino natural, el agregado grueso natural y el agregado grueso reciclado obtenido a partir de residuos de hormigón triturado. Para cada material se realizaron ensayos de laboratorio conforme a los procedimientos establecidos en las guías del Laboratorio de Hormigones de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y en las normas técnicas aplicables para agregados.

La caracterización permitió determinar propiedades como la distribución granulométrica, el peso unitario, el contenido de humedad, la absorción, la gravedad específica y la resistencia al desgaste. Para ello, se consideraron procedimientos normalizados como el análisis por tamizado, la determinación del peso unitario, el contenido de humedad, la gravedad específica y absorción, y el ensayo de abrasión (ASTM International, 2020).

Los resultados obtenidos sirvieron como base para elaborar las mezclas patrón y las mezclas con reemplazo parcial del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado en porcentajes del 3 % y 5 %. Además, permitieron realizar las correcciones necesarias en las cantidades de agua y agregados, considerando las condiciones reales de humedad y absorción de los materiales, con el fin de mantener la relación agua/cemento definido para el diseño de mezcla (ACI Committee 211, 2009).

De esta manera, la caracterización de los agregados permitió verificar sus condiciones iniciales y establecer una base técnica para la fabricación de los cilindros destinados a los ensayos de resistencia a la compresión.

3.4 Caracterización del Agregado fino natural

Para conocer las propiedades físicas del agregado fino utilizado en la investigación, se realizaron ensayos de laboratorio conforme a los procedimientos establecidos en las guías del Laboratorio de Hormigones de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y en las normas técnicas aplicables.

La caracterización de este material permitió obtener los parámetros necesarios para el diseño de las mezclas de hormigón, entre ellos la granulometría, gravedad específica, absorción y contenido de humedad.

3.4.1 Granulometría

Para conocer la distribución de tamaños de las partículas del agregado fino natural, se realizó el análisis granulométrico siguiendo los procedimientos establecidos en la guía del Laboratorio de Hormigones de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y en la norma técnica aplicable para el ensayo por tamizado de agregados.

Para el desarrollo del ensayo se preparó una muestra representativa de agregado fino con una masa de 500 ± 10 g. Antes de iniciar el procedimiento, se verificó el estado de los equipos y se registró la masa inicial de la muestra mediante una balanza de precisión, con el propósito de obtener los datos necesarios para calcular los porcentajes retenidos y el porcentaje que pasa por cada tamiz.

Figura 6 *Toma de muestra de agregado fino natural para el análisis granulométrico*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Posteriormente, la muestra fue colocada en una serie de tamices normalizados, ordenados de mayor a menor abertura. Para el análisis del agregado fino se emplearon los tamices No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100 y No. 200, además de la bandeja de fondo para recolectar el material más fino.

Figura 7 *Serie de tamices utilizada en el análisis granulométrico*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Una vez armado el conjunto de tamices, la muestra fue colocada en el equipo de tamizado mecánico, donde fue sometida a movimientos horizontales durante el tiempo establecido para lograr la separación de las partículas de acuerdo con su tamaño. Finalizado el proceso, se retiró cuidadosamente el material retenido en cada tamiz y se registró su masa mediante una balanza de precisión.

Con los datos obtenidos, se calcularon la masa retenida parcial, la masa retenida acumulada, el porcentaje retenido, el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje que pasa por cada tamiz. Estos valores permitieron elaborar la curva granulométrica del agregado fino natural y evaluar la distribución de tamaños de sus partículas.

Los porcentajes se determinaron mediante las siguientes expresiones:

$$\%\ Retenido = \frac{Masa\ retenida\ acumulada}{Masa\ de\ la\ muestra} x\ 100 \quad (1)$$

$$\%Pasa = 100 - \%\ Retenido \quad (2)$$

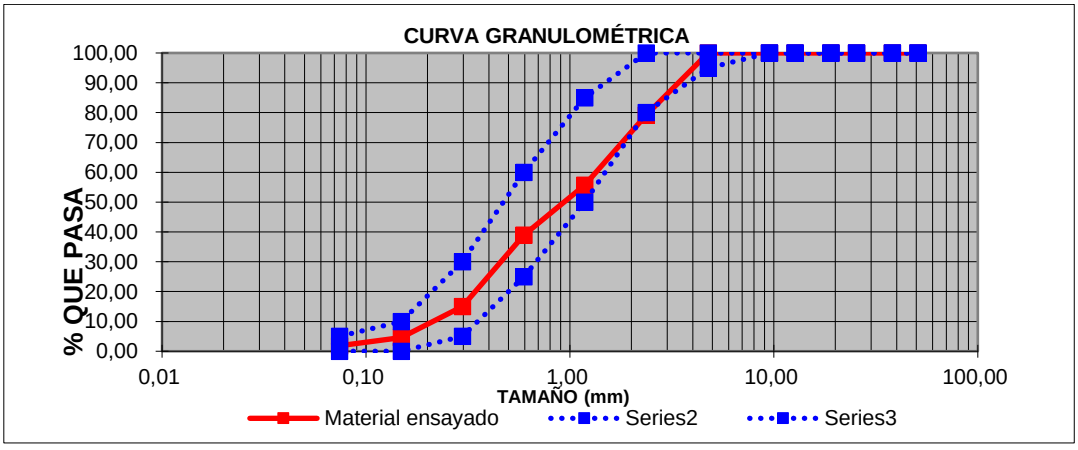
A partir de los resultados obtenidos, se elaboró la curva granulométrica del agregado fino. Estos parámetros fueron utilizados posteriormente en el diseño de las mezclas de hormigón, ya que permiten conocer la distribución de tamaños del material y su influencia en la dosificación de la mezcla.

Tabla 1 *Resultados del ensayo granulométrico del agregado fino natural*

Malla no.	**Abertura (mm)**	**Masa Retenida Parcial**	**Masa Retenida Acumulada**	**Porcentaje Retenido (%)**	**Porcentaje Que pasa (%)**
2"	50,80	0	0	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0	0	0,00	100,00
1"	25,40	0	0	0,00	100,00
3/4"	19,00	0	0	0,00	100,00
1/2"	12,70	0	0	0,00	100,00
3/8"	9,51	0	0	0,00	100,00
No.4	4,76	0	0	0,02	99,98
No.8	2,36	104	104	20,78	79,22
No.16	1,18	118	222	44,34	55,66
No.30	0,60	84	305	61,08	38,92
No.50	0,30	119	425	84,96	15,04
No.100	0,15	52	477	95,40	4,60
No.200	0,07	14	491	98,16	1,84
Pasa No. 200		9	9		
SUMA		500	500		

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Tabla 2 *Curva granulométrica del agregado fino natural y límites de especificación*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.4.2 Gravedad específica y Absorción

Para el desarrollo del ensayo se empleó una muestra representativa de agregado fino con una masa mayor a 1 kg. Inicialmente, el material fue sumergido en agua durante 24 horas, con el propósito de asegurar la saturación de sus partículas. Una vez cumplido este tiempo, la muestra fue retirada del agua y llevada gradualmente a la condición saturada superficialmente seca (SSS), eliminando el exceso de humedad presente en la superficie del agregado conforme al procedimiento establecido en laboratorio.

Figura 8 *Ensayo con cono para verificar la condición SSS del agregado fino natural*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Una vez alcanzada la condición saturada superficialmente seca, la muestra fue colocada en el picnómetro para realizar las mediciones correspondientes. Este procedimiento se desarrolló conforme a lo establecido en la guía de laboratorio, con el fin de obtener los datos necesarios para calcular la gravedad específica y la absorción del agregado fino.

Figura 9 Picnómetro con muestra de agregado fino natural para ensayo de gravedad específica



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

A partir de los datos obtenidos durante el ensayo, se calcularon la gravedad específica Bulk, la gravedad específica en condición saturada superficialmente seca, la gravedad específica aparente y el porcentaje de absorción del agregado fino natural. Estos valores permiten conocer el comportamiento del material frente al agua y su relación entre masa y volumen.

Los cálculos se realizaron mediante las siguientes expresiones:

Gravedad Específica Bulk (GE):

$$GE = \frac{A}{(B+S-C)} \quad (3)$$

Gravedad Específica Saturada con Superficie seca (Ges):

$$Ges = \frac{S}{(B+S-C)} \quad (4)$$

Gravedad Específica Aparente (Gea):

$$Gea = \frac{A}{(B+A-C)} \quad (5)$$

Porcentaje de Absorción (Ab):

$$Ab = \frac{S-A}{A} x\ 100 \quad (6)$$

Donde:

- A = masa seca de la muestra (g).
- B = masa del matraz lleno de agua (g).
- C = masa del matraz con agua y muestra (g).
- S = masa de la muestra en condición saturada superficialmente seca (SSS) (g).

Los valores obtenidos en este ensayo fueron empleados posteriormente en el diseño de las mezclas de hormigón, debido a que la gravedad específica y la absorción influyen en el cálculo de las cantidades de materiales y en la corrección del agua de mezcla. De esta manera, fue posible considerar la cantidad efectiva de agua disponible durante el proceso de mezclado.

Tabla 3 *Resultados de gravedad específica y absorción del agregado fino natural*

Masa del matraz	Mm =	150,33	gr
Masa del matraz + agua	B =	650,33	gr
Masa conjunto matraz, agua y muestra	C =	951,00	gr
Masa de muestra saturada con superficie seca	S =	500,00	gr
Masa de la muestra seca	A=	479,00	gr
Gravedad específica seca	Ge =	2,40	-
Gravedad específica saturada con superficie seca	Ges =	2,51	-
Gravedad específica aparente	Gea =	2,69	-
Porcentaje de absorción	Ab =	4,4	%

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.4.3 Peso unitario

Inicialmente, se registró la masa del recipiente utilizado durante el ensayo. Luego, se determinó el peso unitario suelto del agregado fino, para lo cual el material fue colocado dentro del recipiente sin aplicar compactación, procurando distribuirlo de manera uniforme. Una vez lleno el molde, se retiró el exceso de agregado de la superficie y se registró la masa total del recipiente con el material.

Figura 10 *Determinación del peso unitario suelto del agregado fino natural*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Posteriormente, se determinó el peso unitario compactado del agregado fino. Para ello, el recipiente fue llenado en tres capas, compactando cada una con una varilla mediante 25 golpes distribuidos de manera circular sobre la superficie del material. Una vez completado el volumen del recipiente, se enrasó la superficie para retirar el exceso de agregado y se registró la masa final del conjunto recipiente-agregado.

Figura 11 *Determinación del peso unitario compactado del agregado fino natural*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

A partir de los valores registrados durante el ensayo, se determinó la masa del agregado contenido en el recipiente y se calcularon el peso unitario suelto y el peso unitario compactado mediante las siguientes expresiones:

Masa del Material Compactado (Mc):

$$Mc = B - P \quad (7)$$

Peso Unitario Compacto (Puc):

$$Puc = \frac{Mc}{V} \quad (8)$$

Masa del Material Suelto (Ms):

$$Ms = A - P \quad (9)$$

Peso Unitario Suelto (Pus):

$$Pus = \frac{Ms}{V} \quad (10)$$

Donde:

- B = masa del recipiente más el material compactado (kg).
- P = masa del recipiente vacío (kg).
- Mc = masa del material compactado (kg).
- V = volumen del recipiente (m^3).
- A = masa del recipiente más el material suelto (kg).
- P = masa del recipiente vacío (kg).
- Pus = peso unitario suelto (kg/m^3).
- Ms = masa del material suelto (kg).

Con los valores obtenidos se calcularon el peso unitario suelto y el peso unitario compactado del agregado fino proporcionando información necesaria para el proceso de dosificación de las mezclas de hormigón utilizadas en la investigación.

Tabla 4 *Resultados del peso unitario suelto y compactado del agregado fino natural*

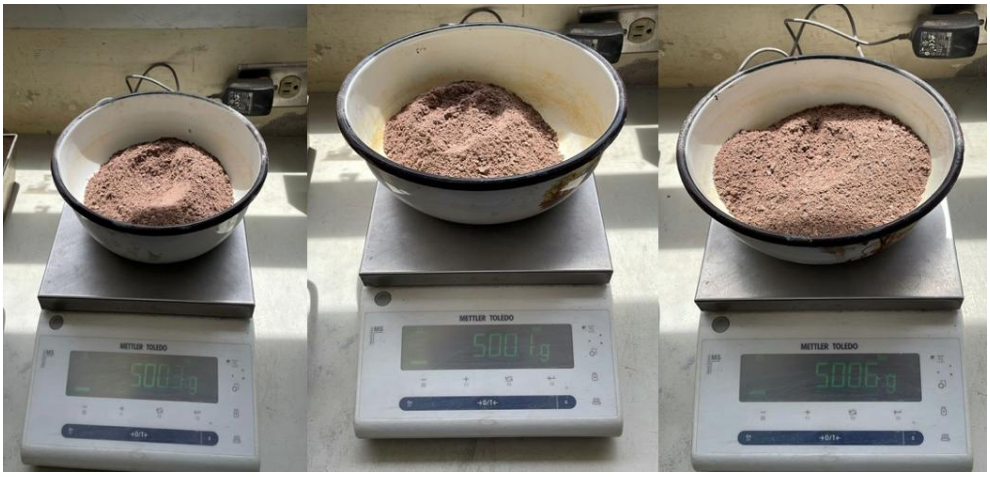
Masa molde	P =	1652,0	gr
Volumen molde	V =	2735,0	cm^3
Masa molde + material suelto	A =	5414,0	gr
Masa molde + material compacto	B =	5810,0	gr
Masa del material suelto	Ms = A – P =	3762,0	gr
Masa del material compacto	Mc = B – P =	4158,0	gr
Peso unitario suelto	Ms / V =	1376	kg / m^3
Peso unitario compacto	Mc / V =	1520	kg / m^3

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.4.4 Contenido de Humedad

Para el desarrollo del ensayo se prepararon tres muestras representativas de agregado fino, cada una con una masa inicial de 500 ± 10 g. El uso de tres determinaciones permitió obtener resultados más confiables y disminuir posibles variaciones propias del material analizado.

Figura 12 *Muestras de agregado fino natural utilizadas en el ensayo de humedad*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Inicialmente, se registró la masa húmeda de cada muestra utilizando una balanza de precisión. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en un horno a temperatura controlada hasta alcanzar una masa constante, con el fin de eliminar la humedad presente en el material.

Figura 13 *Muestras secas de agregado fino natural después del secado en horno*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Una vez finalizado el proceso de secado, las muestras fueron retiradas del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente, se registró nuevamente su masa para determinar la masa seca de cada una. Con estos valores se calculó el contenido de humedad individual de las muestras mediante la siguiente expresión:

Contenido de Humedad (W%):

$$W\% = \frac{M-A}{A}\ x\ 100 \quad (11)$$

Donde

- W% = Contenido de humedad natural (%)
- M = Masa de la muestra original (g)
- A = Masa de la muestra seca (g)

El contenido de humedad presentado en la siguiente tabla fue considerado en la dosificación de las mezclas de hormigón, ya que permitió ajustar la cantidad de agua de mezclado de acuerdo con la humedad presente en el agregado fino.

Tabla 5 *Resultado del contenido de humedad del agregado fino natural*

	FINO ROSADO	
	Muestra Original M (gr)	**Masa de muestra seca A (gr)**
Masa 1	500,3	481,2
Masa 2	500,1	481,4
Masa 3	500,6	481,5
Promedio	500,3	481,4

W %	3,9	%

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.5 Caracterización del Agregado grueso natural

Se realizó la caracterización del agregado grueso natural empleado en la investigación, con el fin de conocer sus propiedades físicas y establecer los parámetros necesarios para el diseño de las mezclas de hormigón. Los resultados obtenidos también permitieron contar con una base de comparación frente al agregado grueso reciclado utilizado en el estudio.

3.5.1 Granulometría

Para conocer la distribución de tamaños de las partículas del agregado grueso natural, se realizó el análisis granulométrico empleando una muestra representativa de 9,9 kg de material. Inicialmente, se registró la masa total de la muestra mediante una balanza de

precisión. Posteriormente, el agregado fue colocado en una serie de tamices normalizados, ordenados de mayor a menor abertura, conformada por los tamices de 1”, 3/4”, 1/2”, 3/8” y No. 4.

Finalizado el proceso de tamizado, se registró la masa retenida en cada tamiz y se calcularon los porcentajes retenidos, retenidos acumulados y pasantes. Estos valores permitieron elaborar la curva granulométrica del agregado grueso natural y determinar su tamaño máximo nominal, información necesaria para el diseño de las mezclas de hormigón.

Los porcentajes retenidos, retenidos acumulados y pasantes fueron calculados mediante las ecuaciones presentadas en el apartado 3.4.1, correspondiente al análisis granulométrico del agregado fino.

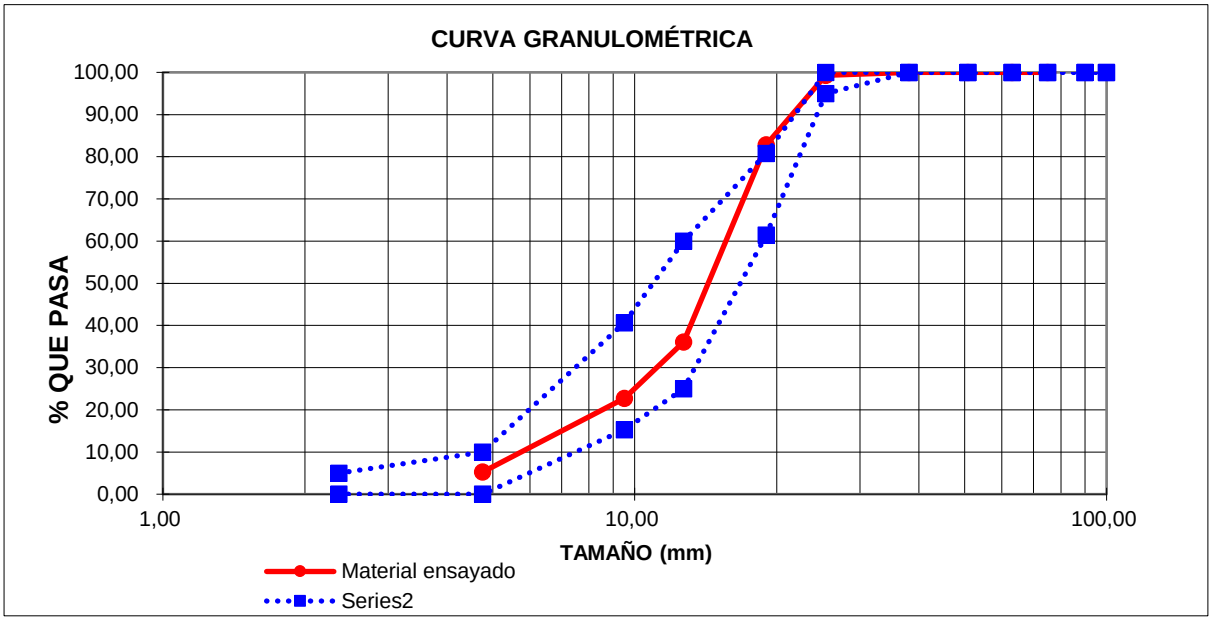
Tabla 6 *Resultados del ensayo granulométrico del agregado grueso natural*

Malla no.	**Abertura (mm)**	**Masa Retenida Parcial**	**Masa Retenida Acumulada**	**Porcentaje Retenido acumulado (%)**	**Porcentaje Que pasa (%)**
4"	100,00	0	0	0,00	100,00
3 1/2"	90,00	0	0	0,00	100,00
3"	75,00	0	0	0,00	100,00
2 1/2"	63,00	0	0	0,00	100,00
2"	50,80	0	0	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0	0	0,00	100,00
1"	25,40	70	70	0,71	99,29
3/4"	19,00	1630	1700	17,17	82,83
1/2"	12,70	4630	6330	63,94	36,06
3/8"	9,51	1320	7650	77,27	22,73
No.4	4,76	1730	9380	94,75	5,25
Pasa n° 4		520	520		
SUMA		9900	9900		

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

A partir de los resultados obtenidos, se elaboró la curva granulométrica del agregado grueso natural y se determinó su tamaño máximo nominal, dato necesario para el diseño de las mezclas de hormigón. Los porcentajes retenidos, retenidos acumulados y pasantes se calcularon utilizando las ecuaciones indicadas en el apartado 3.4.1, correspondiente al análisis granulométrico del agregado fino.

Figura 14 *Curva granulométrica del agregado grueso natural y límites de especificación*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.5.2 Gravedad específica y Absorción

Inicialmente, se tomó una muestra representativa del agregado grueso natural y se procedió a eliminar las partículas finas y el polvo adherido mediante lavado. Luego, el material fue sumergido en agua durante 24 horas, con el propósito de asegurar la saturación de sus partículas.

Cumplido este tiempo, la muestra fue retirada del agua y secada superficialmente hasta alcanzar la condición saturada con superficie seca (SSS). Una vez alcanzado este estado, se registró la masa correspondiente mediante una balanza de precisión.

Posteriormente, la muestra fue colocada en una cesta metálica suspendida con un alambre y sumergida completamente en agua. Este procedimiento permitió registrar la masa aparente sumergida del agregado grueso natural.

Gravedad Específica Bulk (GE):

$$Ge = \frac{A}{B-C} \quad (12)$$

Gravedad Específica Saturada con Superficie seca (Ges):

$$Ges = \frac{B}{B-C} \quad (13)$$

Gravedad Específica Aparente (Gea):

$$Gea = \frac{A}{A-C} \quad (14)$$

Porcentaje de Absorción (Ab):

$$AB = \frac{B-A}{A}\ x\ 100 \quad (15)$$

Donde

- Ge = gravedad específica Bulk.
- Ges = gravedad específica del material saturado con superficie seca.
- Gea = gravedad específica aparente del agregado grueso.
- Ab = porcentaje de absorción del agregado grueso (%).
- A = masa de la muestra seca al horno (g).
- B = masa de la muestra saturada con superficie seca (g).
- C = masa de la muestra sumergida en agua (g).

A partir de los resultados obtenidos, se determinó la gravedad específica y absorción del agregado grueso natural, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 7 *Resultados de gravedad específica y absorción del agregado grueso natural*

Masa de la muestra seca	A =	2275,40	gr
Masa de la muestra saturada con superficie seca	B =	2376,00	gr
Masa aparente de la muestra saturada con superficie seca	C =	1268,00	gr

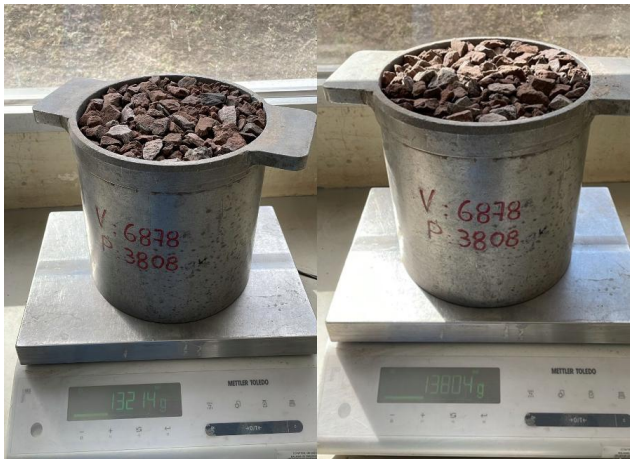
Gravedad específica seca	Ge =	2,05	-
Gravedad específica saturada con superficie seca	Ges =	2,14	-
Gravedad específica aparente	Gea =	2,26	-
Porcentaje de absorción	Ab =	4,4	%

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.5.3 Peso Unitario

La determinación del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso natural se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.4.3, correspondiente al agregado fino. Para ello, se empleó un recipiente de volumen conocido y se registraron las masas del material en condición suelta y compactada. Con estos datos, se calcularon los respectivos pesos unitarios mediante las ecuaciones previamente presentadas.

Figura 15 *Determinación del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso natural*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

A partir de los resultados obtenidos, se determinó el peso unitario suelto y compactado del agregado grueso natural, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8 *Resultados del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso natural*

Masa molde	P =	3808,0	gr
Volumen molde	V =	6878,0	cm^3
Masa molde + material suelto	A =	13214,0	gr
Masa molde + material compacto	B =	13804,0	gr
Masa del material suelto	Ms = A - P =	9406,0	gr
Masa del material compacto	Mc = B - P =	9996,0	gr
Peso unitario suelto	Ms / V =	1368	kg / m^3
Peso unitario compacto	Mc / V =	1453	kg / m^3

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.5.4 Contenido de Humedad

La determinación del contenido de humedad del agregado grueso natural se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.4.4, correspondiente al agregado fino. Para el ensayo, se prepararon tres muestras representativas con una masa aproximada de 500 g cada

una. Inicialmente, las muestras fueron pesadas en estado húmedo y, posteriormente, colocadas en horno hasta alcanzar masa constante.

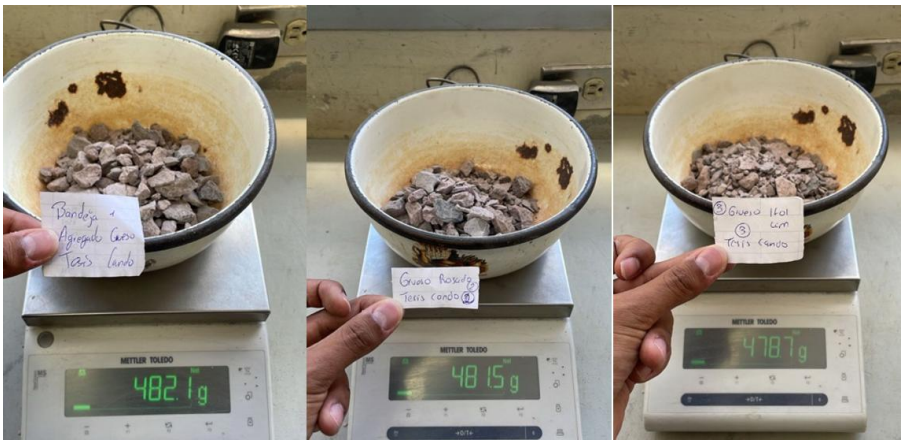
Figura 16 *Muestras de agregado grueso natural utilizadas en el ensayo de humedad*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Una vez concluido el proceso de secado, se registró la masa seca de cada muestra y se calculó el contenido de humedad correspondiente. El valor final reportado se obtuvo a partir del promedio de las tres determinaciones realizadas.

Figura 17 *Muestras secas de agregado grueso natural después del secado en horno*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Tabla 9 *Resultado del contenido de humedad del agregado grueso natural*

	GRUESO ROSADO	
	Muestra Original M (gr)	**Masa de muestra seca A (gr)**
Masa 1	501,1	482,1
Masa 2	500,5	481,5
Masa 3	500,1	478,7
Promedio	500,57	480,77

W %	4,12	%

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.5.5 Abrasión

Con el propósito de evaluar la resistencia al desgaste del agregado grueso natural, se realizó el ensayo de abrasión en la máquina de Los Ángeles, conforme al procedimiento establecido en la norma ASTM C131/C131M. Este ensayo permite determinar la pérdida de material producida por la acción combinada de abrasión e impacto.

Para su desarrollo, se preparó una muestra representativa de agregado grueso con una masa aproximada de 5006,9 g, utilizando la gradación tipo B correspondiente a este procedimiento. Una vez clasificado el material, la muestra fue colocada dentro del tambor de la máquina junto con las 11 esferas de acero requeridas para dicha gradación.

Figura 18 *Muestra de agregado grueso natural para ensayo de abrasión*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Posteriormente, el tambor de la máquina de Los Ángeles fue puesto en funcionamiento hasta completar el número de revoluciones establecido para el ensayo. Durante este proceso,

las partículas del agregado grueso natural estuvieron sometidas a la acción combinada de impacto y fricción, debido al contacto entre el material, las paredes del tambor y las esferas de acero.

Finalizado el ensayo, el material fue retirado de la máquina y tamizado mediante el tamiz No. 12. La fracción retenida fue recuperada y pesada, con el fin de determinar la pérdida de material generada durante el proceso de abrasión. A partir de estos datos se calculó el porcentaje de desgaste del agregado grueso natural.

Figura 19 *Muestra de agregado grueso natural posterior al ensayo de abrasión*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

A partir de las masas registradas al inicio y al final del ensayo, se determinó la pérdida de material producida durante el proceso de abrasión. Con estos valores, se calculó el porcentaje de desgaste del agregado grueso natural mediante las siguientes ecuaciones:

$$C = A - B \qquad (16)$$

$$\%\ de\ desgaste = \frac{C}{A}\ x\ 100 \qquad (17)$$

Donde:

- C = Material que pasa el tamiz No. 12 (g.)
- A = Masa inicial de la muestra (g.)
- B = Masa sostenida en el tamiz No. 12 (g.)

Una vez completado el procedimiento descrito, se obtuvieron los datos necesarios para calcular el porcentaje de desgaste del agregado grueso natural. Los resultados correspondientes al ensayo de abrasión Los Ángeles se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 10 *Resultados del ensayo de abrasión del agregado grueso natural*

Masa inicial de la muestra	A =	5006,9	gr.
Masa retenida en el tamiz Nº 12 después de 500 revoluciones	B =	3765,8	gr
Masa que pasa el tamiz Nº 12	C =	1241,1	gr
Porcentaje de desgaste	D =	25	%

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.6 Caracterización de agregado grueso reciclado

El agregado grueso reciclado empleado en esta investigación fue obtenido del Centro Piloto de Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición, ubicado en el sector de Pifo. Este forma parte de una iniciativa desarrollada por Holcim Ecuador y el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, orientada a la clasificación, reciclaje y aprovechamiento de los RCD.

Con el fin de determinar las propiedades físicas del material y evaluar su posible utilización en mezclas de hormigón, se realizaron los mismos ensayos de caracterización aplicados al agregado grueso natural. Estos ensayos comprendieron el análisis granulométrico, gravedad específica y absorción, peso unitario, contenido de humedad y resistencia al desgaste mediante la máquina de Los Ángeles.

Los procedimientos empleados para cada ensayo fueron los descritos en el apartado 3.5 correspondiente a la caracterización del agregado grueso natural. La diferencia radica

exclusivamente en el origen y naturaleza del material analizado, ya que el agregado reciclado proviene del procesamiento de residuos de construcción y demolición.

3.6.1 Granulometría

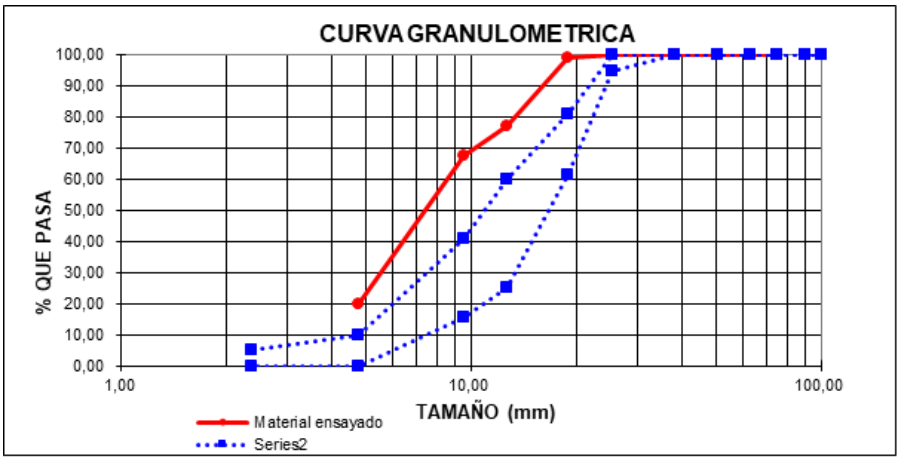
El análisis granulométrico del agregado grueso reciclado se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.5.1. Los resultados obtenidos permitieron determinar la distribución de tamaños de las partículas presentes en el material reciclado.

Tabla 11 *Resultados del ensayo granulométrico del agregado grueso reciclado*

Malla no.	Abertura (mm)	Masa Retenida Parcial	Masa Retenida Acumulada	Porcentaje Retenido acumulado (%)	Porcentaje Que pasa (%)
4"	100,00	0	0	0,00	100,00
3 1/2"	90,00	0	0	0,00	100,00
3"	75,00	0	0	0,00	100,00
2 1/2"	63,00	0	0	0,00	100,00
2"	50,80	0	0	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0	0	0,00	100,00
1"	25,40	0	0	0,00	100,00
3/4"	19,00	100	100	1,02	98,98
1/2"	12,70	2130	2230	22,73	77,27
3/8"	9,51	970	3200	32,62	67,38
No.4	4,76	4670	7870	80,22	19,78
Pasa N° 4		1940	1940		
SUMA		9810	9810		

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Figura 20 *Curva granulométrica del agregado grueso reciclado y límites de especificación*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.6.2 Gravedad específica y Absorción

La determinación de la gravedad específica y absorción del agregado grueso reciclado se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.5.2. Los resultados obtenidos permitieron evaluar las propiedades físicas del material reciclado y, posteriormente, compararlas con las del agregado grueso natural.

Tabla 12 *Resultados de gravedad específica y absorción del agregado grueso reciclado*

Masa de la muestra seca	A =	2114,00	gr
Masa de la muestra saturada con superficie seca	B =	2263,00	gr
Masa aparente de la muestra saturada con superficie seca	C =	1305,00	gr
Gravedad específica seca	Ge =	2,21	-
Gravedad específica saturada con superficie seca	Ges =	2,36	-
Gravedad específica aparente	Gea =	2,61	-
Porcentaje de absorción	Ab =	7,0	%

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.6.3 Peso unitario

La determinación del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso reciclado se realizó siguiendo el procedimiento descrito previamente para los agregados naturales. Para

ello, se utilizó un recipiente de volumen conocido y se registraron las masas del material en condición suelta y compactada.

Una vez obtenidos los datos experimentales, se calcularon los respectivos pesos unitarios mediante las ecuaciones presentadas en el apartado 3.4.3. Los resultados permitieron caracterizar el comportamiento del agregado reciclado según su grado de compactación.

Tabla 13 *Resultados del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso reciclado*

Masa molde	P =	3808,0	gr
Volumen molde	V =	6878,0	cm^3
Masa molde + material suelto	A =	12297,0	gr
Masa molde + material compacto	B =	13087,0	gr
Masa del material suelto	Ms = A – P =	8489,0	gr
Masa del material compacto	Mc = B - P =	9279,0	gr
Peso unitario suelto	Ms / V =	1234	kg / m^3
Peso unitario compacto	Mc / V =	1349	kg / m^3

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.6.4 Contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad del agregado grueso reciclado se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.5.4. Para el ensayo, se prepararon tres

muestras representativas de 200 ± 10 g cada una, las cuales fueron pesadas en estado natural y posteriormente sometidas a secado en horno hasta alcanzar una masa constante.

Figura 21 *Muestras de agregado grueso reciclado para ensayo de humedad*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Una vez finalizado el proceso de secado, se registró la masa seca de cada muestra y se calculó el contenido de humedad correspondiente. El valor reportado para el agregado grueso reciclado corresponde al promedio de los resultados obtenidos en las tres determinaciones realizadas.

Tabla 14 *Resultados del contenido de humedad del agregado grueso reciclado*

	GRUESO RECICLADO	
	Muestra Original M (gr)	**Masa de muestra seca A (gr)**
Masa 1	200,9	193,2
Masa 2	200,3	193,6
Masa 3	200,1	195,9
Promedio	200,4	194,23

W %	3,2	%

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.6.5 Abrasión

La resistencia al desgaste del agregado grueso reciclado fue evaluada mediante el ensayo de abrasión en la máquina de Los Ángeles, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.5.5 y de acuerdo con la norma ASTM C131/C131M. Para su desarrollo, se empleó

una muestra representativa del material, utilizando la gradación tipo B y las esferas de acero correspondientes a esta condición.

Una vez completadas las 500 revoluciones de la máquina, el material fue retirado y tamizado a través del tamiz No. 12. Posteriormente, se registraron las masas necesarias para determinar la cantidad de material desgastado y calcular el porcentaje de abrasión.

Este ensayo resulta importante en el agregado grueso reciclado, debido a que permite evaluar su comportamiento frente a procesos de impacto y fricción.

Tabla 15 *Resultados del ensayo de abrasión del agregado grueso reciclado*

Masa inicial de la muestra	A =	5000	gr.
Masa retenida en el tamiz Nº 12 después de 500 revoluciones	B =	3267	gr
Masa que pasa el tamiz Nº 12	C =	1733	gr
Porcentaje de desgaste	D =	35	%

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.7 Dosificación de hormigón convencional

Para la dosificación de las mezclas de hormigón convencional empleamos el método ACI 211.1 modificado, el cual permite establecer las proporciones de los materiales necesarios para obtener una resistencia a la compresión de 280 kg/cm². Este procedimiento es aplicable a hormigones convencionales con resistencias no mayores a 42 MPa y se desarrolla mediante una serie de pasos que permiten definir las cantidades de cemento, agua, agregado fino y agregado grueso requeridas para la mezcla.

El método consta de los siguientes pasos:

i. **Selección del asentamiento:** Para el diseño de la mezcla se seleccionó el asentamiento de acuerdo con el tipo de elemento y las condiciones de colocación del hormigón. Cuando el proyecto no establece un valor específico, el método ACI 211.1 proporciona rangos recomendados de asentamiento según el tipo de construcción, los cuales sirven como guía para definir la trabajabilidad requerida de la mezcla

Tabla 16 *Asentamiento - Recomendaciones ACI*

TIPOS DE CONSTRUCCIÓN	MÁXIMO ASENTAMIENTO (MM)	MÍNIMO ASENTAMIENTO (MM)
Muros de fundación reforzados y zapatas	75	25
Zapatas aisladas, cajones y muros de subestructura	75	25
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas de edificios	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Concreto masivo	75	25

Fuente. Adaptado de ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, por ACI Committee 211, 2009, American Concrete Institute.

ii. **Selección del tamaño máximo nominal del agregado:** El tamaño máximo nominal del agregado debe elegirse de acuerdo con las dimensiones del elemento a fundir y la separación entre varillas de refuerzo. Este no debe exceder la quinta parte de la menor dimensión del elemento, la tercera parte del espesor de las losas ni las tres cuartas partes del menor espaciamiento libre entre el acero de refuerzo.

iii. **Estimación del agua de mezcla:** La cantidad de agua requerida para la mezcla se selecciona en función del asentamiento definido y del tamaño máximo nominal del agregado. Los valores recomendados por el método ACI 211.1 se basan en mezclas elaboradas con agregados bien gradados y partículas de forma angular dentro de los límites aceptados. Sin embargo, estos valores pueden variar según las características reales del material utilizado. Por esta razón, el contenido de agua estimado debe

considerarse como un valor inicial, el cual puede corregirse posteriormente mediante mezclas de prueba y de acuerdo con el porcentaje de absorción de los agregados.

Tabla 17 *Estimación del agua de mezcla y contenido de aire – Recomendaciones ACI*

AGUA DE MEZCLA, HORMIGÓN SIN AIRE INCLUIDO								
Tamaño máximo nominal del agregado / Asentamiento	3/8 plg	1/2 plg	3/4 plg	1 plg	1 1/2 plg	2 plg	3 plg	6 plg
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Aire naturalmente atrapado	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
AGUA DE MEZCLA, HORMIGÓN CON AIRE INCLUIDO								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
CONTENIDO DE AIRE (HORMIGÓN CON AIRE INCLUIDO)								
Exposición media	4,50	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	1,50	1,00
Exposición moderada	6,00	5,50	5,00	4,50	4,50	4,00	3,50	3,00
Exposición extrema	7,50	7,00	6,00	6,00	5,50	5,00	4,50	4,00

Fuente. Adaptado de ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, por ACI Committee 211, 2009, American Concrete Institute.

iv. **Selección de la relación agua/cemento:** La relación agua/cemento se define en función de la resistencia a la compresión requerida para el hormigón. El método ACI 211.1 proporciona valores de referencia que permiten seleccionar esta relación de acuerdo con la resistencia de diseño. Sin embargo, cuando se requiere mayor precisión, es recomendable establecer una relación propia entre la resistencia a la compresión y la relación agua/cemento para los materiales utilizados.

Tabla 18 *Relación agua/cemento en función de la resistencia a compresión y condiciones severas de exposición*

RELACIONES AGUA/CEMENTO			**RELACIONES AGUA/CEMENTO MÁXIMAS PARA HORMIGONES SUJETOS A CONDICIONES SEVERAS**		
ESFUERZO A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (MPA)	RELACIÓN A/C HORMIGÓN SIN AIRE INCLUIDO	RELACIÓN A/C HORMIGÓN CON AIRE INCLUIDO	TIPOS DE ESTRUCTURAS	ESTRUCTURAS EXPUESTAS CONTINUAMENTE A HUMEDAD O ESTRUCTURAS SOMETIDAS A CONGELAMIENTO Y DESHIELO	ESTRUCTURAS EXPUESTAS A AGUA DE MAR OSULFATOS
40,00	0,42	……..	SECCIONES DELGADAS Y SECCIONES CON MENOS DE 25MM DE RECUBRIMIENTO PARA EL ACERO	0.45	0.40
35,00	0,47	0,39	OTRAS ESTRUCTURAS	0.50	0.45
30,00	0,54	0,45			
25,00	0,61	0,52			
20,00	0,69	0,60			
15,00	0,79	0,70			

Fuente. Adaptado de ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, por ACI Committee 211, 2009, American Concrete Institute.

v. **Determinación de las cantidades de agregado fino y agregado grueso:** Una vez definidos el contenido de cemento y la cantidad de agua de mezcla, se determina la masa total de agregados en condición saturada superficialmente seca. Para ello, se parte del peso unitario teórico del hormigón fresco y se descuenta la cantidad correspondiente al cemento y al agua neta de la mezcla.

   La distribución entre agregado fino y agregado grueso se establece de acuerdo con las características granulométricas de los materiales. Para ello, se puede considerar el módulo de finura y la proporción requerida de cada fracción dentro de la mezcla. En la

práctica, esta relación debe verificarse observando que la mezcla presente suficiente pasta, buena cohesión y ausencia de segregación o escurrimiento.

La cantidad total de agregados en condición saturada superficialmente seca se determina mediante la siguiente expresión:

$$\text{Agregados (SSS)} = \text{Um} - \text{Cm} - \text{Wm} \quad (18)$$

Donde:

- Um = peso unitario del hormigón fresco (kg/m³.)
- Cm = cantidad de cemento (kg/m³.)
- Wm = cantidad de agua neta (kg/m³.)

Posteriormente, la cantidad de agregado fino y agregado grueso se obtiene aplicando los porcentajes establecidos para cada fracción:

$$\text{Agregado fino (SSS)} = X \times \text{Agregados (SSS)} \quad (19)$$

$$\text{Agregado grueso (SSS)} = Y \times \text{Agregados (SSS)} \quad (20)$$

Donde:

- X = porcentaje de agregado fino en la mezcla.
- Y = porcentaje de agregado grueso en la mezcla.

Finalmente, las cantidades de agregados deben corregirse considerando su humedad natural y absorción, debido a que estas propiedades modifican el agua efectiva disponible en la mezcla.

Las correcciones pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\text{Agregado natural} = \text{Agregado seco} \times (1 + \%HN / 100) \quad (21)$$

$$\text{Agregado seco} = \text{Agregado SSS} / (1 + \%\text{Abs} / 100) \quad (22)$$

$$\text{Agua de mezcla corregida} = \text{Agua neta} + \text{Afino(seco)}(\%\text{Abs} - \%\text{HN})/100 + \text{Agrueso(seco)}(\%\text{Abs} - \%\text{HN})/100 \quad (23)$$

Donde:

- HN = humedad natural del agregado.
- Abs = absorción del agregado.
- Afino(seco) = agregado fino en condición seca.
- Agrueso(seco) = agregado grueso en condición seca.

3.7.1 Dosificación del Hormigón convencional f'c = 280 kg/cm².

Para la dosificación del hormigón convencional se empleó el método ACI 211.1 modificado, considerando una resistencia especificada de 280 kg/cm². La mezcla fue diseñada con una relación agua/cemento de 0,50 y un asentamiento de diseño dentro del rango.

En el diseño inicial se consideró un tamaño máximo nominal del agregado de ¾''. A partir de estos parámetros, se estimó la cantidad de agua de mezcla, el contenido de cemento y la proporción de agregados fino y grueso necesarios para obtener un hormigón con adecuada trabajabilidad y resistencia a compresión.

La dosificación utilizada para la elaboración de los cilindros se estableció en kilogramos. Para su cálculo se consideraron las propiedades físicas de los agregados, tales como gravedad específica, peso unitario, humedad natural y absorción. Estos datos permitieron corregir las cantidades de agua y agregados, con el propósito de mantener la relación agua/cemento establecido en el diseño y obtener una mezcla con condiciones adecuadas de trabajabilidad.

De acuerdo con la dosificación obtenida, se establecieron las siguientes cantidades en kilogramos:

Tabla 19 *Dosificación 280 kg/cm²*

DOSIFICACIÓN f'c = 280 kg/cm²	Cantidades	Unidades
Relación a/c	0,5	-
Agua neta	5,64	kg
Agua de mezcla	5,65	kg

Cemento	11,27	kg
Agregado fino	21,64	kg
Agregado grueso	21,16	kg

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.7.2 Dosificación del Hormigón con Agregado grueso reciclado

Para la dosificación del hormigón con agregado grueso reciclado se tomó como base la mezcla convencional diseñada para una resistencia de 280 kg/cm². A partir de esta dosificación, se realizó el reemplazo parcial del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado en porcentajes del 3 % y 5 %, manteniendo constantes las cantidades de cemento, agua y agregado fino.

La cantidad de agregado grueso natural considerada en la dosificación convencional fue de 21,16 kg. Con base en este valor, se calculó la masa correspondiente a cada porcentaje de reemplazo. Para la mezcla con 3 % de agregado reciclado, se sustituyeron 0,63 kg del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado. En cambio, para la mezcla con 5 % de reemplazo, se sustituyeron 1,06 kg del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado.

De esta manera, las mezclas con agregado reciclado fueron elaboradas conservando la misma dosificación base del hormigón convencional, modificando únicamente la proporción del agregado grueso. Este procedimiento permite comparar el comportamiento del hormigón patrón con las mezclas recicladas y evaluar si la incorporación de bajos porcentajes de agregado grueso reciclado influye en la resistencia a la compresión.

Las cantidades correspondientes a cada porcentaje de sustitución se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 20 *Dosificación 280 kg/cm² con reemplazo parcial al 3%*

DOSIFICACIÓN f'c = 280 kg/cm²	Cantidades	Unidades
Relación a/c	0,5	-
Agua neta	5,64	kg
Agua de mezcla	5,65	kg
Cemento	11,27	kg
Agregado fino	21,64	kg

Agregado grueso	20,53	kg
Agregado grueso reciclado	0,63	kg

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Tabla 21 *Dosificación 280 kg/cm² con reemplazo parcial al 5%*

DOSIFICACIÓN f'c = 280 kg/cm²	Cantidades	Unidades
Relación a/c	0,5	-
Agua neta	5,64	kg
Agua de mezcla	5,65	kg
Cemento	11,27	kg
Agregado fino	21,64	kg
Agregado grueso	20,1	kg
Agregado grueso reciclado	1,06	kg

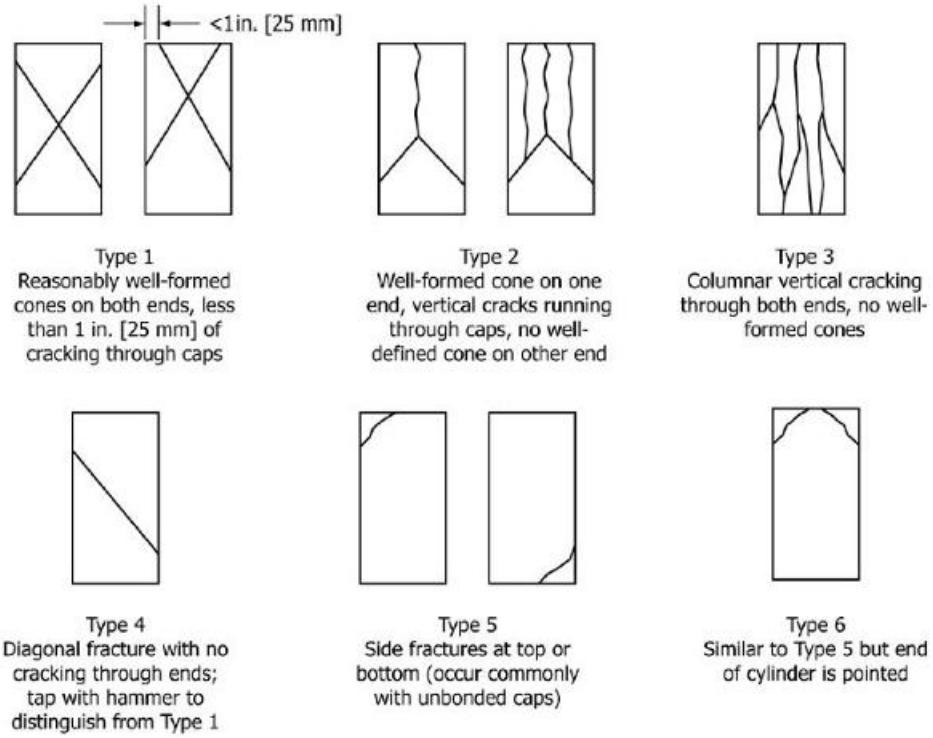
Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

3.7.3 Compresión del Hormigón

La resistencia a la compresión es una de las propiedades mecánicas más importantes del hormigón, debido a que permite evaluar su capacidad para soportar cargas axiales. Esta propiedad es fundamental en el diseño y control de calidad del material, ya que gran parte de los elementos estructurales de hormigón trabajan principalmente bajo esfuerzos de compresión (INEN, 2010).

El ensayo consiste en aplicar una carga axial sobre un espécimen cilíndrico de dimensiones normalizadas, generalmente de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, hasta producir su falla. Durante el procedimiento, la carga se incrementa de forma controlada dentro del rango establecido por la norma, con el fin de registrar la carga máxima soportada por la muestra. Finalmente, la resistencia a la compresión se obtiene dividiendo dicha carga máxima para el área de la sección transversal del cilindro (INEN, 2010).

Figura 22 *Tipos de falla en cilindros de hormigón sometidos a compresión*



Fuente. Tomado de ASTM C39/C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, por ASTM International, 2021.

3.7.4 Determinación del módulo de elasticidad del hormigón

La determinación del módulo de elasticidad del hormigón se realizó con el propósito de evaluar la rigidez del material endurecido frente a la aplicación de cargas de compresión. Este parámetro permite relacionar el esfuerzo aplicado con la deformación longitudinal producida en el espécimen, por lo que constituye una propiedad mecánica importante para analizar el comportamiento del hormigón convencional y del hormigón con reemplazo parcial de agregado grueso reciclado (ASTM International, 2022).

Para el desarrollo del ensayo se emplearon probetas cilíndricas de hormigón correspondientes a la mezcla patrón y a las mezclas con reemplazo parcial del 3 % y 5 % de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado. El procedimiento se realizó tomando como referencia la norma ASTM C469/C469M, la cual establece la metodología para determinar el módulo de elasticidad estático del hormigón en compresión.

Durante el ensayo, las probetas fueron sometidas a carga axial de compresión, registrando simultáneamente los valores de esfuerzo y deformación longitudinal. A partir de estos datos, se identificó el esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria de 0,000050 y el esfuerzo asociado al 40 % de la resistencia máxima a compresión del espécimen. Estos valores permitieron calcular el módulo de elasticidad mediante la relación entre el incremento de esfuerzo y el incremento de deformación.

El módulo de elasticidad experimental se determinó mediante la siguiente expresión:

$$E = \frac{S_1 - S_2}{E_2 - 0.000050} \quad (24)$$

Donde:

- E = Módulo de elasticidad del hormigón, en MPa
- S1 = Esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria de 0.000050
- S2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la resistencia máxima a compresión
- E2 = Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo S2

En el procesamiento de los datos se utilizó una hoja de cálculo, en la cual se registraron las dimensiones de cada cilindro, la carga máxima alcanzada, la resistencia a la compresión, las deformaciones unitarias y los esfuerzos correspondientes. Con esta información se obtuvo el módulo de elasticidad individual de cada probeta y, posteriormente, el valor promedio para cada tipo de mezcla.

Adicionalmente, los valores experimentales fueron comparados con un módulo de elasticidad de referencia calculado mediante la expresión normativa empleada para hormigones de peso normal:

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'c} \quad (25)$$

Donde:

- Ec = Módulo de elasticidad estimado, en MPa
- f'c = Resistencia a la compresión del hormigón, en MPa

Esta comparación permitió analizar si la incorporación del agregado grueso reciclado produjo variaciones en la rigidez del hormigón respecto a la mezcla patrón y al valor estimado mediante la ecuación normativa. Los resultados obtenidos se presentan y discuten en el capítulo correspondiente al análisis de resultados.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Ensayos del hormigón

4.1.1 Determinación de la Resistencia a la Compresión

La Tabla 22 presenta los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión para la muestra patrón y las mezclas elaboradas con reemplazos parciales del 3 % y 5 % de agregado grueso reciclado. Los valores se expresan tanto en MPa como en kg/cm², permitiendo una comparación directa entre las diferentes dosificaciones evaluadas.

Adicionalmente, se incluye el porcentaje de pérdida de resistencia con respecto a la muestra patrón, con el fin de cuantificar la influencia que tiene la incorporación de agregado reciclado en el comportamiento mecánico del hormigón. Estos resultados constituyen la base para el análisis posterior, ya que permiten identificar las variaciones de resistencia producidas por los porcentajes de reemplazo estudiados y evaluar la viabilidad técnica del uso de agregados reciclados en la elaboración de mezclas de hormigón.

Tabla 22 *Pérdida de resistencia del hormigón con incorporación de material reciclado*

Descripción	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (kg/cm2)	Porcentaje de perdida de resistencia
Muestra patrón	28,65	292	0 %
3% de material reciclado	21,90	223	23,63%
5% de material reciclado	25,05	256	12,33%

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

4.1.2 Determinación del Módulo de Elasticidad

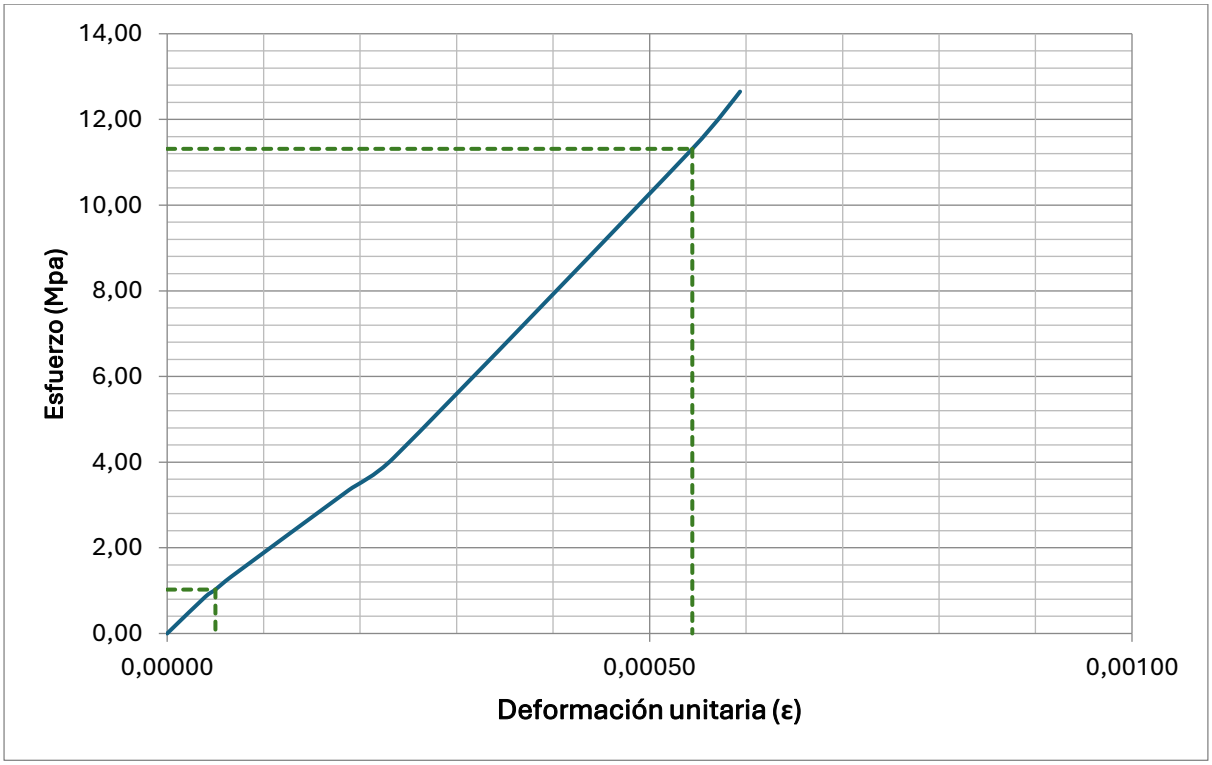
Módulo de Elasticidad

f'c Esperado:	280 kg/cm2	Muestra:	1 - P
Relación A/C:	0,5	% Agregado Grueso Reciclado:	0%
Fecha:	24-04-2026	Edad:	28 días

Tabla 23 *Módulo de elasticidad 1-P*

DEF. mm	Carga N	DEF. mm	def unitaria mm/mm	Esf máx Mpa
0,000	0	0,000	0,00000	0,0
0,016	15860	0,016	0,00004	0,9
0,020	18769	0,020	0,00005	1,0
0,027	24640	0,027	0,00007	1,3
0,076	61783	0,076	0,00019	3,3
0,095	75900	0,095	0,00024	4,1
0,220	209100	0,220	0,00054	11,3
0,240	233800	0,240	0,00059	12,7

Figura 23 *Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra 1-P*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

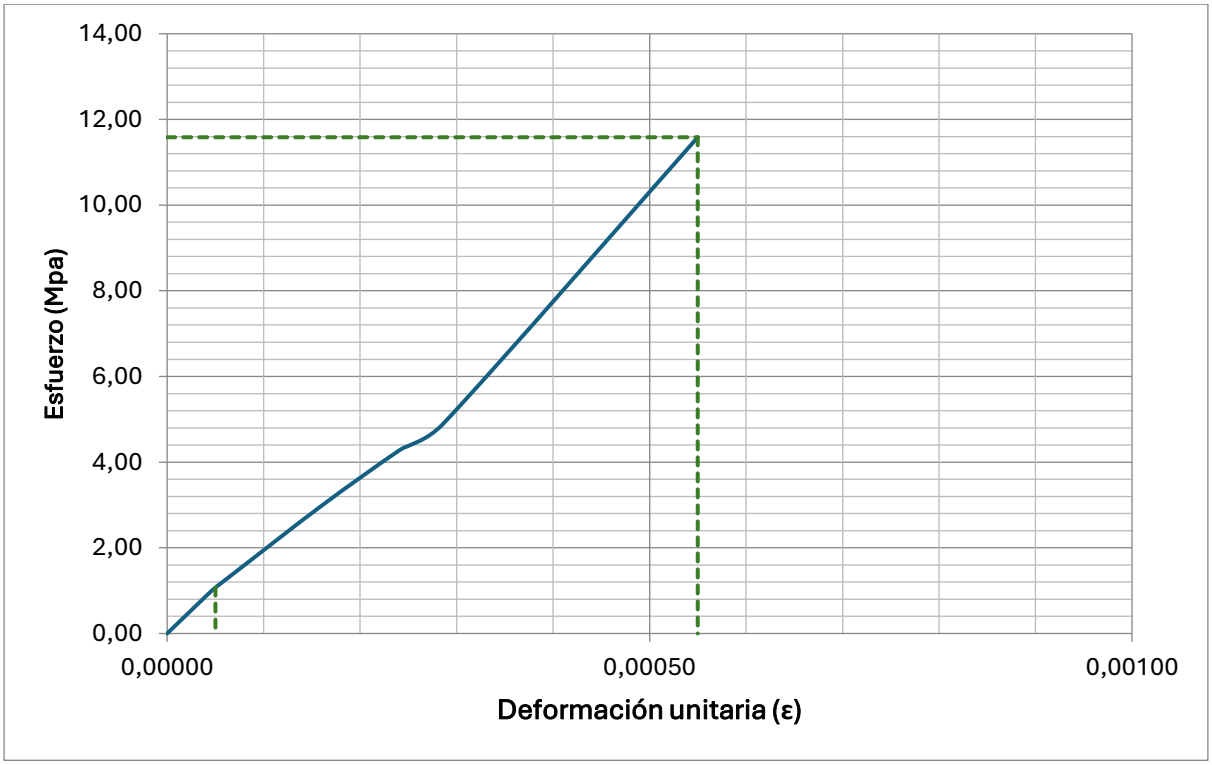
Módulo de Elasticidad

f'c Esperado:	280 kg/cm2	Muestra:	2 - P
Relación A/C:	0,5	% Agregado Grueso Reciclado:	0%
Fecha:	24-04-2026	Edad:	28 días

Tabla 24 *Módulo de elasticidad 2-P*

DEF. mm	Carga N	DEF. mm	def unitaria mm/mm	Esf máx Mpa
0,000	0	0,000	0,00000	0,0
0,016	15674	0,016	0,00004	0,9
0,020	19430	0,020	0,00005	1,1
0,027	24943	0,027	0,00007	1,4
0,065	54756	0,065	0,00016	3,0
0,098	78689	0,098	0,00024	4,3
0,116	89736	0,116	0,00029	4,9
0,223	212416	0,223	0,00055	11,6

Figura 24 *Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra 2-P*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

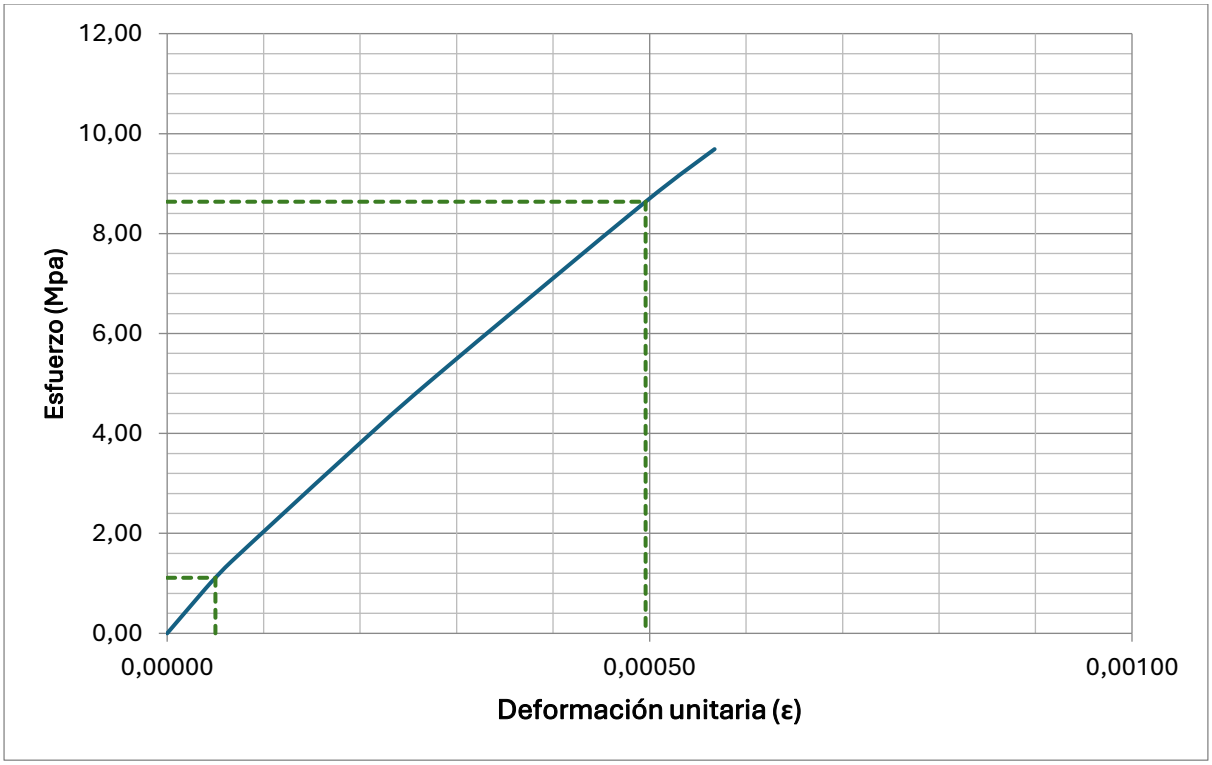
Módulo de Elasticidad

f'c Esperado:	280 kg/cm2	Muestra:	C1
Relación A/C:	0,5	% Agregado Grueso Reciclado:	3%
Fecha:	22-05-2026	Edad:	28 días

Tabla 25 *Módulo de elasticidad C1*

DEF. mm	Carga N	DEF. mm	def unitaria mm/mm	Esf máx Mpa
0,000	0	0,000	0,00000	0,0
0,016	16390	0,016	0,00004	0,9
0,020	20255	0,020	0,00005	1,1
0,027	26499	0,027	0,00007	1,4
0,074	64510	0,074	0,00018	3,5
0,111	93418	0,111	0,00027	5,1
0,201	159209	0,201	0,00050	8,6
0,230	178602	0,230	0,00057	9,7

Figura 25 *Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra C1*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

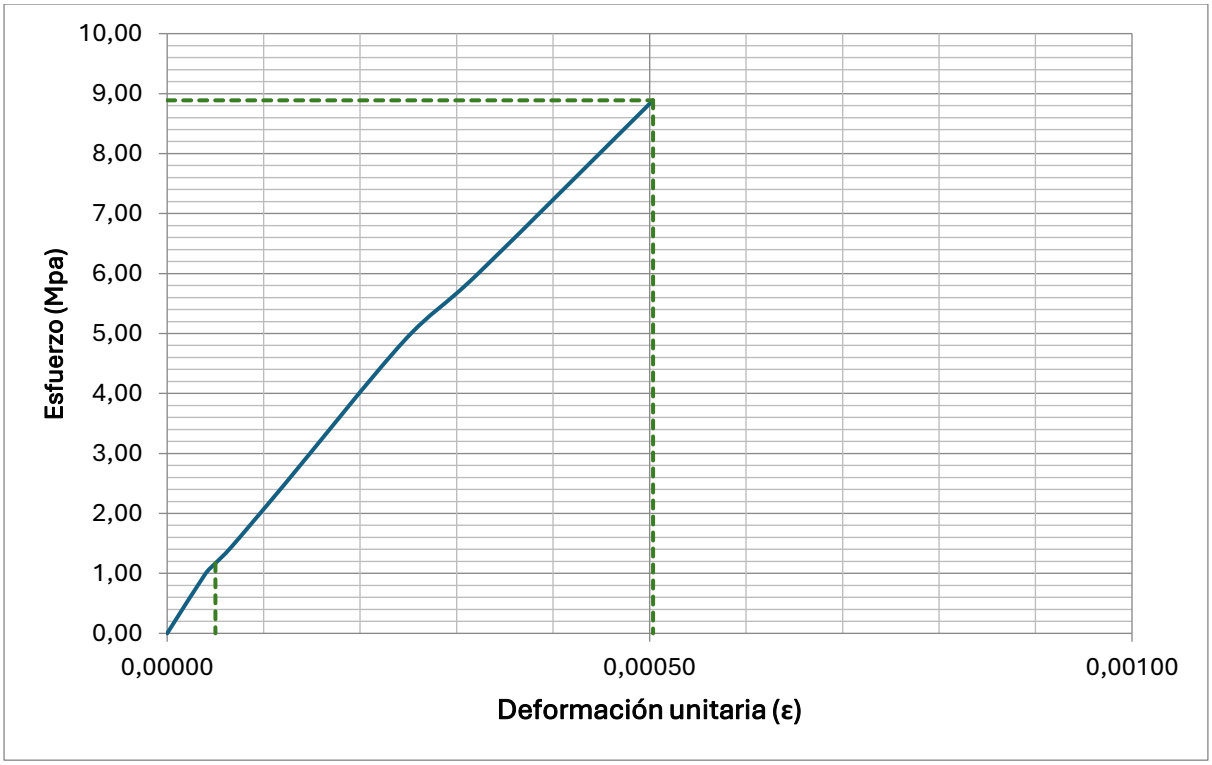
Módulo de Elasticidad

f'c Esperado:	280 kg/cm2	Muestra:	C2
Relación A/C:	0,5	% Agregado Grueso Reciclado:	3%
Fecha:	22-05-2026	Edad:	28 días

Tabla 26 *Módulo de elasticidad C2*

DEF. mm	Carga N	DEF. mm	def unitaria mm/mm	Esf máx Mpa
0,000	0	0,000	0,00000	0,0
0,016	17796	0,016	0,00004	1,0
0,020	20845	0,020	0,00005	1,2
0,027	25930	0,027	0,00007	1,4
0,050	45260	0,050	0,00012	2,5
0,100	88078	0,100	0,00025	4,9
0,131	108166	0,131	0,00032	6,0
0,205	160425	0,205	0,00050	8,9

Figura 26 *Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra C2*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

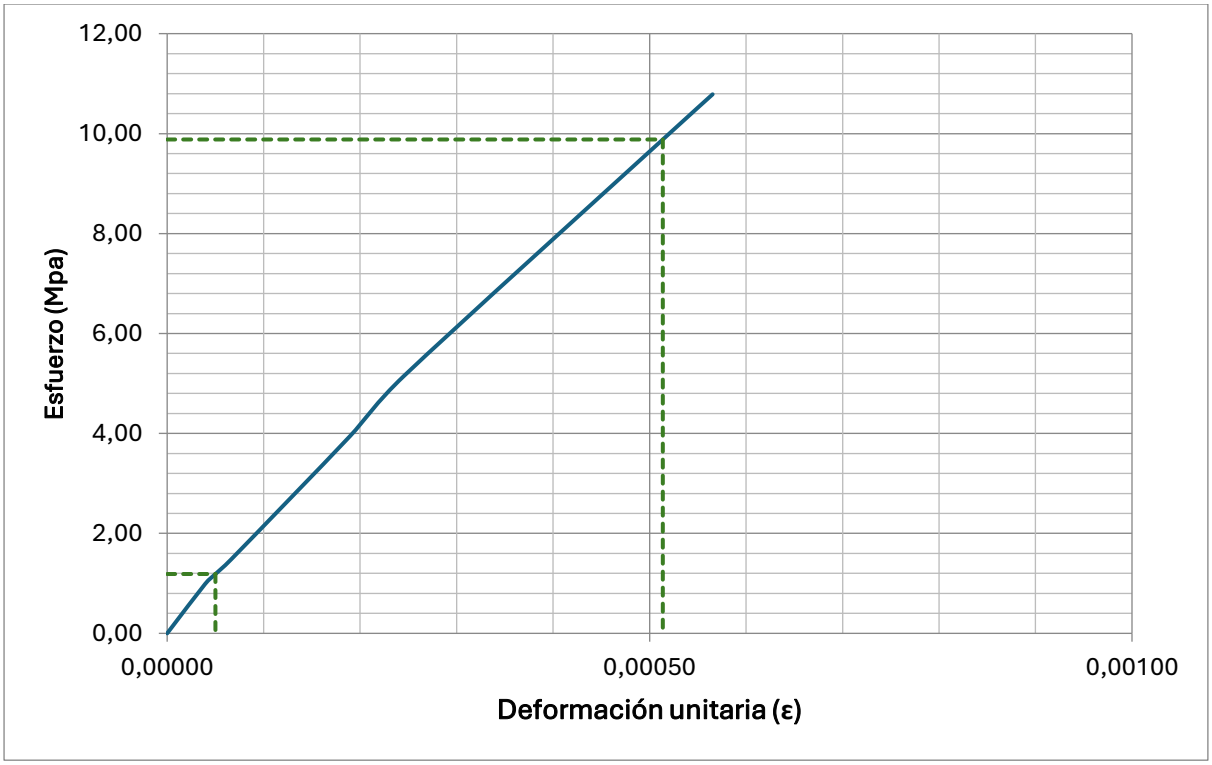
Módulo de Elasticidad

f'c Esperado:	280 kg/cm2	Muestra:	C3
Relación A/C:	0,5	% Agregado Grueso Reciclado:	5%
Fecha:	22-05-2026	Edad:	28 días

Tabla 27 *Módulo de elasticidad C3*

DEF. mm	Carga N	DEF. mm	def unitaria mm/mm	Esf máx Mpa
0,000	0	0,000	0,00000	0,0
0,016	18032	0,016	0,00004	1,0
0,020	21390	0,020	0,00005	1,2
0,027	27021	0,027	0,00007	1,5
0,077	71900	0,077	0,00019	3,9
0,100	94078	0,100	0,00025	5,2
0,209	180268	0,209	0,00051	9,9
0,230	196747	0,230	0,00057	10,8

Figura 27 *Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra C3*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

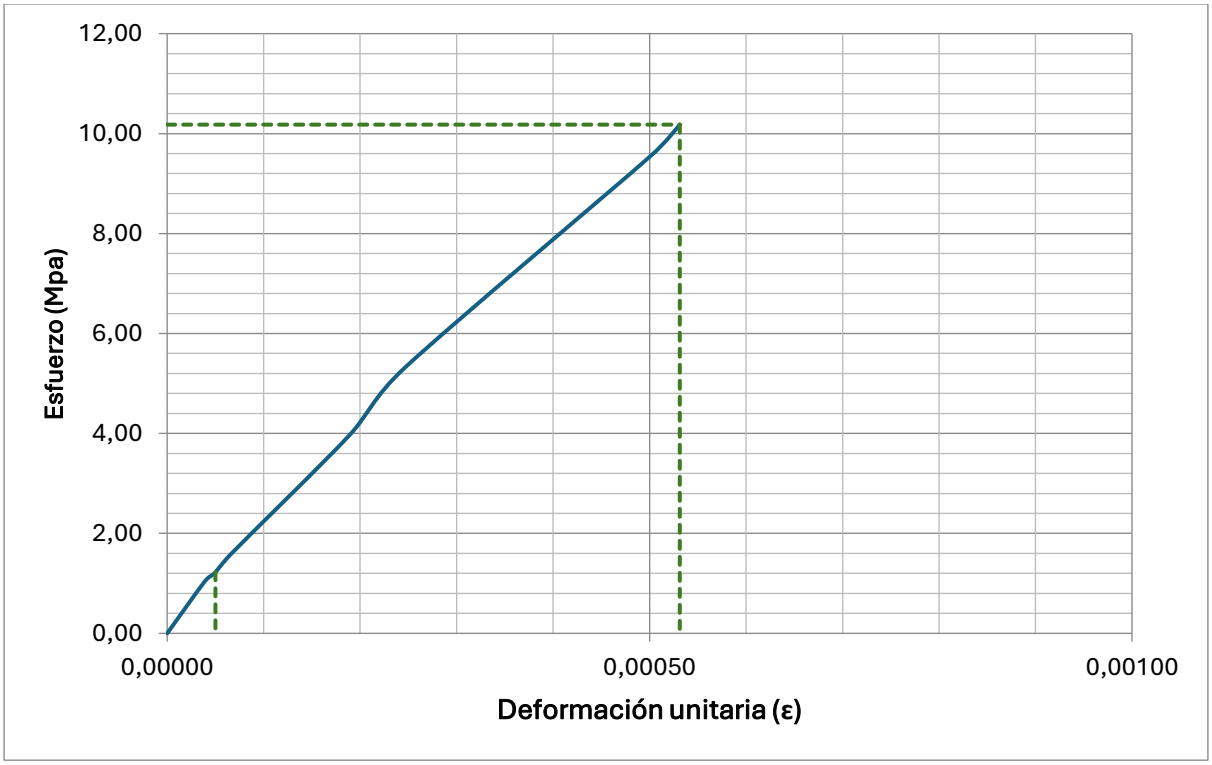
Módulo de Elasticidad

f'c Esperado:	280 kg/cm2	Muestra:	C4
Relación A/C:	0,5	% Agregado Grueso Reciclado:	5%
Fecha:	22-05-2026	Edad:	28 días

Tabla 28 *Módulo de elasticidad C4*

DEF. mm	Carga N	DEF. mm	def unitaria mm/mm	Esf máx Mpa
0,000	0	0,000	0,00000	0,0
0,016	18675	0,016	0,00004	1,0
0,020	21435	0,020	0,00005	1,2
0,027	28366	0,027	0,00007	1,6
0,077	70800	0,077	0,00019	4,0
0,100	94573	0,100	0,00025	5,3
0,204	170364	0,204	0,00050	9,6
0,216	181330	0,216	0,00053	10,2

Figura 28 *Curva esfuerzo–deformación unitaria de la muestra C4*



Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

4.1.3 Determinación de Factores para fórmula de módulo de Elasticidad

Tabla 29 *Determinación de factores para fórmula de módulo de elasticidad*

Determinación de factores para fórmula de módulo de elasticidad						
Descripción	**Módulo de elasticidad promedio (MPa)**	**Módulo de elasticidad promedio (kg/cm2)**	**Resistencia a la compresión (MPa)**	**Resistencia a la compresión (kg/cm2)**	**Factor de fórmula módulo elasticidad (MPa)**	**Factor de fórmula módulo elasticidad (kg/cm2)**
Muestra patrón	20900	213180	28,65	292	3905	12471
3% de material reciclado	16900	172380	21,90	223	3611	11534
5% de material reciclado	18700	190740	25,05	256	3736	11933
Normativa	23729	242036	25,49	257	4700	15100

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Tabla 30 *Ecuación del módulo de elasticidad propuesta*

Ecuación del módulo de elasticidad propuestas			
Muestras	**MPA**	**Kg/cm2**	**Equivalencia respecto a la de normativa**
Normativa	$Ec = 4700\sqrt{F`c}$	$Ec = 15100\sqrt{F`c}$	100
Muestra patrón	$Ec = 3900\sqrt{F`c}$	$Ec = 12470\sqrt{F`c}$	82,98
3% material reciclado	$Ec = 3610\sqrt{F`c}$	$Ec = 11530\sqrt{F`c}$	76,81
5% material reciclado	$Ec = 3740\sqrt{F`c}$	$Ec = 11930\sqrt{F`c}$	79,57

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

Tabla 31 *Determinación de factores para fórmula de módulo de elasticidad*

Determinación de factores para fórmula de módulo de elasticidad		
Descripción	**E redondeado a los 10 MPa más cercanos**	**E redondeado a los 10 kg/cm2 más cercanos**
3% de material reciclado	3610	11530
5% de material reciclado	3740	11930
Muestra patrón	**3900**	**12470**
Normativa	**4700**	**15100**

Fuente: Liberman Orquera y Martin Palma (2026).

5. CONCLUSIONES

- Bajo las condiciones experimentales de esta investigación, la incorporación de agregado grueso reciclado en porcentajes de reemplazo del 3 % y 5 % produjo una disminución de la resistencia a la compresión respecto al hormigón convencional. En comparación con la muestra patrón, que alcanzó una resistencia promedio de 292 kg/cm², las mezclas con 3 % y 5 % de agregado reciclado presentaron reducciones aproximadas del 23,6 % y 12,3 %, respectivamente.
- Al incrementar el porcentaje de agregado grueso reciclado se produjo un aumento en la resistencia a la compresión respecto a la mezcla con menor contenido de reemplazo. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de mortero adherido al agregado reciclado, las cuales incrementan la superficie específica del material y modifican la relación agua-cemento efectiva de la mezcla, favoreciendo el desarrollo de resistencia.

- El módulo de elasticidad experimental fue inferior al valor estimado mediante la formulación normativa del ACI. La muestra patrón alcanzó el mayor desempeño, con una equivalencia del 82,98 % respecto a la normativa, mientras que las mezclas con 3 % y 5 % de agregado grueso reciclado alcanzaron el 76,81 % y 79,57 %, respectivamente. Esto evidencia que la incorporación de agregado reciclado reduce la rigidez del hormigón, aunque la mezcla con 5 % presentó un mejor comportamiento que la mezcla con 3 %. En consecuencia, se observa que los modelos normativos pueden sobreestimar el módulo de elasticidad del hormigón elaborado con materiales locales, por lo que los ensayos experimentales resultan necesarios para evaluar su comportamiento real.

6. RECOMENDACIONES

- En futuras investigaciones se recomienda realizar correcciones de humedad independientes para los agregados naturales y reciclados antes de la elaboración de las mezclas, con el fin de controlar de manera más precisa la relación agua-cemento efectiva y minimizar posibles variaciones en los resultados.
- Se recomienda ampliar el estudio considerando porcentajes adicionales de reemplazo de agregado grueso reciclado, con el propósito de identificar el límite a partir del cual las propiedades mecánicas del hormigón comienzan a verse afectadas de manera significativa.
- Se recomienda desarrollar investigaciones que incluyan un mayor número de especímenes y edades de ensayo, permitiendo evaluar la evolución de las propiedades mecánicas a corto y largo plazo.
- Considerando los resultados obtenidos en esta investigación, se recomienda continuar promoviendo el uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición en aplicaciones no estructurales y, posteriormente, evaluar su utilización en elementos estructurales bajo condiciones controladas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ACI Committee 211. (2009). ACI 211.1-91: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (Reapproved 2009). American Concrete Institute.
- ACI Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2000). Cement and concrete terminology (ACI 116R-00). American Concrete Institute.
- ASTM International. (2019). ASTM C136/C136M-19: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM International.
- ASTM International. (2019). ASTM C566-19: Standard test method for total evaporable moisture content of aggregate by drying. ASTM International.
- ASTM International. (2020). ASTM C131/C131M-20: Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. ASTM International.
- ASTM International. (2021). ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
- ASTM International. (2022). ASTM C469/C469M-22: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. ASTM International.
- ASTM International. (2023). ASTM C29/C29M-23: Standard test method for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate. ASTM International.
- ASTM International. (2023). ASTM C33/C33M-23: Standard specification for concrete aggregates. ASTM International.
- ASTM International. (2023). ASTM C187-23: Standard test method for amount of water required for normal consistency of hydraulic cement paste. ASTM International.
- ASTM International. (2025). ASTM C127-25: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. ASTM International.
- ASTM International. (2015). ASTM C128-15: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. ASTM International.
- García, E. D. (1996). Características mecánicas de materiales de construcción. En Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico: Cursos de verano de El Escorial de la Universidad Complutense de Madrid, 1994 (pp. 249–270).
- González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F. (2005). Recycled aggregates concrete: Aggregate and mix properties. Materiales de Construcción, 55(279), 53–66. https://doi.org/10.3989/mc.2005.v55.i279.198
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 1573:2010: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico (Primera revisión). INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 1578:2010: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento (Primera revisión). INEN.

- León, M. P., & Ramírez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. Revista Ingeniería de Construcción, 25(2), 215–240. https://doi.org/10.4067/S0718-50732010000200003
- McNeil, K., & Kang, T. H.-K. (2013). Recycled concrete aggregates: A review. International Journal of Concrete Structures and Materials, 7, 61–69. https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, properties, and materials (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2011). Properties of concrete (5th ed.). Pearson.
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2016). Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. Journal of Cleaner Production, 112, 2171–2186. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.064
- Suárez-Silgado, S. S., Betancourt Quiroga, C., Molina Benavides, J., & Mahecha Vanegas, L. (2019). La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio: estado actual, barreras e instrumentos de gestión. Entramado, 15(1), 224–244. https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.5408
- Vidaud, E. (2013). De la historia del cemento. Construcción y Tecnología en Concreto, 60, 20–23.
- Xiao, J., Li, J., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. Cement and Concrete Research, 35(6), 1187–1194. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020
- Zega, C. J. (2008). Hormigones reciclados: Caracterización de los agregados gruesos reciclados. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.