



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

Unidad Académica de Formación Técnica y Tecnológica – PUCE TEC

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE: TECNÓLOGO SUPERIOR EN CONSTRUCCIÓN**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL
HORMIGÓN PREMEZCLADO ELABORADO CON AGREGADO REUTILIZADO DE
LA EMPRESA UCEM FRENTE AL HORMIGÓN CONVENCIONAL,2026**

Autor: Miguel Quelal

Tutor: Ing. Edison Cueva

Quito, Ecuador

2026



Dedicatoria

A mi esposa, compañera fiel de cada desafío, gracias por tu comprensión en los días de ausencia, por tu fortaleza en los momentos de dificultad y por ser el pilar que sostiene mis sueños. Tu apoyo constante ha sido la base firme sobre la cual se construyó este logro.

A mis hijo/a, razón infinita de mi esfuerzo y perseverancia. Ustedes son la motivación que me impulsa a seguir creciendo, a superarme y a demostrarles que con disciplina y determinación todo es posible.

A mis docentes, quienes con profesionalismo y compromiso compartieron no solo conocimientos, sino también valores y experiencias que marcaron mi formación académica y personal.

A quienes estuvieron presentes con una palabra de aliento o un gesto de confianza, gracias por creer en mí y acompañarme en este proceso.

Y de manera muy especial, a mi madre, ejemplo eterno de sacrificio, valentía y amor incondicional. Cada paso que doy lleva la huella de tus enseñanzas. Este logro representa el fruto de tus consejos y el reflejo de tu lucha incansable.

Con gratitud profunda, dedico este trabajo a todos ustedes, porque este éxito no es solo mío, sino de quienes caminaron a mi lado.

DECLARACIÓN y AUTORIZACIÓN

Yo, Quelal Martinez Miguel Angel con C.I. 0401565247 autor(a) del trabajo de titulación intitulado: Análisis comparativo del comportamiento mecánico del hormigón premezclado elaborado con agregado reutilizado de la empresa UCEM frente al hormigón convencional, previa a la obtención del título de Tecnólogo Superior en Construcción en la Unidad Académica de Formación Técnica y Tecnológica PUCE TEC:

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través de sitio web de la Biblioteca de la PUCE el referido trabajo de titulación, respetando las políticas de propiedad intelectual de Universidad.

Quito,



Miguel Angel Quelal Martinez

C.I. 1721106480



Agradecimiento

A mis queridos profesores, quiero transmitir mi más profundo agradecimiento por el tiempo, la dedicación y el compromiso que han mostrado a lo largo de mi trayectoria educativa. Su guía, paciencia y voluntad de compartir sus conocimientos de manera generosa no solo han impulsado mi desarrollo profesional, sino que también han aportado de manera significativa a mi crecimiento personal, dejando una marca indeleble en mi vida.

A la firma UCEM S.A., deseo expresar mi sincero agradecimiento por el apoyo institucional que me ofrecieron durante este proceso. Su confianza, comprensión y asistencia continua fueron clave para que pudiera equilibrar mis responsabilidades laborales y académicas, lo que me permitió alcanzar esta meta de superación profesional.

A todas las personas que han sido parte de este viaje, gracias por su aliento, apoyo y confianza. Este éxito refleja también la ayuda y la colaboración de cada uno de ustedes.

INDICE DE CONTENIDOS

1	CAPÍTULO I – INTRODUCCION.....	8
1.1	Contexto del estudio	8
1.2	Antecedentes del uso de agregado reutilizado en hormigón.....	8
1.3	Planteamiento del problema.....	9
1.4	Justificación	10
1.4.1	Justificación ambiental	10
1.4.2	Justificación técnica.....	10
1.4.3	Justificación económica.....	10
1.5	Objetivos	11
1.5.1	Objetivo general	11
1.5.2	Objetivos específicos	11
1.6	Alcance y limitaciones del estudio	11
2	CAPITULO II – MARCO TEORICO.....	12
2.1	Antecedentes	12
2.2	Sostenibilidad y gestión de residuos en la construcción.....	12
2.2.1	Concepto de sostenibilidad en materiales de construcción	12
2.2.2	Gestión de residuos de construcción y demolición	13
2.2.3	Reciclaje de concreto como estrategia ambiental y técnica	13
2.3	Hormigón y su clasificación	14
2.3.1	Definición e importancia en obras civiles	14
2.3.2	Componentes del hormigón.....	14
2.4	Hormigón convencional vs hormigón premezclado	15
2.4.1	Propiedades principales del hormigón: estado fresco y estado endurecido.....	15



2.5	Agregados para hormigón.....	16
2.5.1	Definición de agregado fino y agregado grueso.....	16
2.5.2	Propiedades físicas relevantes de los agregados.....	16
2.6	Influencia de los agregados en la resistencia del hormigón.....	18
2.7	Agregado reutilizado de concreto	18
2.7.1	Definición y origen del agregado reutilizado de concreto.....	18
2.7.2	Procesos de producción: trituración, clasificación y control.....	18
2.7.3	Características y diferencias respecto al agregado natural	18
2.8	Ventajas ambientales y limitaciones técnicas del uso de agregados reutilizados	19
2.9	Propiedades del agregado reutilizado de concreto y su efecto en el hormigón	19
2.9.1	Porosidad y mortero adherido.....	19
2.9.2	Absorción y demanda de agua.....	19
2.9.3	Textura superficial y adherencia pasta-agregado.....	19
2.9.4	Contenido de finos y efecto en trabajabilidad	20
2.10	Humedad del agregado, condición SSD y corrección del agua efectiva.....	20
2.10.1	Humedad total del agregado: concepto e importancia	20
2.10.2	Humedad superficial: definición y diferencia con absorción	20
2.10.3	Condición saturada superficialmente seca (SSD).....	20
2.11	Corrección del agua de mezclado por humedad y absorción	21
2.12	Efecto de la humedad superficial en la relación agua/cemento y la resistencia.....	21
2.13	Comportamiento del hormigón con agregado reutilizado de concreto	21
2.13.1	Efectos en el estado fresco (trabajabilidad y cohesión).....	21
2.13.2	Efectos en el estado endurecido (resistencia mecánica).....	22
2.13.3	Durabilidad del hormigón con agregados reutilizados	22
2.14	Normativa técnica aplicada al estudio.....	22

2.14.1	Normativa ASTM para agregados	22
2.14.2	Normativa ASTM para hormigón	22
2.14.3	Relación con normativa nacional (NEC/INEN)	22
3	CAPÍTULO III - MATERIALES Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL	23
3.1	Introducción	23
3.2	Materiales empleados	23
3.2.1	Cemento.....	23
3.2.2	Agua de mezclado	24
3.2.3	Agregado fino natural.....	24
3.2.4	Agregado grueso natural.....	25
3.2.5	Agregado reutilizado de concreto (UCEM).....	25
3.3	Equipos, instrumentos y materiales de laboratorio	26
3.4	Muestreo de materiales para caracterización	27
3.4.1	Objetivo del muestreo.....	27
3.4.2	Técnica de reducción de muestra (cuarteo mecánico).....	28
3.5	Granulometría de agregados finos y gruesos	28
3.6	Contenido de finos (material que pasa tamiz N°200)	32
3.6.1	Importancia del ensayo.....	32
3.6.2	Procedimiento general	32
3.7	Humedad del agregado y condición saturada superficialmente seca (SSD).....	33
3.7.1	Humedad total del agregado	33
3.7.2	Humedad superficial del agregado	34
3.7.3	Importancia de la humedad superficial en la comparación experimental	34
3.7.4	Definición operativa de la condición saturada superficialmente seca (SSD).....	34
3.7.5	Determinación de SSD en agregado fino	35



3.7.6	Cálculo de humedad superficial	41
3.8	Determinación del valor de la degradación del árido grueso mediante el uso de la máquina de los ángeles.	42
3.9	Método De Ensayo Para Determinar El Peso Específico Y La Absorción Del Agregado Grueso.....	44
3.9.1	Equipos A Utilizar	45
3.9.2	Obtención de muestra	47
3.9.3	Procedimiento del Ensayo	47
3.9.4	Trabajo de Gabinete: Obtención de Resultados	50
3.9.5	Resultados Obtenidos del Agregado Grueso	51
3.10	Gravedad Especifica Y Absorción De Agregado Fino; Error! Marcador no definido.	
3.10.1	Materiales o equipos a utilizar..... ¡Error! Marcador no definido.	
3.10.2	Preparación de la muestra de ensayo de Agregado Fino; Error! Marcador no definido.	
3.10.3	Ensayo para humedad superficial..... ¡Error! Marcador no definido.	
3.10.4	Resultados Obtenidos del Agregado Fino	¡Error! Marcador no definido.
4	CAPÍTULO IV – RESULTADOS Y ANALISIS	52
4.1	Descripción general de la base experimental.....	52
4.2	Datos iniciales del programa experimental y caracterización de mezclas.....	52
4.2.1	Parámetros de dosificación.....	53
4.2.2	Composición de agregados.....	54
4.2.3	Propiedades del hormigón en estado fresco	55
4.3	Resistencia a la compresión.....	57
4.3.1	Resistencia a 1 día	57
4.3.2	Resistencia a 3 días.....	60



4.4	Proyección teórica.....	63
4.4.1	Rango de valores de Resistencias proyectadas.....	65
4.4.2	Coherencia con el comportamiento experimental	66
4.4.3	Evaluación estructural integral	66
4.5	Análisis final de los resultados obtenidos.....	66
4.6	Criterios técnicos adoptados para la clasificación	67
4.6.1	Comportamiento reológico controlable	67
4.6.2	Mezclas Óptimas	68
4.6.3	Mezclas dentro del margen aceptable.....	68
4.6.4	Validación del uso de agregado reciclado	68
5	CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1	Conclusiones	70
5.2	Recomendaciones	71
6	Bibliografía.....	73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades físicas esenciales del agregado y su impacto en el hormigón</i>	17
Tabla 2 <i>Criterios de corrección del agua según condición del agregado</i>	21
Tabla 3 <i>Especificaciones para la carga</i>	42
Tabla 4 <i>Graduación de las muestras de ensayo</i>	42
Tabla 5 <i>Ensayo de los ángeles Agregado Grueso</i>	43
Tabla 6 <i>Ensayo de los ángeles Agregado Grueso (Reciclado)</i>	44
Tabla 7 <i>Granulometría agregado grueso (Reciclado)</i>	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 8 <i>Granulometría agregado fino</i>	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9 <i>Masa mínima a utilizar según la ASTM C127</i>	47
Tabla 10 <i>Resultados Peso Específico y Absorción de Agregado Grueso</i>	51
Tabla 11 <i>Resultados de Peso específico y Absorción del agregado fino</i>	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12 <i>Parámetros Relación A/C y Factor RF</i>	53
Tabla 13 <i>Composición de agregados por mezcla</i>	54
Tabla 14 <i>Asentamiento del hormigón en función del tiempo</i>	55
Tabla 15 <i>Resistencia a la compresión a 1 día</i>	58
Tabla 16 <i>Resultados de Resistencia a la compresión a 3 días</i>	60
Tabla 17 <i>Proyección de resistencia a 7 y 28 días</i>	64
Tabla 18 <i>Clasificación técnica final</i>	67



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Recolección de muestras de agregados fino y grueso</i>	24
Figura 2 <i>Selección de agregado reutilizado de concreto (UCEM)</i>	25
Figura 3 <i>Bandeja, Espátula y brochas</i>	26
Figura 4 <i>Cuartheador mecánico agregado grueso</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5 <i>Cuartheador mecánico agregado fino</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6 <i>Recolección de muestras de agregados fino y grueso</i>	27
Figura 7 <i>Curva granulométrica Agregado Grueso(Reciclado)</i> ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 8 <i>Curva granulométrica agregado fino</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9 <i>Balanza y Canastilla</i>	46
Figura 10 <i>Horno de secado de muestras</i>	46
Figura 11 <i>Agregado sumergido en agua</i>	48
Figura 12 <i>Remisión de agua en tela absorbente</i>	48
Figura 13 <i>Determinación de muestra de aire</i>	49
Figura 14 <i>Determinación de masa aparente</i>	49
Figura 15 <i>Horno de Secado Agregado Fino</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16 <i>Preparación de Agregado Fino</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17 <i>Procedimiento obtención humedad superficial</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18 <i>Obtención de masa del matraz</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19 <i>Mezcla de Agua y muestra de agregado fino en el matraz</i> ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 20 <i>Variación del asentamiento con el tiempo</i>	56
Figura 21 <i>Relación entre el porcentaje de agregado reciclado y la resistencia a la compresión a 3 días</i>	61
Figura 22 <i>Evolución de resistencia para mezclas con mayores resistencias a 3 días, incorporando proyecciones a 7 y 28 días</i>	64



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

1 CAPÍTULO I – INTRODUCCION

1.1 Contexto del estudio

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en ingeniería civil por su versatilidad, disponibilidad y rendimiento estructural. Su composición, basada en cemento, agua y agregados, implica un alto consumo de recursos naturales, particularmente áridos finos y gruesos, que representan gran parte del volumen total de la mezcla (Cavalline et al., 2022). Este escenario se intensifica con el crecimiento urbano, debido a que la demanda de insumos para obras civiles aumenta en paralelo a la generación de residuos derivados de la construcción.

En este marco, los residuos de construcción y demolición (RCD) han adquirido relevancia por su impacto ambiental y por el volumen de material potencialmente reutilizable que contienen. La Federal Highway Administration (2024) indica que el concreto endurecido puede ser reciclado mediante procesos de trituración y clasificación, obteniendo agregados reutilizables que pueden incorporarse en diferentes aplicaciones, incluyendo bases granulares y, en condiciones controladas, nuevas mezclas de concreto (Federal Highway Administration, 2024).

Además, el enfoque actual de sostenibilidad impulsa la transición hacia la economía circular, donde los residuos son considerados recursos que pueden reinsertarse en procesos productivos. En el caso del concreto, ACI Committee 555 (2001) sostiene que la remoción y reutilización del concreto endurecido requiere criterios técnicos y de control de calidad para garantizar que el material resultante pueda ser utilizado con confiabilidad (ACI Committee 555, 2001). Por ello, esta investigación busca comparar el comportamiento mecánico entre el hormigón convencional y el hormigón premezclado con agregado reutilizado UCEM, generando evidencia técnica para apoyar decisiones de uso.

1.2 Antecedentes del uso de agregado reutilizado en hormigón

El agregado reciclado de concreto (RCA) proviene del procesamiento de concreto endurecido, generalmente por trituración, lavado y clasificación granulométrica. Una característica clave del RCA es la presencia de mortero adherido a las partículas originales, lo que tiende a aumentar la porosidad y la absorción respecto al agregado natural (ACI Committee 555, 2001). Como

consecuencia, estas propiedades pueden alterar el comportamiento del hormigón en estado fresco y endurecido (Cavalline et al., 2022).

De acuerdo con Cavalline et al. (2022), el uso del agregado reciclado en hormigón es técnicamente posible, pero su desempeño depende de variables críticas como la absorción, la gradación, la calidad del residuo base y el porcentaje de reemplazo del agregado natural (Cavalline et al., 2022). En ese sentido, el empleo del RCA exige una caracterización previa cuidadosa para evitar variaciones significativas en la mezcla final.

A nivel metodológico, el control del material reciclado debe acompañarse de ensayos estandarizados, debido a que el objetivo de una comparación experimental es obtener resultados reproducibles y técnicamente sustentables. Por esta razón, se aplicarán procedimientos de muestreo, reducción de muestra y ensayos de agregados conforme a normas reconocidas (ASTM International, 2019; ASTM International, 2025).

1.3 Planteamiento del problema

El incremento de residuos de hormigón endurecido implica problemas ambientales vinculados a la disposición final, saturación de botaderos y afectación paisajística. Paralelamente, desde el enfoque productivo, estos residuos representan un recurso potencial poco aprovechado en muchos contextos urbanos. En Ecuador, este panorama se agrava por la limitada aplicación de estudios comparativos experimentales que determinen el comportamiento real del hormigón con agregados reutilizados en condiciones locales.

El principal reto técnico radica en que el agregado reciclado presenta propiedades físicas distintas al agregado natural, especialmente en absorción y densidad, lo cual puede modificar la trabajabilidad y la resistencia de las mezclas si no se corrige el diseño (Cavalline et al., 2022). Por tanto, resulta indispensable evaluar el RCA proveniente de UCEM bajo metodología experimental con ensayos normalizados.

En relación con la verificación mecánica, la resistencia a compresión es una variable determinante para aceptar o rechazar mezclas en el control de calidad del hormigón. ASTM International (2023) establece que la resistencia a compresión se determina aplicando carga axial hasta la falla del espécimen cilíndrico, permitiendo comparar materiales en condiciones

equivalentes (ASTM International, 2023). Con base en ello, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿El hormigón premezclado producido con agregado reutilizado UCEM puede alcanzar un comportamiento mecánico comparable al hormigón convencional, evaluado mediante ensayos normalizados?

1.4 Justificación

1.4.1 Justificación ambiental

El reciclaje del concreto endurecido aporta a la sostenibilidad al reducir la extracción de áridos vírgenes y disminuir los volúmenes de residuos enviados a disposición final. La FHWA (2024) reconoce esta práctica como parte de estrategias de sostenibilidad en infraestructura, destacando que el reciclaje de concreto disminuye impactos ambientales asociados al transporte y explotación de agregados naturales (Federal Highway Administration, 2024). En consecuencia, este trabajo se alinea con políticas contemporáneas orientadas a la economía circular y la gestión responsable de recursos.

1.4.2 Justificación técnica

La utilización del Agregado de Concreto Reciclado en hormigón puede producir cambios medibles en el material, por lo que es necesario cuantificar su desempeño mediante ensayos confiables. Según ACI Committee 555 (2001), la reutilización del concreto endurecido requiere control del material reciclado y criterios claros para su incorporación en nuevas aplicaciones (ACI Committee 555, 2001). En coherencia, esta investigación contribuye generando evidencia experimental sobre el agregado reciclado de UCEM y su influencia en el desempeño del hormigón.

1.4.3 Justificación económica

El aprovechamiento del agregado reciclado puede generar beneficios económicos al reducir el consumo de material virgen y costos asociados al manejo de escombros. Además, si se valida su desempeño, podría facilitar alternativas más competitivas y sostenibles para la industria del hormigón premezclado (Cavalline et al., 2022).

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar el comportamiento mecánico del hormigón premezclado con agregado grueso reutilizado de la empresa UCEM y compararlo con el hormigón convencional, a partir del análisis experimental de sus propiedades en estado fresco y su resistencia a la compresión, para establecer su viabilidad técnica en aplicaciones constructivas.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar los parámetros iniciales de diseño de mezcla, incluyendo relación agua/cemento y porcentaje de sustitución del agregado grueso natural por agregado reutilizado.
- Evaluar el comportamiento del hormigón en estado fresco mediante ensayos de asentamiento, contenido de aire y densidad.
- Determinar la resistencia a la compresión de las mezclas a edades tempranas (1 y 3 días) para establecer el desarrollo inicial de resistencia.
- Proyectar la resistencia a 7 y 28 días mediante relaciones empíricas, con el fin de estimar su desempeño estructural potencial.
- Comparar el desempeño mecánico del hormigón con agregado reutilizado frente al hormigón convencional, identificando tendencias y niveles de viabilidad técnica.

1.6 Alcance y limitaciones del estudio

Esta investigación se desarrolla bajo unábrica experimental, enfocándose en la comparación de hormigón convencional y hormigón con agregado reutilizado UCEM. El alcance se centra en la caracterización previa de agregados, diseño de mezclas y evaluación del desempeño mecánico, tomando la resistencia a compresión como variable principal (ASTM International, 2023).

No obstante, se reconoce que el Agregado de Concreto Reciclado presenta variabilidad asociada al origen del concreto demolido y al proceso de trituración, lo que puede influir en resultados si no se controla adecuadamente (ACI Committee 555, 2001). Por ello, se aplicarán procedimientos de muestreo y cuarteo para asegurar representatividad (ASTM International, 2019; ASTM International, 2025).

2 CAPITULO II – MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes

La construcción representa uno de los sectores con mayor presión sobre los recursos naturales, debido al consumo intensivo de materias primas como agregados pétreos, cemento y agua, además de la energía implicada en el transporte, la extracción y la producción de insumos. En consecuencia, el aumento sostenido de obras civiles y urbanas también genera un volumen creciente de residuos de construcción y demolición, cuya disposición final puede convertirse en un problema ambiental y sanitario cuando no existen sistemas de control adecuados.

En este escenario, la economía circular se consolida como un enfoque de gestión que propone mantener los materiales dentro del ciclo productivo el mayor tiempo posible, reduciendo la extracción de recursos vírgenes y promoviendo rutas de valorización para los residuos. En tu proyecto se reconoce que la reutilización de escombros provenientes de hormigoneras como UCEM se plantea como una alternativa para disminuir impactos negativos derivados de botaderos y rellenos, y simultáneamente impulsar prácticas sostenibles dentro del hormigón premezclado en Ecuador.

De forma complementaria, la Federal Highway Administration (FHWA) ha señalado que el reciclaje del concreto puede incorporarse a estrategias sostenibles siempre que el material sea procesado, clasificado y controlado con criterios técnicos, especialmente por su influencia en absorción y gradación (Cavalline et al., 2022).

2.2 Sostenibilidad y gestión de residuos en la construcción

2.2.1 Concepto de sostenibilidad en materiales de construcción

La sostenibilidad aplicada a los materiales de construcción implica evaluar tanto el desempeño técnico como los impactos ambientales asociados al ciclo de vida del material. En obras civiles, esto se traduce en reducir la extracción de agregados naturales, disminuir el volumen de residuos generados y optimizar el consumo energético sin sacrificar seguridad estructural. Bajo esta perspectiva, el uso de agregados reutilizados en hormigón se presenta como una estrategia de sostenibilidad “técnico-ambiental”, ya que transforma un residuo en un insumo con capacidad de reincorporación al sistema constructivo.

El plan de tu tesis resalta que, aunque existe tendencia a desarrollar hormigones con materiales reutilizados, todavía se percibe un déficit de información clara y sintetizada que permita a los profesionales confiar en estos sistemas, especialmente en el contexto local. Por ello, la sostenibilidad en este estudio no se entiende únicamente como una intención ambiental, sino como una validación técnica sustentada en ensayos comparativos, capaz de demostrar si el agregado reutilizado de UCEM puede emplearse de forma viable en hormigón premezclado sin comprometer el comportamiento mecánico.

2.2.2 Gestión de residuos de construcción y demolición

Los residuos de construcción y demolición (RCD) abarcan materiales resultantes de procesos de obra, rehabilitación y demolición. Cuando los RCD se disponen sin control, no solo se ocupan espacios de forma ineficiente, sino que se producen efectos indirectos como contaminación por material particulado, pérdida de valor del suelo y afectación de drenajes urbanos.

En tu documento se sostiene que esta problemática ha adquirido alcance global y que la construcción es una de las industrias que contribuye con mayor intensidad debido al elevado consumo de hormigón como material base. De manera consistente, la gestión eficiente de RCD se considera un requisito previo para implementar economía circular, porque permite convertir el “escombro” en un recurso potencialmente aprovechable. Dentro de esta lógica, la reutilización del concreto endurecido apunta a reducir la presión sobre canteras, disminuir el volumen enviado a disposición final y aportar a una cultura de producción responsable.

2.2.3 Reciclaje de concreto como estrategia ambiental y técnica

El reciclaje de concreto no debe entenderse como una práctica improvisada de uso de escombros, sino como un proceso industrial de transformación del concreto endurecido en un agregado utilizable, mediante trituración, clasificación granulométrica y controles de calidad. Desde el punto de vista técnico, la principal condición para su implementación consiste en garantizar que el material reciclado posea propiedades compatibles con la fabricación de hormigón, especialmente porque la presencia de mortero adherido, porosidad y finos puede alterar el comportamiento en estado fresco y endurecido.



El American Concrete Institute sostiene que la remoción y el reúso del concreto endurecido pueden ser viables cuando existen procedimientos y criterios de evaluación para su aprovechamiento, resaltando que el material reciclado debe analizarse considerando sus limitaciones y su campo de aplicación (ACI Committee 555, 2001). En tu tesis, este enfoque se incorpora de forma directa al proponerse evaluar la factibilidad de incorporar agregados reutilizados provenientes de UCEM comparando propiedades mecánicas y de desempeño frente a un hormigón convencional.

2.3 Hormigón y su clasificación

2.3.1 Definición e importancia en obras civiles

El hormigón es un material compuesto resultado de la combinación de cemento, agua y agregados, que desarrolla resistencia mediante la hidratación del cemento. Se ha consolidado como uno de los materiales más importantes en ingeniería civil debido a su disponibilidad, versatilidad constructiva, resistencia a compresión y capacidad de adaptarse a diversas formas mediante encofrados. Su importancia práctica se refleja en su aplicación en elementos estructurales como columnas, vigas, losas, cimentaciones, pavimentos, muros de contención y obras hidráulicas.

No obstante, la masificación del hormigón también implica desafíos ambientales asociados a la producción de cemento y al consumo de agregados. Por esta razón, se impulsa el desarrollo de alternativas que mantengan su confiabilidad estructural y reduzcan impactos, dentro de los cuales el uso de agregados reutilizados ocupa un lugar cada vez más relevante, especialmente cuando se sustenta con evidencia experimental.

2.3.2 Componentes del hormigón

En términos generales, el hormigón se compone de:

Cemento: material aglomerante hidráulico responsable de la formación de la pasta cementicia y del desarrollo de resistencia.

Agua: activa el proceso de hidratación y regula la trabajabilidad.

Agregados finos y gruesos: proporcionan estabilidad volumétrica y conforman el esqueleto granular del hormigón.

Dentro de esta mezcla, los agregados ocupan la mayor fracción de volumen. En consecuencia, sus características no son secundarias, sino determinantes: la gradación, el contenido de finos, la absorción y la humedad controlan tanto el comportamiento en estado fresco como la resistencia final. Por ello, antes de comparar hormigones, es indispensable caracterizar los agregados con ensayos normalizados, tal como se plantea en los objetivos específicos del presente trabajo de grado.

2.4 Hormigón convencional vs hormigón premezclado

El hormigón convencional se produce comúnmente en obra, con controles variables de dosificación y homogeneidad. En contraste, el hormigón premezclado se fabrica en planta, lo que favorece la repetibilidad y el control de la producción. Esta diferencia resulta crucial para investigaciones comparativas, porque la calidad del hormigón puede verse afectada por pequeñas variaciones de agua, agregado o método de compactación.

En línea con ello, ASTM establece que el hormigón premezclado se define como el material “manufacturado y entregado al comprador en estado fresco”, incorporando requisitos asociados a calidad, suministro y aceptación (ASTM C94/C94M). En el presente proyecto, el enfoque sobre hormigón premezclado es coherente, ya que se busca comparar el comportamiento mecánico bajo un esquema de control experimental que reduzca la variabilidad operativa.

2.4.1 Propiedades principales del hormigón: estado fresco y estado endurecido

Las propiedades del hormigón se diferencian en estado fresco y endurecido, de manera que el desempeño total del material depende de ambas etapas.

2.4.1.1 Hormigón en estado fresco

Incluye aspectos como trabajabilidad, cohesión, consistencia, segregación, exudación, densidad fresca y contenido de aire. En términos prácticos, la trabajabilidad se relaciona con la facilidad de colocación, compactación y terminación superficial, mientras que la cohesión refleja la estabilidad interna de la mezcla.



2.4.1.2 Hormigón en estado endurecido

Las propiedades endurecidas abarcan resistencia a compresión, rigidez, durabilidad, permeabilidad y resistencia a ciclos ambientales. La resistencia a compresión se utiliza como indicador central de desempeño mecánico y constituye uno de los parámetros principales de evaluación en la presente investigación.

2.5 Agregados para hormigón

2.5.1 Definición de agregado fino y agregado grueso

Defino el agregado fino como el material que pasa el tamiz No. 4, usualmente arena; y el agregado grueso como la fracción retenida mayormente en el tamiz No. 4, como grava o piedra triturada. Esta separación no solo depende del tamaño, sino del rol funcional: la arena influye en la cohesión y trabajabilidad, mientras que la grava aporta rigidez y soporte estructural.

2.5.2 Propiedades físicas relevantes de los agregados

2.5.2.1 Granulometría

La granulometría expresa la distribución de tamaños del agregado y se obtiene mediante tamizado. Esta propiedad es fundamental porque controla la compacidad del material, la demanda de pasta y la estabilidad interna del hormigón.

En mi estudio, adopto procedimientos normalizados de laboratorio para analizar la gradación de agregados finos y gruesos. La guía experimental que uso define el análisis granulométrico como un método que permite determinar el porcentaje de diferentes tamaños presentes en la muestra.

2.5.2.2 Contenido de finos

El contenido de finos, en especial el material que pasa el tamiz No. 200, puede incrementar la demanda de agua y alterar el comportamiento del hormigón fresco. La guía de laboratorio describe la determinación de finos mediante lavado, incluyendo decantación y repetición del proceso hasta obtener agua clara.



2.5.2.3 Humedad y absorción

La humedad del agregado representa el agua evaporable presente en el material, mientras que la absorción expresa la capacidad del agregado para retener agua en sus poros. En términos prácticos, ambas variables influyen en el agua efectiva real del hormigón, y por tanto en la relación agua/cemento.

El procedimiento de humedad por secado al horno y el cálculo correspondiente se describen en la guía experimental.

2.5.2.4 Densidad y gravedad específica

La gravedad específica permite comparar la densidad relativa del agregado y se utiliza en cálculos volumétricos de dosificación. En el agregado fino, el método se apoya en condición saturada superficialmente seca y gravedad aparente, con el fin de estimar absorción y parámetros de diseño.

Tabla 1

Propiedades físicas esenciales del agregado y su impacto en el hormigón

Propiedad	Significado técnico	Influencia en el hormigón
Granulometría	Distribución de tamaños	Trabajabilidad, compactación, demanda de pasta
Finos (No. 200)	Partículas ultrafinas	Aumenta agua requerida, puede generar segregación o mayor cohesión
Humedad total	Agua evaporable presente	Cambia el agua efectiva de mezcla
Absorción	Agua en poros del agregado	Reduce asentamiento si no se corrige
Gravedad específica	Densidad relativa	Control volumétrico y diseño de mezcla

Nota. Elaboración propia con base en criterios de caracterización de agregados y procedimientos de laboratorio.

2.6 Influencia de los agregados en la resistencia del hormigón

La resistencia del hormigón depende, entre otros factores, de la relación agua/cemento y la calidad del esqueleto granular. Cuando el agregado presenta una gradación adecuada, el material se compacta mejor y se reduce el contenido de vacíos. En cambio, si existe exceso de finos o humedad no controlada, pueden ocurrir pérdidas de trabajabilidad, variación de la relación agua/cemento efectiva y reducción de resistencia.

ASTM establece requisitos de gradación y calidad para agregados en concreto, de forma que el material no contenga sustancias perjudiciales y cumpla un comportamiento apropiado (ASTM C33/C33M).

2.7 Agregado reutilizado de concreto

2.7.1 Definición y origen del agregado reutilizado de concreto

En esta investigación denomino agregado reutilizado de concreto al material granular obtenido a partir de concreto endurecido triturado y clasificado. Este material puede provenir de residuos de demolición o de excedentes de plantas de hormigón. Mi interés se centra en su aplicación como sustituto parcial del agregado natural en hormigón premezclado.

2.7.2 Procesos de producción: trituración, clasificación y control

El agregado reutilizado de concreto se produce mediante:

- Trituración Del Material Endurecido,
- Clasificación Por Tamaño,
- Control De Calidad (Gradación, Finos, Absorción Y Humedad).

El ACI sostiene que el reúso del concreto endurecido debe basarse en procesos de evaluación técnica, para identificar su campo de aplicación y evitar riesgos por variabilidad del material (ACI Committee 555, 2001).

2.7.3 Características y diferencias respecto al agregado natural

A diferencia del agregado natural, el agregado reutilizado presenta con frecuencia mortero adherido, mayor porosidad y absorción, además de posibles incrementos de finos por trituración.

Estas diferencias explican por qué su incorporación requiere ajuste de agua, control de humedad superficial y evaluación comparativa antes de su aceptación para uso estructural.

2.8 Ventajas ambientales y limitaciones técnicas del uso de agregados reutilizados

Entre las ventajas principales identifico:

- Reducción Del Consumo De Agregados Naturales,
- Disminución Del Volumen De Residuos,
- Potencial Mejora En Sostenibilidad Del Proceso Productivo.

No obstante, también considero limitaciones:

- Variabilidad Por Origen Del Material,
- Absorción Elevada Y Ajustes De Dosificación,
- Riesgo De Contenidos Finos Fuera De Control Si No Se Procesa Adecuadamente.

2.9 Propiedades del agregado reutilizado de concreto y su efecto en el hormigón

2.9.1 Porosidad y mortero adherido

El mortero adherido incrementa la porosidad total del agregado reutilizado de concreto, lo cual afecta su densidad y absorción. En términos prácticos, este componente adicional puede alterar el equilibrio agua–pasta, especialmente en mezclas premezcladas donde el control de consistencia es crítico.

2.9.2 Absorción y demanda de agua

En mi análisis, la absorción se convierte en una variable determinante porque regula el agua disponible para hidratar el cemento y proporcionar trabajabilidad. La FHWA señala que el agregado reciclado de concreto suele requerir ajustes por absorción y control de gradación para su aplicación en hormigón (Cavalline et al., 2022).

2.9.3 Textura superficial y adherencia pasta–agregado

El agregado reutilizado suele presentar textura más rugosa y angularidad producto de la trituración. Esta característica puede mejorar la adherencia mecánica con la pasta; sin embargo,

la presencia de microdefectos del material original también puede influir en el comportamiento mecánico global. Por ello considero indispensable evaluar experimentalmente la resistencia a compresión para validar su desempeño real.

2.9.4 Contenido de finos y efecto en trabajabilidad

El contenido de finos puede aumentar por el proceso de trituración. Cuando existe exceso de material fino, se incrementa la demanda de agua y se altera la trabajabilidad. La guía de laboratorio empleada en esta investigación propone el lavado como método de separación y cuantificación del material fino pasante por No. 200.

2.10 Humedad del agregado, condición SSD y corrección del agua efectiva

2.10.1 Humedad total del agregado: concepto e importancia

La humedad total representa el agua evaporable presente en el agregado. Su determinación por secado al horno permite ajustar el agua real que ingresa a la mezcla. La guía de laboratorio detalla el procedimiento y fórmula para humedad natural por relación entre masa húmeda y masa seca.

2.10.2 Humedad superficial: definición y diferencia con absorción

Defino la humedad superficial como el agua libre adherida a la superficie del agregado. Esta se diferencia de la absorción porque la absorción corresponde al agua retenida dentro de poros. En consecuencia, la humedad superficial puede aumentar el agua efectiva del hormigón, mientras que una absorción elevada puede disminuirla si el agregado “toma” agua de la mezcla.

2.10.3 Condición saturada superficialmente seca (SSD)

La condición SSD corresponde al punto en el que el agregado tiene poros llenos, pero no presenta película de agua superficial. El procedimiento descrito en la guía experimental utiliza molde troncocónico como criterio, donde un “desplome ligero” indica condición superficialmente seca.



2.11 Corrección del agua de mezclado por humedad y absorción

Para evitar errores en dosificación, corrijo el agua de mezclado en función del estado del agregado:

- si existe humedad superficial positiva, reduzco el agua añadida,
- si el agregado está seco, incremento el agua para compensar absorción.

Tabla 2

Criterios de corrección del agua según condición del agregado

Condición	Descripción	Efecto sobre agua efectiva	Acción recomendada
Seco	Absorbe agua	Disminuye agua disponible	Añadir agua
SSD	Equilibrio ideal	Agua efectiva estable	No corregir
Húmedo	Agua libre superficial	Aumenta agua efectiva	Restar agua

Nota. El estado SSD se identifica con el criterio del molde troncocónico.

2.12 Efecto de la humedad superficial en la relación agua/cemento y la resistencia

La relación agua/cemento controla porosidad, trabajabilidad y resistencia. Si no corrijo la humedad superficial del agregado, puedo introducir más agua de la prevista, aumentar la relación agua/cemento efectivo y disminuir resistencia mecánica. Por esta razón, considero que esta sección es esencial para respaldar la metodología de caracterización desarrollada en el Capítulo III.

2.13 Comportamiento del hormigón con agregado reutilizado de concreto

2.13.1 Efectos en el estado fresco (trabajabilidad y cohesión)

En estado fresco, el agregado reutilizado tiende a modificar la trabajabilidad por su absorción y textura superficial. Por ello, la corrección del agua efectiva y el control de humedad son necesarios para lograr mezclas comparables frente al hormigón convencional.

2.13.2 Efectos en el estado endurecido (resistencia mecánica)

En estado endurecido, la resistencia a compresión constituye el indicador principal para evaluar desempeño mecánico. Su variación depende del porcentaje de sustitución, la calidad del agregado y la estabilidad de la relación agua/cemento.

2.13.3 Durabilidad del hormigón con agregados reutilizados

La durabilidad se asocia con permeabilidad y absorción. En el agregado reutilizado, la porosidad y mortero adherido pueden favorecer el ingreso de agua y agentes agresivos, de modo que el control de finos, humedad y gradación es relevante para evitar comportamientos desfavorables.

2.14 Normativa técnica aplicada al estudio

2.14.1 Normativa ASTM para agregados

En la caracterización de agregados utilizo referencias ASTM para muestreo y ensayos de laboratorio. El muestreo se basa en criterios como ASTM D75/D75M, y los ensayos incluyen granulometría, finos No. 200, humedad y absorción según procedimientos normalizados.

2.14.2 Normativa ASTM para hormigón

Para hormigón premezclado considero la especificación ASTM C94/C94M, ya que define requisitos de calidad y aceptación del hormigón fabricado y entregado en estado fresco (ASTM C94/C94M, 2023/2024).

2.14.3 Relación con normativa nacional (NEC/INEN)

En el marco de aplicación local, vinculo los ensayos y resultados con normativa de construcción aplicable, de modo que los hallazgos del estudio no sean únicamente experimentales, sino interpretables para el contexto ecuatoriano.

3 CAPÍTULO III - MATERIALES Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En este capítulo presento la selección de materiales, el procedimiento de muestreo, y la caracterización experimental necesaria para comparar el comportamiento mecánico del hormigón premezclado convencional frente al hormigón premezclado elaborado con agregado reutilizado de concreto proveniente de la empresa UCEM.

El propósito central de la caracterización es controlar variables físicas de los agregados (granulometría, contenido de finos, humedad, absorción y gravedad específica), debido a que estos parámetros influyen directamente en la relación agua/cemento efectivo, en la trabajabilidad del hormigón fresco y en la resistencia mecánica en estado endurecido. La literatura técnica sostiene que, si no se corrige adecuadamente la humedad y absorción, se generan cambios reales en el contenido de agua de la mezcla y, por tanto, variaciones significativas en el desempeño mecánico del material (ASTM International, 2025a; ASTM International, 2024a).

De forma complementaria, tomo como base metodológica el enfoque de análisis comparativo del proyecto, donde se establece que la investigación se centra en la dosificación y caracterización de materiales, con énfasis en resistencia, trabajabilidad y durabilidad del hormigón con sustitución parcial de agregado natural por agregado reutilizado de UCEM (Quelal, 2025).

3.2 Materiales empleados

En la investigación utilizo materiales convencionales del hormigón y, como componente experimental principal, incorporo agregado reutilizado de concreto UCEM para el análisis comparativo.

3.2.1 Cemento

Utilizo cemento hidráulico como material aglomerante principal, debido a que es el responsable de la hidratación y del desarrollo de resistencia mecánica. En términos funcionales, el cemento

reacciona con el agua, genera productos de hidratación y forma una matriz endurecida que envuelve y liga los agregados, permitiendo la transferencia de esfuerzos en el hormigón endurecido.

Desde un punto de vista experimental, mantengo el cemento como una variable controlada, porque el objetivo del estudio no es evaluar cambios de tipo de cemento, sino analizar el efecto del agregado reutilizado en el desempeño mecánico del hormigón.

3.2.2 Agua de mezclado

Empleo agua apta para hormigón (sin contaminantes visibles ni contenido orgánico significativo) y la considero un insumo crítico, ya que su dosificación real debe corregirse según el estado de humedad y absorción de los agregados. Esta corrección es indispensable porque el agua efectiva controla la relación agua/cemento, la cual se vincula directamente con la resistencia a compresión y la trabajabilidad (ASTM International, 2025a).

3.2.3 Agregado fino natural

Utilizo agregado fino natural para aportar cohesión y mejorar la trabajabilidad en estado fresco. Su granulometría, contenido de finos y humedad superficial influyen en la consistencia, en la segregación y en la demanda de agua de la mezcla. Por esta razón, realizo su caracterización previa antes de definir la dosificación final del hormigón.

Figura 1

Recolección de muestras de agregados fino y grueso



Nota. Movimiento de agregados con maquinaria pesada.

3.2.4 Agregado grueso natural

Utilizo agregado grueso natural como esqueleto resistente principal. En la mezcla, este componente controla parte del volumen sólido, contribuye al módulo elástico, mejora la estabilidad dimensional y reduce la necesidad de pasta cementicia para alcanzar un volumen total de hormigón.

3.2.5 Agregado reutilizado de concreto (UCEM)

Utilizo el agregado reutilizado de concreto proveniente de UCEM como material experimental principal, debido a que permite analizar un enfoque de economía circular aplicado al sector construcción. La incorporación de este material busca determinar si puede emplearse en hormigón premezclado conservando un desempeño mecánico aceptable y reduciendo el impacto ambiental por disposición de escombros.

Figura 2

Selección de agregado reutilizado de concreto (UCEM)



Nota. Agregados localizados en la empresa ECEM

La evidencia técnica indica que el agregado reutilizado presenta variabilidad por su origen, contenido de mortero adherido, porosidad y absorción, factores que pueden modificar la demanda de agua y la resistencia final del hormigón (Federal Highway Administration, 2024).

3.3 Equipos, instrumentos y materiales de laboratorio

Para ejecutar la caracterización experimental utilizo instrumentos consistentes con procedimientos ASTM para agregados y hormigón. Entre los principales equipos se incluyen: balanza, horno de secado, tamices normalizados, bandejas metálicas, charolas, brochas, cuarteador mecánico para agregados, picnómetro y el conjunto molde–pisón para humedad superficial.

Figura 3

*Bandeja, Espátula y
brochas*



Figura 4

*Cuarteador mecánico
agregado grueso*



Figura 5

*Cuarteador mecánico
agregado fino*



Nota. Materiales de laboratorio

3.4 Muestreo de materiales para caracterización

3.4.1 Objetivo del muestreo

El objetivo del muestreo es obtener muestras representativas de agregados finos y gruesos (naturales y reutilizados) para ensayos de caracterización física. En el documento guía se indica que el muestreo permite: investigación preliminar de la fuente, control del producto y aceptación o rechazo del material (ASTM D75/D75M).

Esta práctica cubre el muestreo de los agregados gruesos y finos para los siguientes propósitos.

- Investigación preliminar de la fuente potencial del suministro
- Control del producto de la fuente
- Control de las operaciones del sitio de fuente y aceptación o rechazo de materiales

Figura 6

Recolección de muestras de agregados fino y grueso



Nota. Movimiento de agregados con maquinaria pesada.

De acuerdo con ASTM D75/D75M, el muestreo es tan importante como el ensayo, debido a que una muestra mal obtenida puede distorsionar los resultados del laboratorio e inducir conclusiones técnicas equivocadas (ASTM D75/D75M).

3.4.2 Técnica de reducción de muestra (cuarteo mecánico)

Para reducir el material de campo hasta el tamaño requerido para laboratorio aplico el cuarteo mecánico, porque mejora la representatividad y homogeneidad del material ensayado. El documento indica que el material obtenido debe ser mayor al requerido y reducirse con un cuarteador metálico adecuado, repitiendo el procedimiento hasta obtener una cantidad apropiada.

Este procedimiento coincide con el objetivo de ASTM C702/C702M, que busca reducir muestras grandes minimizando variaciones entre el lote y la muestra ensayada (ASTM International, 2018/2024).

3.5 Granulometría de agregados finos y gruesos

Se determino la distribución granulométrica de agregados finos y gruesos, debido a que la gradación controla la trabajabilidad, el porcentaje de vacíos, el consumo de pasta y el comportamiento mecánico del hormigón. El documento establece que el ensayo permite determinar la distribución granulométrica usando tamices normalizados y cuantificar porcentajes retenidos y pasantes.

El procedimiento se basa en ASTM C136/C136M, norma utilizada para establecer la gradación y comprobar si los agregados cumplen con especificaciones de uso en mezclas.

Tabla 3

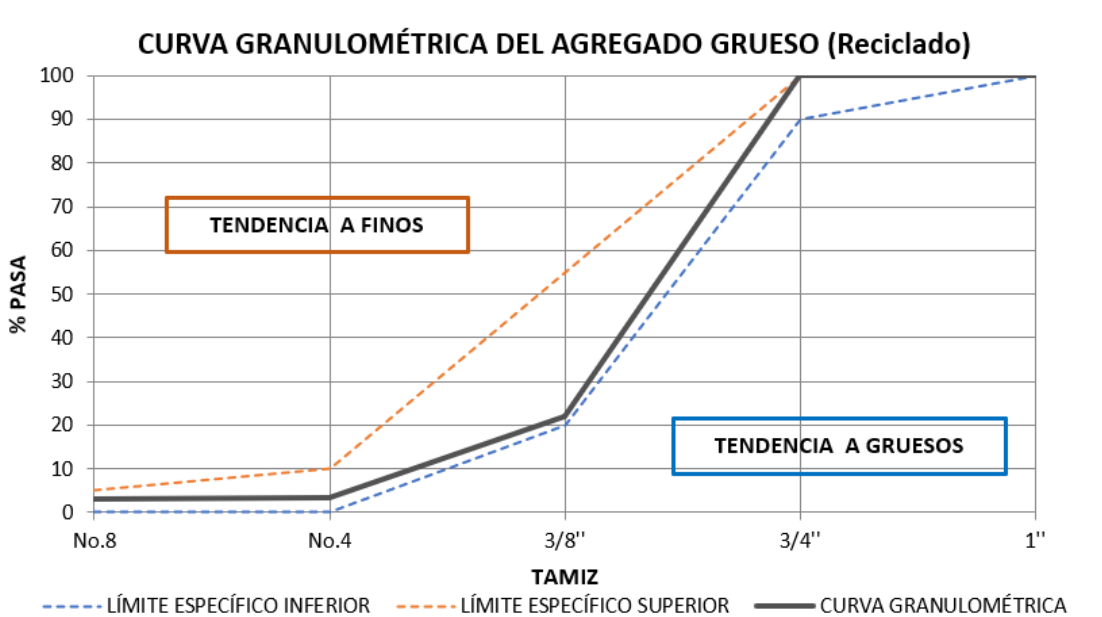
Granulometría agregado grueso (Reciclado)

Tamiz ASTM Abertura / N°.	RETENIDO		% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
	PARCIAL (g)	ACUMULADO (g)			
25, mm 1"	0	0	0,00	0,00	100,00
19, mm 3/4"	1066,2	1066,2	19,40	19,40	80,60
12,70 mm 1/2"	3848,7	4914,9	70,01	89,41	10,59
9,35 mm 3/8"	486,1	5401	8,84	98,25	1,75
4,75 mm No.4	42	5443	0,76	99,02	0,98
2,36 mm No.8	0,5	5443,5	0,01	99,03	0,97
	0,9	5444,4	0,02	99,04	0,96
BANDEJA	52,6	5497			
TOTAL	5497,0	M. FINURA		6,1	TNM

Fuente: Laboratorio UCEM

Figura 7

Curva granulométrica Agregado Grueso(Reciclado)



Fuente: Laboratorio UCEM

Tabla 4

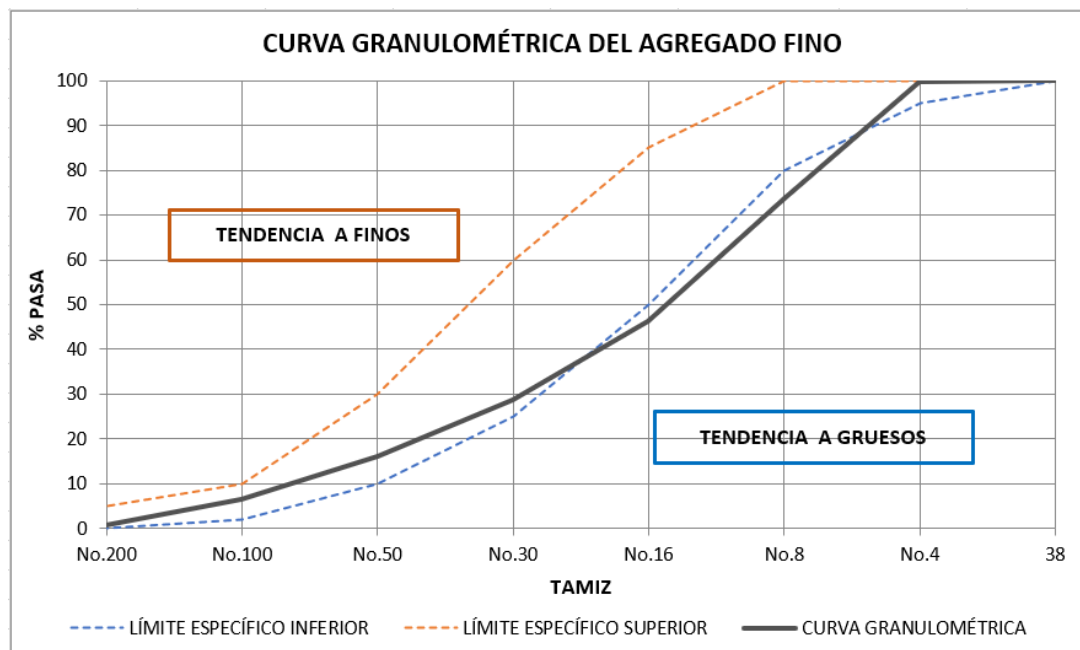
Granulometría agregado fino

Tamiz ASTM Abertura / N°	RETENIDO		% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
	PARCIAL (g)	ACUMULADO (g)			
3/8"	9,35 mm	0,0	0,00	0,00	100,00
No.4	4,75 mm	40,8	40,80	4,17	95,83
No.8	2,36 mm	221,4	262,20	22,61	73,23
No.16	1,18 mm	213,2	475,40	21,77	51,46
No.30	0,60 mm	179,4	654,80	18,32	33,14
No.50	0,30 mm	135,1	789,90	13,80	19,34
No.100	0,15 mm	103,5	893,40	10,57	8,77
No.200	0,075 mm	79,4	972,80	8,11	0,66
BANDEJA		6,5	979,3		
TOTAL		979,3	MÓDULO FINURA	3,18	

Fuente: Laboratorio UCEM

Figura 8

Curva granulométrica agregado fino

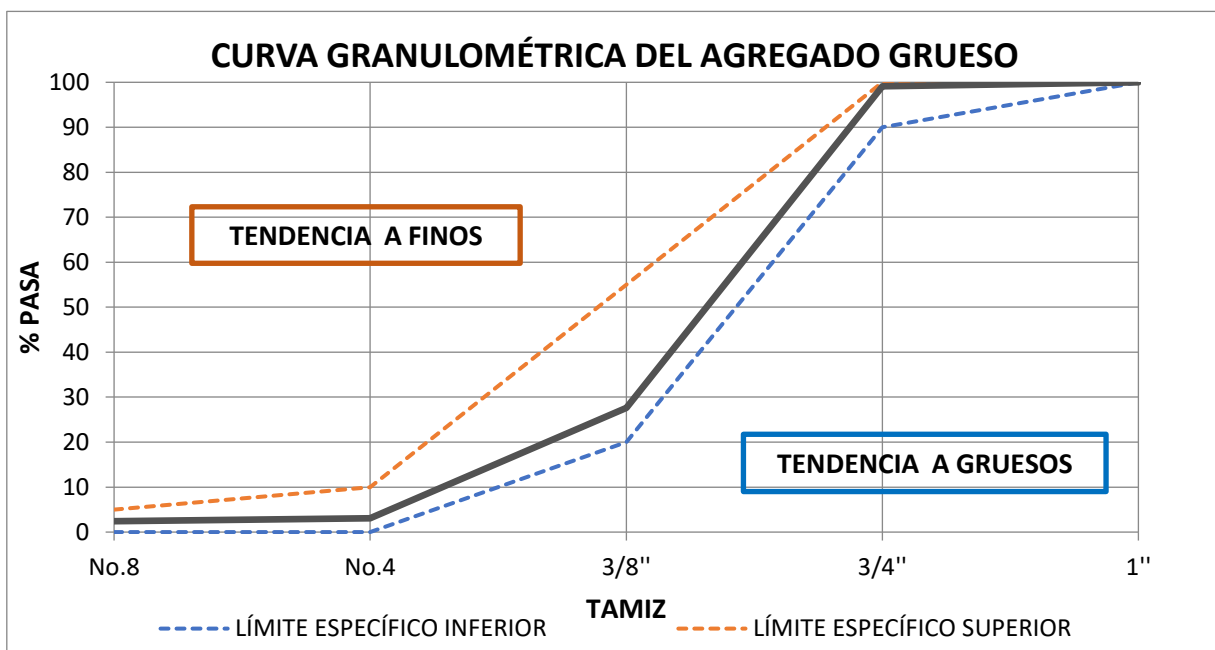


Fuente: Laboratorio UCEM

Granulometría agregado grueso (reciclado)

Tamiz ASTM Abertura / Nº.		RETENIDO		% RETENIDO	% PASA	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
		PARCIAL (g)	ACUMULADO (g)				
25,00 mm	1"	0	0	0,0	100,0	100	100
19,00 mm	3/4"	63	63	0,9	99,1	90	100
12,70 mm	1/2"	2280	2343	32,0	68,0	-	-
9,35 mm	3/8"	2953	5296	72,4	27,6	20	55
4,75 mm	No.4	1794	7090	96,9	3,1	0	10
2,36 mm	No.8	49	7139	97,6	2,4	0	5
		17	7156	97,8	2,2	-	-
						-	-
BANDEJA		160	7316				
TOTAL		7316,0	M. FINURA	5,0	TNM	3/4"	

Curva granulométrica agregado grueso (reciclado)



3.6 Contenido de finos (material que pasa tamiz N°200)

3.6.1 Importancia del ensayo

Se determinó el contenido de material fino (menor a $75\ \mu\text{m}$) porque influye en el agua requerida, en la demanda de cemento y en la adherencia de la pasta sobre el agregado. ASTM C117 indica que este ensayo cuantifica el material más fino que el tamiz N°200 mediante lavado, eliminando partículas dispersables por agua (ASTM Int

3.6.2 Procedimiento general

Se aplicó lavado controlado sobre el agregado, recolecto el material retenido después del lavado, y evaluó el porcentaje de pérdida respecto a la masa inicial. Este valor sirve como control de limpieza del agregado natural y, con mayor énfasis, del agregado reutilizado, donde puede existir polvo adherido o restos de mortero triturado.

Equipos a utilizar

Balanza (sensibilidad 0.1% de la masa de muestra a ensayar)

Tamiz No 200 y tamiz No 16

Recipiente para contener la muestra cubierta con agua y que permita agitar vigorosamente

Horno

Bandeja



3.7 Humedad del agregado y condición saturada superficialmente seca (SSD)

3.7.1 Humedad total del agregado

Este ensayo lo utilizo para determinar cuánta agua contiene el agregado en su estado real de almacenamiento. El documento guía indica el secado en horno a 105 ± 2 °C hasta masa constante, registrando masa inicial y masa seca final.

La norma ASTM C566 establece que la humedad total incluye tanto humedad superficial como humedad en poros, siempre que sea evaporable (ASTM International, 2025a).

Materiales o equipos a utilizar

<p>Balanza (sensibilidad 0.1% de la masa de muestra a ensayar)</p> <p>Horno</p> <p>Recipientes o bandejas</p> <p>Cucharon</p>	
---	---

Nota. Materiales de laboratorio

Ecuación empleada:

$$W\% = \frac{A - B}{B} \times 100$$

Donde:

W% = contenido de humedad natural (%)

A = masa de muestra original (g)

B = masa de muestra seca (g)

3.7.2 Humedad superficial del agregado

La humedad superficial es el agua que se encuentra sobre la superficie de las partículas y sí entra como agua libre en la mezcla, afectando directamente la relación agua/cemento efectivo. Por eso, no basta con conocer la humedad total; necesito diferenciar cuánto es agua y cuanto se encuentra dentro de los poros (absorción). Esta separación es determinante para corregir el agua de mezclado con precisión.

3.7.3 Importancia de la humedad superficial en la comparación experimental

En esta investigación, el control de la humedad del agregado no se limita a conocer la humedad total; el aspecto más determinante para el comportamiento del hormigón es identificar cuánta agua se encuentra libre en la superficie del agregado (humedad superficial) y cuánta corresponde a la absorción interna (agua retenida en poros). Esta diferencia es esencial porque la humedad superficial se incorpora inmediatamente a la mezcla y altera el agua efectiva, modificando la relación agua/cemento real.

Cuando no realizo esta corrección, la comparación experimental pierde confiabilidad. Si el agregado presenta un estado más húmedo que SSD, el exceso de agua aumenta el contenido efectivo en la mezcla y reduce la resistencia; por el contrario, si el agregado está más seco que SSD, absorbe agua durante el mezclado y disminuye trabajabilidad, lo cual afecta compactación y homogeneidad. Este fenómeno es coherente con el alcance del método de humedad total ASTM C566, que evalúa humedad evaporable tanto superficial como interna (ASTM International, 2019/2025). (astm.org)

Definición operativa de la condición saturada superficialmente seca (SSD)

Definición operativa de la condición saturada superficialmente seca (SSD)

3.7.4 Definición operativa de la condición saturada superficialmente seca (SSD)

Se definió la condición saturada superficialmente seca (SSD) como el estado en el que el agregado mantiene sus poros internos saturados, pero su superficie no presenta agua libre. En términos prácticos, considero el SSD como el estado de referencia más útil para el diseño, ya

que permite asumir que el agregado no aportará agua adicional a la mezcla ni absorberá agua desde la pasta cementante.

3.7.5 Determinación de SSD en agregado fino

Para identificar el estado SSD en agregado fino empleo el método físico del molde troncocónico con apisonado uniforme, el cual permite observar el comportamiento del agregado al retirar el molde. Bajo esta condición, la arena muestra un colapso característico (“desplome ligero”) cuando la humedad superficial ha desaparecido. Este procedimiento resulta especialmente importante cuando empleo agregados con mayor absorción, ya que la presencia de agua superficial puede ser difícil de percibir únicamente por inspección visual.

3.8 Gravedad Especifica Y Absorción De Agregado Fino

Se usa para determinar la gravedad específica saturada con superficie seca la gravedad específica aparente y la absorción del agregado fino estos valores generalmente se los requiere para cálculos relacionados con el hormigón

3.8.1 Materiales o equipos a utilizar

Balanza o báscula. Con una capacidad de 1 kg o más, sensibilidad a 0.1 g o menos y precisión de 0.1% de la carga de ensayo en algún punto con el rango de uso para este método de ensayo. Dentro de un rango de 100g de la carga de ensayo, una diferencia de lecturas será precisa con 0.1 g.

Picnómetro. (para usar con el procedimiento gravimétrico), un frasco u otro recipiente compatible en el cual la muestra de ensayo de agregado fino puede ser fácilmente introducida y en el cual el volumen contenido puede ser reproducido con 0.1 cm³.

El volumen del recipiente lleno a la marca será al menos 50% mayor que el espacio requerido para acomodar la muestra de ensayo.

Molde y pisón. El molde deberá ser metálico, con la forma de un cono truncado, con las dimensiones siguientes: 40,3 mm de diámetro interno en el borde superior, 90,3 mm de diámetro interno en la base y 75,3 mm de altura, con un espesor mínimo del metal de 0.8 mm.

El pisón deberá ser metálico con una masa de 340,15 g y una cara plana y circular de 25,3 mm de diámetro.

Horno de convección: Equipo utilizado para secar la muestra de agregado mediante circulación de aire caliente, asegurando un secado uniforme hasta alcanzar masa constante.

Cucharón o cuchara grande: Utensilio empleado para manipular, mezclar y trasladar el agregado durante el ensayo, minimizando pérdidas de material.

Bandeja metálica mediana: Recipiente resistente al calor donde se coloca la muestra para su secado y enfriamiento, facilitando el manejo y la estabilidad durante el pesaje.

Figura 9

Horno de Secado Agregado Fino



Fuente: Elaboración Propia

3.8.2 Preparación de la muestra de ensayo de Agregado Fino

Se procede al secado del espécimen de ensayo en un recipiente o vasija adecuada hasta alcanzar masa constante, manteniendo una temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Posteriormente, se deja enfriar

el material hasta una temperatura segura y estable para su manipulación, a fin de evitar variaciones de masa por convección o evaporación durante el proceso de pesaje.

Una vez estabilizada la muestra, se realiza la saturación cubriéndola completamente con agua, ya sea mediante inmersión directa o por adición controlada de agua, incorporando como mínimo un contenido equivalente al 6% de humedad respecto a la masa del agregado fino. A continuación, se permite el reposo en condiciones controladas durante (24 ± 4) horas, con el objetivo de favorecer la penetración del agua en los poros permeables y alcanzar un estado de humedad más uniforme (ver Figura 4).

Cabe señalar que, cuando los valores de absorción y densidad relativa (gravedad específica) se emplean en la dosificación de mezclas de concreto considerando que el agregado se utilizará en su condición de humedad natural, el secado inicial puede considerarse opcional. De manera similar, si las partículas del agregado han permanecido continuamente húmedas hasta el momento del ensayo, el periodo de reposo de (24 ± 4) horas también puede omitirse, siempre que se garantice que la muestra se encuentra en un estado de humedad representativo para el uso previsto.

Figura 10

Preparación de Agregado Fino



Fuente: Elaboración Propia

3.8.3 Ensayo para humedad superficial.

Durante el procedimiento, se fijó el molde de manera estable sobre una superficie plana, lisa y no absorbente, ubicándolo con el diámetro mayor en contacto con la base. Posteriormente, se colocó el agregado fino en condición parcialmente seca y suelta, llenando el molde hasta el rebose y formando un sobrellenado por encima del borde superior, el cual se mantuvo de forma momentánea para evitar pérdidas de material.

A continuación, se realizó una compactación ligera mediante la aplicación de 25 golpes con el pisón. Cada golpe se inició aproximadamente 5 mm por encima de la superficie del agregado, permitiendo la caída del pisón en caída libre bajo el efecto de la gravedad. Luego de cada impacto, se ajustó la altura inicial conforme a la nueva elevación de la superficie y se distribuyeron los golpes de manera uniforme para asegurar una compactación homogénea.

Concluida la compactación, se retiró el material suelto de la base y se levantó el molde en dirección vertical, evitando movimientos laterales. Se verificó que, si persistía humedad superficial, el agregado moldeado conservaba la forma del molde; en cambio, un desplome leve del material al retirar el molde se consideró el criterio técnico para identificar que el agregado alcanzó la condición saturada superficialmente seco (SSS), es decir, con poros permeables saturados y sin película de agua libre en la superficie de las partículas.

Figura 11

Procedimiento obtención humedad superficial



Fuente: Elaboración propia

3.8.3.1 Procedimiento

Paso 1. Se toma una muestra de 500g de masa de arena

Paso 2. Se determina la masa del matraz

Figura 12

Obtención de masa del matraz



Fuente: Elaboración Propia

Paso 3. Se introduce la muestra en las matras luego se llena el agua hasta alcanzar casi la marca de 500 cm³ a una temperatura de 23±2 grados

Figura 13

Mezcla de Agua y muestra de agregado fino en el matraz



Fuente: Elaboración Propia

Con el fin de eliminar las burbujas se hacen rodar las matras sobre si mismo en la superficie plana luego se coloca en un baño de temperatura constante a 23±2 grados.

Cuando se observa que ya no existen burbujas de aire se llena con agua hasta la marca de 500cm³ y se determina la masa del conjunto matras agua y muestra

Paso 4. Se saca el agregado fino de las matras y se seca la muestra en el horno a una temperatura uniforme de 105±2 grados.

Se determina la masa de la muestra en un intervalo de 2 horas cuando no existe variación de masa en la muestra durante los periodos consecutivos se saca la muestra del horno y se deja enfriar.

3.8.4 Resultados Obtenidos del Agregado Fino

A continuación, se presentan los resultados de la determinación del peso específico y la absorción del agregado fino, obtenidos conforme a la NTE INEN 0857 mediante el método del

picnómetro en condición saturada superficialmente seca (SSS). Con las masas registradas del picnómetro (vacío, con agregado SSS, con agregado SSS + agua y con 500 mL de agua), se calculó un volumen desalojado de 198,44 cm³, lo que permitió estimar un peso específico de 2 510,70 kg/m³.

Adicionalmente, la absorción se evaluó comparando la masa del agregado en estado SSS (500,00 g) respecto a la masa de la muestra seca (481,20 g), obteniéndose una absorción de 3,91%. Estos parámetros son fundamentales para la dosificación del hormigón, ya que la absorción influye directamente en la corrección del agua efectiva de mezcla y en el control de la humedad del agregado durante la preparación y el curado.

Tabla 5

Resultados de Peso específico y Absorción del agregado fino

PROCEDENCIA:	KM14	REALIZADO POR:	MIGUEL QUELAL	
1) PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO (NTE INEN 0857)				8/1/2026
$Vd = \frac{(P4 - P1) - (P3 - P2)}{\frac{(P4 - P1)}{500}}$	P1: Masa del Picnómetro vacío	196,6	g	P. Especifico: kg/m³
	P2: Masa del Picnómetro + Agregado fino SSS	696,6	g	
$P. esp. = \frac{(P2 - P1)}{Vd} \times 1000$	P3: Masa del Picnómetro + Agregado fino SSS + agua	997,5	g	2.519,70
	P4: Masa del Picnómetro + 500ml (agua)	695,5	g	
	Vd: Volumen desalojado	198,44	g	
2) ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO (NTE INEN 0857)				8/1/2026
$Abs. = \frac{(P1 - P2)}{P2} \times 100$	P1: Masa del agregado SSS	500,00	g	Absorción: %
	P2: Muestra Seca	481,20	g	3,91

Fuente: Elaboración Propia

3.8.5 Cálculo de humedad superficial

Para estimar la humedad superficial aplico la relación:

$$H_s (\%) = H_t (\%) - Abs(\%)$$

donde:

Hs = humedad superficial (%)

Ht = humedad total medida (%)

Abs = absorción (%)

Si $H_s > 0$, existe exceso de agua superficial (aportará agua libre).

Si $H_s < 0$, el agregado está por debajo del SSD (absorberá agua).

3.9 Determinación del valor de la degradación del árido grueso mediante el uso de la máquina de los ángeles.

El método de ensayo establecido por las normas la (NTE INEN 860, 2011) Y (ACI 318S-05) permite determina la abrasión de masa que tendrá el agregado logrando medir la calidad del mismo, forzando al agregado mediante un tambor giratorio (Máquina de los Ángeles), aplicando una carga que consiste en una cantidad de esferas tabla 5 establecidas por la graduación del agregado debiendo cumplir lo indicado en la tabla 6.

Tabla 6

Especificaciones para la carga

Graduación	Numero de Esferas	Masa de Carga (g)
A	12	5000±10
B	11	5000±10
C	8	5000±10
D	6	5000±10

Fuente: (NTE INEN 860, 2011)

Tabla 7

Graduación de las muestras de ensayo

TAMAÑO DEL CEDAZO		ASTM C 131				ASTM C 535		
Pasa	Retenido	A	B	C	D	1	2	3

3	2 1/2					2500±50		
2 1/2	2					2500±50		
2	1 1/2					5000±50	5000±50	
1 1/2	1	1250±25					5000±50	5000±50
1	3/4	1250±25						5000±50
3/4	1/2	1250±10	2500±10					
1/2	3/8	1250±10	2500±10					
3/8	1/4					2500±10		
1/4	Nº4					2500±10		
Nº4	Nº8							5000±10
TOTAL PESO, g		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±10	10000±75	10000±50
Nº DE ESFERAS		12	11	8	6	12	12	12
REVOLUCIONES			500				1000	

Fuente: (NTE INEN 860, 2011)

Tabla 8

Ensayo de los ángeles Agregado Grueso

LABORATORIO DE MECANICA DE ENSAYOS DEL HORMIGON								
NOMBRE DE LA CANTERA		CANTERA DE KM14 SEÑOR CHECA						
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA		ALOAG VIA SANTO DOMINGO KM14						
FECHA DE MUESTREO DEL AGREGADO		5/1/2026						
FECHA QUE SE REALIZO EL ENSAYO		8/1/2026						
TIPO DE MATERIAL		GRAVA 3/4						
ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ANGELES								
%		TIPO DE GRADACION B (gr)						
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2,500		
2 1/2"	2"					2,500		
2"	1 1/2"					5,000	5,000	
1 1/2"	1"	1,250					5,000	5,000
1"	3/4"	1,250						5,000
3/4"	1/2"	1,250	2,500					
1/2"	3/8"	1,250	2,500					
3/8"	1/4"			2,500				
1/4"	No 4			2,500				
No 4"	No 8				5,000			
ESFERAS		12	11	8	6	12	12	12
ROTACIONES		500	500	500	500	100	1000	1000
PESO TOTAL DE LA MUESTRA (gr.); (W1):		5000						
PESO RETENIDO EN EL TAMIZ Nº 12 (gr.); (W2):		3265						
PORCENTAJE (%) DE DESGASTE:		34.7						
$\% \text{ Desgaste} = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100$								

Fuente: Laboratorio de mecánica de ensayos del Hormigón UCEM

Tabla 9

Ensayo de los ángeles Agregado Grueso (Reciclado)

LABORATORIO DE MECANICA DE ENSAYOS DEL HORMIGON								
NOMBRE DE LA CANTERA			HORMIGONES HERCULES					
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA			PLANTA NORTE DE HORMIGONES HERCULES					
FECHA DE MUESTREO DEL AGREGADO			23/1/2026					
FECHA QUE SE REALIZO EL ENSAYO			24/1/2026					
TIPO DE MATERIAL			GRAVA 3/4 TRITURADO DE LOS ESCOMBROS DE HORMIGON					
ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ANGELES								
%		TIPO DE GRADACION (gr)						
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2,500		
2 1/2"	2"					2,500		
2"	1 1/2"					5,000	5,000	
1 1/2"	1"	1,250					5,000	5,000
1"	3/4"	1,250						5,000
3/4"	1/2"	1,250	2,500					
1/2"	3/8"	1,250	2,500					
3/8"	1/4"			2,500				
1/4"	No 4			2,500				
No 4"	No 8				5,000			
ESFERAS		12	11	8	6	12	12	12
ROTACIONES		500	500	500	500	100	1000	1000
PESO TOTAL DE LA MUESTRA (gr.); (W1):				5001				
PESO RETENIDO EN EL TAMIZ N° 12 (gr.); (W2):				2528				
PORCENTAJE (%) DE DESGASTE:				49,45011				
$\% \text{ Desgaste} = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100$								

Fuente: Laboratorio de mecánica de ensayos del Hormigón UCEM

3.10 Método De Ensayo Para Determinar El Peso Específico Y La Absorción Del Agregado Grueso

Este método según la Norma ASTM AASHTO - C 127-88 T 85, que determina la determinación de la densidad de una cantidad de partículas de agregado grueso no incluye el volumen de vacíos entre partículas, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregado grueso dependiendo el procedimiento usado la densidad en Kg/m³ o lb/ft³ se expres como seca al horno OD saturada superficialmente seca SSD o como densidad aparente igualmente la densidad relativa o gravedad específica.

Este método de ensayo no puede ser utilizado para agregados de peso ligero y la muestra debe ser sumergida en el agua por el lapso de 24+/-4 h para lograr la saturación de los poros del agregado



3.10.1 Equipos A Utilizar

Balanza con una sensibilidad de 0.05% de la masa de la muestra en cualquier punto de su rango de uso o 0.5gr el que sea mayor

Canastilla de suspensión formada por una malla de alambre de 3.35mm (No 6) o una cubeta de aproximadamente de igual anchura y altura con una capacidad de 4 a 7 litros para 37.5mm (1 ½ pulgadas) de tamaño máximo del agregado o menor y un contenedor grande para agregados de tamaño máximo mayor.

Tanque de agua hermético el cual es colocada la canastilla con la muestra mientras es suspendida bajo la balanza

Tamices de 4.752mm (No 4.) u otros que sean necesarios

Horno de tamaño apropiado capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 grados (230 ± 9 Fo).

Figura 14

Balanza y Canastilla



Fuente: Elaboración propia

Figura 15

Horno de secado de muestras



Fuente: Elaboración propia

3.10.2 Obtención de muestra

Para obtener la muestra de agregado de acuerdo con la Norma ASTM D75 mezclar la muestra del agregado y reducir a la cantidad necesaria aplicando la norma ASTM c702 rechazar todo el material pasante del tamiz 4.75mm (No4) cribado en seco lavado y removido el polvo o ortos recubrimientos de la superficie si el agregado grueso contiene una cantidad sustancial del material más fino que el tamiz 4.75mm semejante al tamaño No 8 y 9 en la clasificación D488 use el tamiz 2.36mm No8 el lugar del tamiz 4.75mm

La masa mínima de la muestra es determinada de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 10

Masa mínima a utilizar según la ASTM C127

TAMAÑO MAXIMO NOMINAL mm (pulg)	MASA MINIMA MUETRA DE PRUEVA Kg (lb)
12,5 (1/2) o menores	2 (4,4)
19,0 (3/4)	3 (6,6)
25,0 (1)	4 (8,8)
37,5 (1 1/2)	5 (11)
50 (2)	8 (18)
63 (2 1/2)	12 (26)
75 (3)	18(40)
90 (3 1/2)	25 (55)
100 (4)	40 (88)
125 (5)	75 (165)

Fuente: Adoptado de la Norma ASTM C127

3.10.3 Procedimiento del Ensayo

Paso 1. Secar la muestra de prueba hasta masa constante de una temperatura de 110+2 grados

Paso 2. Enfriar en un cuarto ventilado por un lapso de 1 a 3 horas para muestra de ensayo de tamaño máximo nominal 37.5mm (1 ½pulg) o mas grandes a una temperatura confortable para manejar el agregado

Paso 3. Seguidamente sumergir el agregado en agua por un lapso de 24+-4 horas

Figura 16

Agregado sumergido en agua



Fuente: Elaboración propia

Paso 4. Retirar la muestra de ensayo del agua y remover en una tela absorbente hasta que la película visible de agua sea removida de todas las partículas

Figura 17

Remisión de agua en tela absorbente



Fuente: Elaboración propia

Paso 5. Se determinará la masa de la muestra en el aire en su condición de SSS

Figura 18

Determinación de muestra de aire



Fuente: Elaboración propia

Paso 6. Colocar la muestra en la canastilla y determinar la masa aparente a 23 ± 2 grados en su estado SSS removiendo las partículas en el agua para que se escape el aire atrapado

Figura 19

Determinación de masa aparente



Fuente: Elaboración propia

Paso 7. Se procede a secar la muestra de ensayo hasta una masa constante a una temperatura de 110 ± 5 grados y enfriar a temperatura ambiente durante 1 a 3 horas.

Paso 8. Determinar la masa de la muestra seca con una precisión de 0.5gr

3.10.4 Trabajo de Gabinete: Obtención de Resultados

A partir del ensayo se obtendrán parámetros que describen el comportamiento del agregado frente al agua y su relación con el volumen real del material. En términos teóricos, se determinarán tres formas de densidad relativa: (i) la correspondiente a la condición seca al horno, que representa la relación entre la masa del sólido completamente seco y el volumen de partículas excluyendo vacíos permeables; (ii) la condición saturada superficialmente seca (SSS), que considera que los poros permeables están llenos de agua, pero sin película de agua libre en la superficie; y (iii) la densidad relativa aparente, asociada al volumen “aparente” del sólido, sin incluir los vacíos permeables. Complementariamente, se estimará el porcentaje de absorción, entendido como la capacidad del agregado de incorporar agua en sus poros permeables, expresada como incremento relativo de masa entre el estado seco y el estado SSS.

$$\text{Densidad relativa (seca al horno)} = \frac{A}{B-C}$$

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{B}{B-C}$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{A-C}$$

Donde:

A = masa de la muestra seca al horno gr

B = masa de la muestra en estado saturado superficial seco gr

C = masa aparente de la muestra sumergida en agua gr

De la misma forma se calcula el porcentaje de absorción

$$\text{Absorción\%} = \frac{B-A}{A} * 100$$

NOTA: Para calcular la únicamente la densidad se multiplica la densidad relativa por la densidad del agua a 23 grados

3.10.5 Resultados Obtenidos del Agregado Grueso

Se reportan los resultados de la densidad cercanos a 10kg/m³ o 0.5 lb/pie³ y la densidad relativa cercana al 0.01

Tabla 11

Resultados Peso Específico y Absorción de Agregado Grueso

PROCEDENCIA:	KM14	REALIZADO POR:	MIGUEL QUELAL	
1) PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO (NTE INEN 0857)				8/1/2026
$P. esp. = \frac{P1}{Vd} \times 1000$ $Vd = P1 - P2$	P1: Masa del agregado en SSS	5.400,00	g	P. Especifico: kg/m ³
	P2: Masa del agregado sumergido en agua	3.349,00	g	
	Vd: Volumen desalojado	2.051,00	g	2.632,86
2) ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (NTE INEN 0857)				8/1/2026
$Abs. = \frac{(P1 - P2)}{P2} \times 100$	P1: Masa del agregado SSS	5.400,00	g	Absorción: %
	P2: Muestra Seca	5.258,00	g	2,7

Fuente: Elaboración propia



4 CAPÍTULO IV – RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 Descripción general de la base experimental

En el presente capítulo se presentaron, analizaron e interpretaron los resultados obtenidos del programa experimental desarrollado para evaluar el comportamiento mecánico del hormigón premezclado elaborado con agregado grueso reciclado, en comparación con hormigones elaborados con agregados naturales. El análisis se centró principalmente en el desempeño del material a edades tempranas, considerando ensayos de resistencia a la compresión realizados a 1 y 3 días de curado.

Asimismo, se analizaron los parámetros iniciales del programa experimental, tales como la relación agua/cemento (a/c), el factor RF, la composición de los agregados y las propiedades del hormigón en estado fresco, incluyendo el asentamiento medido a 0, 30 y 90 minutos, el contenido de aire y la densidad. El estudio conjunto de estas variables permitió establecer relaciones entre el comportamiento reológico del hormigón y su desempeño mecánico temprano.

Finalmente, ante la ausencia de resultados experimentales a edades de control, se realizó una proyección de la resistencia a 7 y 28 días basada en relaciones empíricas comúnmente utilizadas para hormigones normales, con el fin de evaluar la viabilidad técnica del uso de agregados reciclados en aplicaciones estructurales.

4.2 Datos iniciales del programa experimental y caracterización de mezclas

En este subcapítulo se describen los parámetros iniciales que estructuraron el programa experimental y definieron las condiciones de elaboración de las mezclas de hormigón analizadas. Se incluyen variables fundamentales del diseño de mezcla, como la relación agua/cemento (a/c), la dosificación de los materiales, el porcentaje de sustitución del agregado grueso natural por agregado reutilizado y el factor de reemplazo (RF), así como las propiedades físicas de los agregados empleados.

Asimismo, se presentan las propiedades del hormigón en estado fresco —asentamiento, contenido de aire y densidad— evaluadas en diferentes momentos posteriores al mezclado. La sistematización de estos datos permite establecer una base técnica consistente para el análisis comparativo del desempeño entre el hormigón convencional y el hormigón con agregado reciclado, garantizando coherencia metodológica y validez en la interpretación de los resultados.

4.2.1 Parámetros de dosificación

Tabla 12

Parámetros Relación A/C y Factor RF

Mezcla	a/c	RF
UIO25000095 (R = 100 %)	0.60	0.58
UIO25000101 (R = 100 %)	0.60	0.58
UIO25000098 (R = 80 %)	0.60	0.58
UIO25000102 (R = 100 %)	0.60	0.58
UIO25000104 (R = 80 %)	0.60	0.58
UIO25000106 (R = 60 %)	0.61	0.58
UIO25000107 (R = 40 %)	0.61	0.58
UIO25000108 (R = 20 %)	0.61	0.58
UIO25000109 (R = 0 %)	0.61	0.58

Fuente: Elaboracion Propia

La relación agua/cemento se mantuvo prácticamente constante en todas las mezclas evaluadas, con valores comprendidos entre 0.60 y 0.61. Este control permitió garantizar condiciones hidráulicas comparables y reducir la influencia directa de este parámetro sobre los resultados de resistencia obtenidos. De igual manera, el factor RF permaneció constante durante todo el programa experimental, lo que permitió atribuir las diferencias observadas en el comportamiento del hormigón principalmente a la composición de los agregados utilizados.

4.2.2 Composición de agregados

En este apartado se detalla la conformación granulométrica de los agregados empleados en cada una de las mezclas que integran el programa experimental, especificando los porcentajes de agregado grueso natural, agregado grueso reciclado, agregado fino natural y agregado fino reciclado. La definición precisa de estas proporciones constituye un aspecto fundamental del diseño experimental, ya que el tipo y porcentaje de agregado influyen directamente en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón. En consecuencia, la variación controlada de la fracción gruesa permitió estructurar un esquema comparativo técnicamente consistente.

El programa contempló un rango progresivo de sustitución del agregado grueso natural por agregado reciclado, comprendido entre 0 % y 100 %, con el propósito de analizar de manera sistemática su incidencia en el desempeño del material. Asimismo, se mantuvo constante el uso de agregado fino 100 % natural en todas las dosificaciones, con el fin de aislar la variable de estudio y reducir posibles interferencias en la interpretación de los resultados. Esta estrategia metodológica fortalece la validez del análisis comparativo y permite atribuir los efectos observados principalmente al contenido de agregado grueso reciclado.

Tabla 13

Composición de agregados por mezcla

Mezcla	Grueso Nat (%)	Grueso Rec (%)	Fino Nat (%)	Fino Rec (%)
UIO25000095 (R = 100 %)	0	100	100	0
UIO25000101 (R = 100 %)	0	100	100	0
UIO25000098 (R = 80 %)	20	80	100	0
UIO25000102 (R = 100 %)	0	100	100	0
UIO25000104 (R = 80 %)	20	80	100	0
UIO25000106 (R = 60 %)	40	60	100	0
UIO25000107 (R = 40 %)	60	40	100	0

UIO25000108 (R = 20 %)	80	20	100	0
UIO25000109 (R = 0 %)	100	0	100	0

Fuente: Elaboracion Propia

El proceso experimental abarcó un rango amplio de sustitución del agregado grueso natural por agregado reciclado, desde 0 % hasta 100 %. Esta variación progresiva permitió evaluar de forma sistemática la influencia del agregado reciclado sobre el comportamiento del hormigón. La utilización de agregado fino 100 % natural en todas las mezclas redujo la complejidad del análisis y permitió atribuir los efectos observados principalmente al agregado grueso reciclado.

4.2.3 Propiedades del hormigón en estado fresco

Tabla 14

Asentamiento del hormigón en función del tiempo

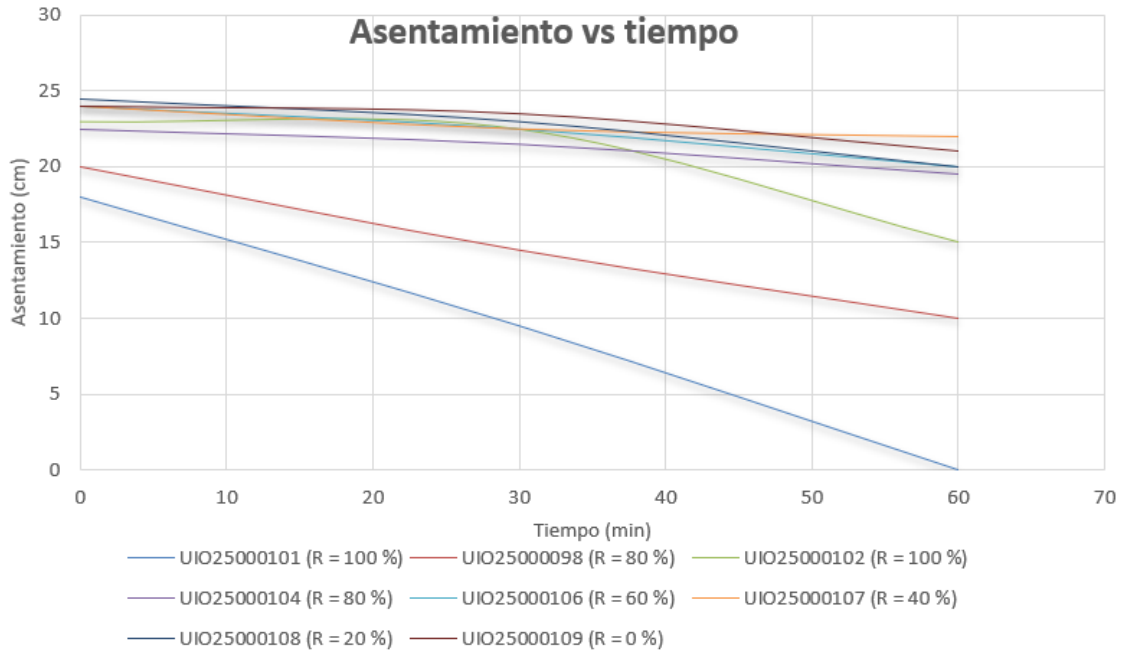
Mezcla	0 min	30 min	60 min	90 min
UIO25000101 (R = 100 %)	18.0	9.5	0	0
UIO25000098 (R = 80 %)	20.0	14.5	10.0	0
UIO25000102 (R = 100 %)	23.0	22.5	15.0	0
UIO25000104 (R = 80 %)	22.5	21.5	19.5	0
UIO25000106 (R = 60 %)	24.0	22.5	20.0	0
UIO25000107 (R = 40 %)	24.0	22.5	22.0	0
UIO25000108 (R = 20 %)	24.5	23.0	20.0	0
UIO25000109 (R = 0 %)	24.0	23.5	21.0	0

Fuente: Elaboracion Propia

Se observó que todas las mezclas presentaron asentamientos iniciales elevados (≥ 18 cm), lo cual indicó adecuada trabajabilidad inicial. Sin embargo, al analizar la pérdida de asentamiento entre 0 y 60 minutos se identificaron comportamientos diferenciados.

Figura 20

Variación del asentamiento con el tiempo



Fuente: Elaboracion Propia

4.2.3.1 Análisis cuantitativo profundo

Se calculó la pérdida relativa de asentamiento:

Para UIO25000101 (R = 100 %):

$$Perdida = \frac{18.0 - 9.5}{18.0} \times 100 = 47.20 \%$$

Para UIO2500098 (R = 80 %):

$$Perdida = \frac{20.0 - 10.0}{20.0} \times 100 = 50.00 \%$$

Para UIO25000109 (R = 0 %):

$$Perdida = \frac{24.0 - 21.0}{24.0} \times 100 = 12.50 \%$$

- La mezcla UIO25000101 (R = 100 %) presentó una reducción del 47.20 % en 30 minutos.
- La mezcla UIO25000098 (R = 80 %) presentó una reducción del 50.00 % en 60 minutos.
- Las mezclas con menor porcentaje reciclado mostraron reducciones menores y más estables, como la mezcla UIO25000109 (R = 0 %).

Este comportamiento confirmó que el agregado reciclado incrementó la demanda de agua efectiva debido a su mayor absorción y a la presencia de mortero adherido, lo que aceleró la pérdida de fluidez.

Desde el punto de vista constructivo, este resultado indicó que mezclas con alto porcentaje reciclado podrían requerir control más estricto en tiempos de colocación.

4.3 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión constituye el parámetro mecánico más representativo del desempeño estructural del hormigón. En esta investigación se evaluó la resistencia a edades tempranas con el fin de analizar el efecto inmediato del agregado grueso reciclado sobre el proceso inicial de hidratación y consolidación del sistema cementicio.

El análisis a 1 día permitió identificar la influencia directa del porcentaje de sustitución sobre el desarrollo temprano de resistencia, etapa en la cual el hormigón aún se encuentra en proceso de formación de su microestructura interna.

4.3.1 Resistencia a 1 día

Los resultados obtenidos mostraron que la resistencia a 1 día presentó variabilidad entre las mezclas, sin evidenciar una tendencia lineal directa respecto al porcentaje de sustitución del agregado reciclado.

El valor máximo se registró en la mezcla con 20 % de sustitución (9.50 MPa), mientras que el valor mínimo correspondió a la mezcla con 80 % reciclado (3.88 MPa). La mezcla convencional (0 % reciclado) alcanzó 6.70 MPa.

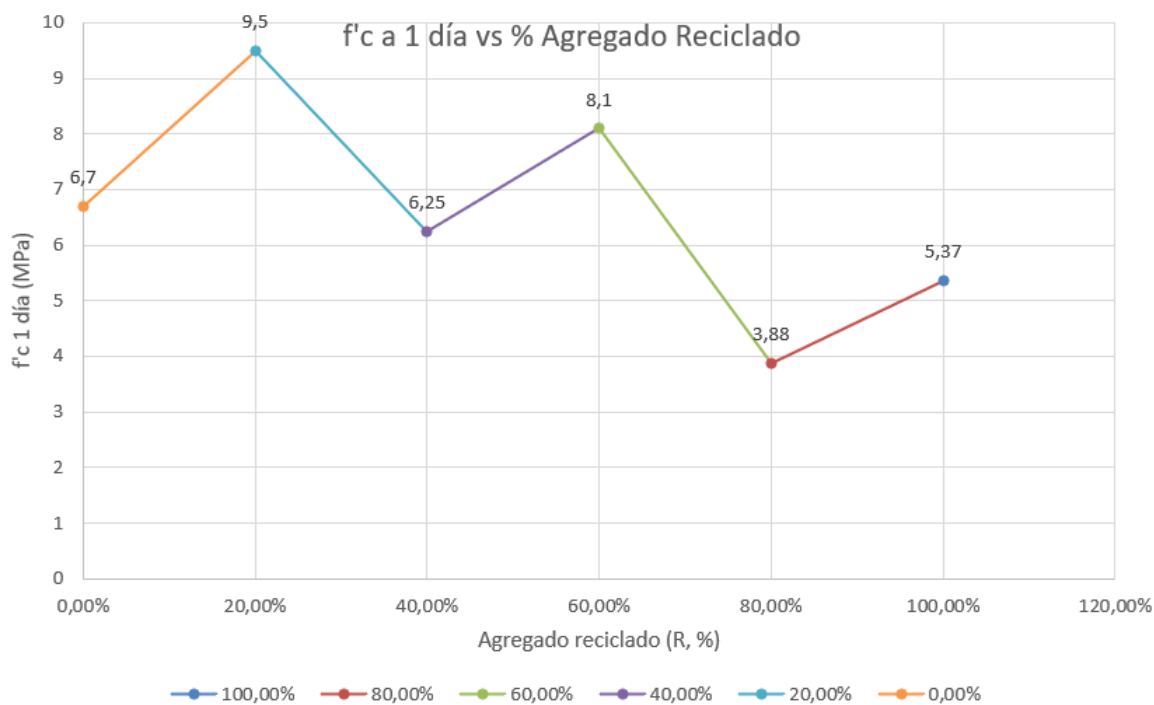
Este comportamiento indicó que el desarrollo inicial de resistencia no dependió exclusivamente del porcentaje reciclado, sino que estuvo influenciado por fenómenos asociados a la redistribución de agua y a la etapa inicial de hidratación del cemento.

Tabla 15

Resistencia a la compresión a 1 día

Mezcla	F'c 1 día (MPa)
UIO25000102 (R = 100 %)	5.37
UIO25000104 (R = 80 %)	3.88
UIO25000106 (R = 60 %)	8.10
UIO25000107 (R = 40 %)	6.25
UIO25000108 (R = 20 %)	9.50
UIO25000109 (R = 0 %)	6.70

Fuente: Elaboracion Propia



Fuente: Elaboracion Propia



4.3.1.1 Comparación extrema (0 % vs 100 % reciclado)

Con el fin de evaluar el impacto máximo del uso de agregado reciclado, se compararon los valores obtenidos para la mezcla convencional (R = 0 %) y la mezcla con sustitución total (R = 100 %).

- R = 0 % Tenemos $F'c$ (1 día) = 6.70 MPa
- R = 100 % Tenemos $F'c$ (1 día) = 5.37 MPa

La diferencia absoluta fue:

$$\Delta F'c = 6.67 - 5.37 = 1.33 \text{ MPa}$$

La reducción Relativa fue:

$$\frac{\Delta F'c}{F'c (1\text{dia})} \times 100 = \frac{1.33}{6.70} \times 100 = 19.85 \%$$

Durante las primeras horas de hidratación, parte del agua libre fue absorbida por el agregado reciclado, reduciendo temporalmente la disponibilidad de agua para la reacción cemento-agua. Este fenómeno provocó una disminución inicial en la velocidad de formación del gel C-S-H (silicato de calcio hidratado), lo que explicó la ligera reducción de resistencia observada en mezclas con alto porcentaje reciclado.

Sin embargo, este efecto fue principalmente hidráulico y transitorio, no estructural.

4.3.1.2 Evaluación de dispersión

El rango total de resistencias fue:

$$9.50 - 3.88 = 5.62 \text{ MPa}$$

La dispersión indicó que factores adicionales como compactación, distribución granulométrica y homogeneidad del mezclado también influyeron en el resultado temprano.

No se observó colapso mecánico ni pérdida progresiva sistemática asociada al incremento del porcentaje reciclado.

4.3.1.3 Análisis de la etapa a 1 día

Del análisis integral se concluyó que:

- No existió correlación lineal directa entre porcentaje reciclado y resistencia a 1 día.
- La reducción máxima respecto al hormigón convencional fue inferior al 20 %.
- El efecto negativo observado fue transitorio y asociado a absorción inicial de agua.
- No se evidenció degradación estructural crítica.
- El uso de 100 % de agregado reciclado no comprometió de forma significativa la resistencia temprana.

4.3.2 Resistencia a 3 días

La resistencia a la compresión a 3 días permitió evaluar el comportamiento mecánico del hormigón una vez superada la etapa inicial de fraguado. A esta edad, el material ya ha desarrollado una estructura interna más consolidada producto del avance de la hidratación del cemento, lo que reduce la influencia de los fenómenos iniciales asociados a la absorción de agua por parte del agregado reciclado.

Tabla 16

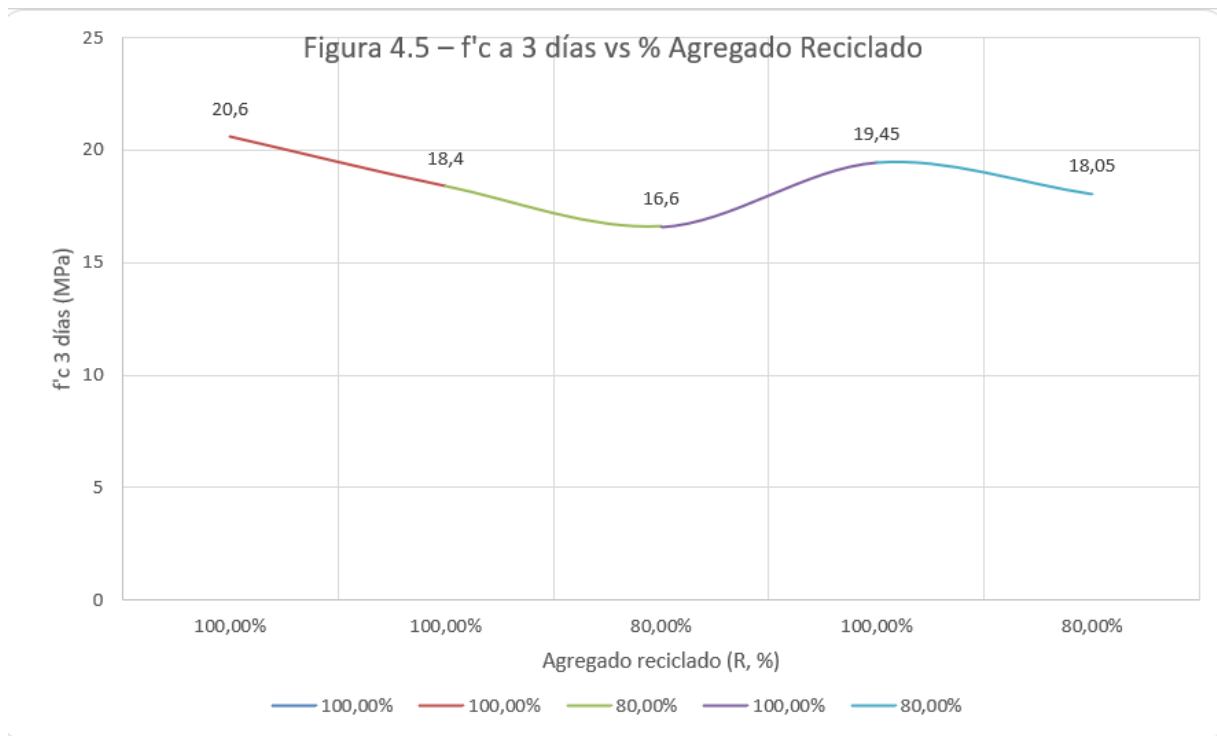
Resultados de Resistencia a la compresión a 3 días

Mezcla	F'c 3 días (MPa)
UIO25000095 (R = 100 %)	20.60
UIO25000101 (R = 100 %)	18.40
UIO25000098 (R = 80 %)	16.60
UIO25000102 (R = 100 %)	19.45
UIO25000104 (R = 80 %)	18.05

Fuente: Elaboracion Propia

Figura 21

Relación entre el porcentaje de agregado reciclado y la resistencia a la compresión a 3 días



Fuente: Elaboracion Propia

4.3.2.1 Análisis técnico

Los valores obtenidos oscilaron entre 16.60 MPa y 20.60 MPa, con un rango total de:

$$20.60 - 16.60 = 4.00 \text{ MPa}$$

Este rango indicó una variabilidad moderada y considerablemente menor que la observada a 1 día, lo que evidenció una estabilización progresiva del comportamiento mecánico.

4.3.2.2 Evolución desde 1 día

Para la mezcla UIO25000102 (R = 100 %), la resistencia aumentó de 5.37 MPa a 19.45 MPa, lo que representó una ganancia de:

$$\frac{19.45 - 5.37}{5.37} \times 100 = 262 \%$$

Este incremento confirmó que la reducción observada inicialmente no correspondió a una pérdida estructural permanente, sino a un ajuste temporal del sistema durante las primeras horas de hidratación. A los 3 días, la estructura interna del hormigón se encontraba más consolidada, permitiendo un desarrollo resistente estable.

Para la mezcla UIO25000104 (R = 80 %), la resistencia pasó de 3.88 MPa a 18.05 MPa, lo que representó una ganancia de:

$$\frac{18.05 - 3.88}{3.88} \times 100 = 365 \%$$

En este caso, aunque la resistencia inicial fue menor, el crecimiento posterior fue más pronunciado, evidenciando una recuperación mecánica eficiente conforme avanzó el proceso de hidratación.

4.3.2.3 Comparación entre 100 % y 80 % reciclado

La diferencia máxima entre una mezcla con 100 % reciclado y una con 80 % reciclado fue:

$$20.60 - 18.05 = 2.55 \text{ MPa}$$

En términos relativos:

$$\frac{2.55}{20.60} \times 100 = 12.38 \%$$

Desde el punto de vista estructural, esta diferencia no representa una pérdida crítica de capacidad resistente. No se evidenció una disminución progresiva asociada al incremento del porcentaje reciclado, sino variaciones propias del comportamiento experimental.

4.3.2.4 Interpretación general

A los 3 días, el hormigón presentó un desarrollo mecánico estable independientemente de que la sustitución del agregado grueso fuera del 80 % o del 100 %. La influencia negativa observada a 1 día fue compensada por el avance del proceso de hidratación, permitiendo que la resistencia aumentara de manera significativa.

No se identificó debilitamiento estructural ni comportamiento inestable en las mezclas con alto porcentaje de agregado reciclado.

Se demostró que tanto el 80 % como el 100 % de sustitución de agregado grueso reciclado resultaron técnicamente viables. Las diferencias observadas se mantuvieron dentro de rangos estructuralmente aceptables y no indicaron degradación mecánica progresiva.

La evolución entre 1 y 3 días confirmó que el efecto inicial asociado a la absorción de agua fue transitorio y no comprometió el desarrollo resistente del material.

4.4 Proyección teórica

Con el fin de estimar el comportamiento resistente del hormigón en edades posteriores al ensayo experimental, se realizó una proyección teórica a 7 y 28 días a partir de los valores reales obtenidos a 3 días. Esta metodología permitió evaluar la capacidad estructural potencial del material sin necesidad de esperar el ciclo completo de curado.

La relación empírica utilizada fue:

$$F_c(3 \text{ días}) = 0.40 F_c(28 \text{ días})$$

Despejando:

$$F_c(28 \text{ días}) = \frac{F_c(3 \text{ días})}{0.40}$$

Para la estimación intermedia es decir a 7 días se empleó la siguiente relación:

$$F_c(7 \text{ días}) = 0.65 F_c(28 \text{ días})$$

Estas relaciones son comúnmente utilizadas cuando el desarrollo de resistencia sigue un comportamiento normal de hidratación y permiten proyectar el desempeño estructural con base en datos tempranos.

Tabla 17

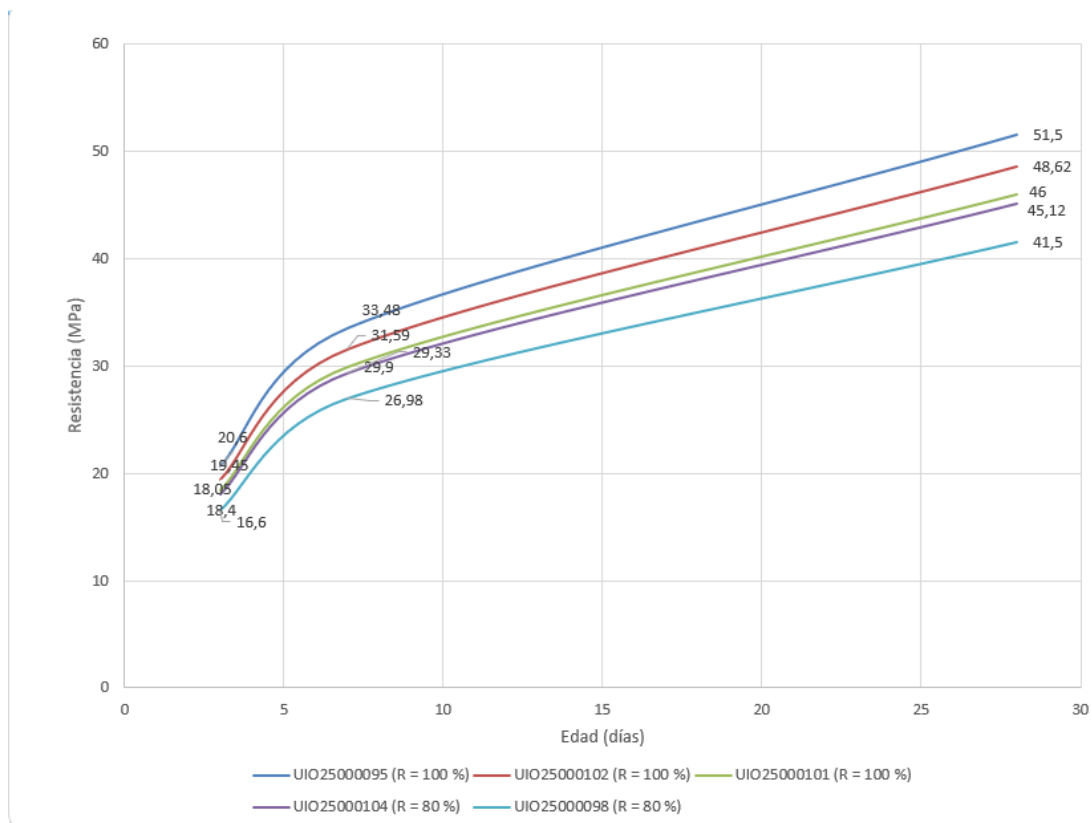
Proyección de resistencia a 7 y 28 días

Mezcla	Agregado Reciclado (%)	f'c 3 días (MPa)	f'c 7 días proyectada (MPa)	f'c 28 días proyectada (MPa)
UIO25000095 (R = 100 %)	100	20.60	33.48	51.50
UIO25000102 (R = 100 %)	100	19.45	31.59	48.62
UIO25000101 (R = 100 %)	100	18.40	29.90	46.00
UIO25000104 (R = 80 %)	80	18.05	29.33	45.12
UIO25000098 (R = 80 %)	80	16.60	26.98	41.50

Fuente: Elaboracion Propia

Figura 22

Evolución de resistencia para mezclas con mayores resistencias a 3 días, incorporando proyecciones a 7 y 28 días



Fuente: Elaboracion Propia

4.4.1 Rango de valores de Resistencias proyectadas

Las resistencias estimadas a 28 días oscilaron entre 41.50 MPa y 51.50 MPa, lo que representa un rango total de:

$$51.50 - 41.50 = 10.00 \text{ MPa}$$

Este intervalo se ubica completamente dentro de hormigones de resistencia media–alta para aplicaciones estructurales convencionales.

Incluso el valor mínimo proyectado (41.50 MPa) supera ampliamente los requisitos habituales de diseño estructural (21–28 MPa), lo cual indica una capacidad resistente adecuada.

De manera complementaria, las resistencias proyectadas a 7 días oscilaron entre 26.98 MPa y 33.48 MPa, con un rango de:

$$33.48 - 26.98 = 6.50 \text{ MPa}$$

Estos valores indican que el material alcanza un nivel estructural funcional en etapa intermedia de curado, permitiendo continuidad constructiva bajo condiciones controladas.

Comparación entre 100 % y 80 % reciclado

A 28 días:

- Valor máximo (100 %) Tenemos= 51.50 MPa
- Valor mínimo (80 %) Tenemos= 41.50 MPa

Diferencia relativa:

$$\frac{10}{51.50} \times 100 = 19.41 \%$$

A 7 días:

Valor máximo (100 %) Tenemos= 33.48 MPa

Valor mínimo (80 %) Tenemos= 26.98 MPa



Diferencia relativa:

$$\frac{6.50}{33.48} \times 100 = 19.42 \%$$

La proporcionalidad entre ambas diferencias confirma coherencia en el desarrollo resistente proyectado. No se evidenció amplificación del efecto del porcentaje reciclado con el tiempo.

No se observó una tendencia decreciente progresiva conforme aumentó el porcentaje reciclado, lo cual indica que el agregado reciclado no generó debilitamiento estructural sistemático.

4.4.2 Coherencia con el comportamiento experimental

La evolución significativa observada entre 1 y 3 días fue coherente con las resistencias proyectadas a 7 y 28 días. El crecimiento temprano elevado permitió proyectar un comportamiento estructural estable en edades posteriores.

Si el agregado reciclado hubiese afectado críticamente el sistema resistente, se esperaría:

- Proyección final reducida.
- Disminución progresiva con mayor sustitución.
- Inestabilidad en la etapa intermedia.

Ninguna de estas condiciones se presentó en los resultados obtenidos.

4.4.3 Evaluación estructural integral

Desde el punto de vista de diseño estructural:

- Todas las mezclas superaron 40 MPa proyectados a 28 días.
- No se identificó pérdida de capacidad portante.
- No se evidenció degradación progresiva asociada al incremento del porcentaje reciclado.
- El comportamiento fue estructuralmente coherente en todas las etapas proyectadas.

4.5 Análisis final de los resultados obtenidos

La proyección teórica a 7 y 28 días confirmó que el uso de agregado grueso reciclado, incluso en proporciones del 100 %, no compromete la capacidad resistente estimada del hormigón.

Las resistencias proyectadas se mantuvieron dentro de rangos estructuralmente adecuados tanto en etapa intermedia como final, evidenciando estabilidad mecánica y viabilidad técnica del material.

En consecuencia, el comportamiento estructural proyectado respalda el uso de agregados reciclados en altas proporciones bajo condiciones controladas de dosificación y ejecución.

4.6 Criterios técnicos adoptados para la clasificación

Con el fin de establecer una evaluación objetiva, se definieron los siguientes parámetros de desempeño:

$$\text{Resistencia a 3 días} \geq 18 \text{ MPa}$$

Este valor se consideró indicador de desarrollo mecánico adecuado en etapa temprana, garantizando que la mezcla no presentara retrasos críticos en hidratación.

$$\text{Resistencia proyectada a 28 días} \geq 45 \text{ MPa}$$

Este umbral permitió asegurar que la mezcla alcanzaría resistencia estructural suficiente para aplicaciones convencionales de hormigón estructural.

4.6.1 Comportamiento reológico controlable

Aunque las mezclas con alto contenido reciclado presentaron mayor pérdida de asentamiento, se evaluó que esta pérdida no impidiera su aplicación bajo control de tiempos de colocación.

Estos criterios permitieron integrar desempeño mecánico y viabilidad constructiva.

Tabla 18

Clasificación técnica final

Mezcla	Agregado Reciclado (%)	f'c 3 días (MPa)	f'c 28 días proyectada (MPa)	Pérdida asentamiento	Clasificación
UIO25000095	100	20.60	51.50	Moderada	Óptima
UIO25000102	100	19.45	48.62	Alta	Óptima



UIO25000101	100	18.40	46.00	Alta	Óptima
UIO25000104	80	18.05	45.12	Controlable	Óptima
UIO25000098	80	16.60	41.50	Alta	Aceptable

Fuente: Elaboracion Propia

4.6.2 Mezclas Óptimas

Las mezclas con 100 % y 80 % de agregado reciclado cumplieron con los requisitos estructurales proyectados y mostraron comportamiento mecánico estable a 3 días.

Particularmente:

- UIO25000095 (R = 100 %) presentó la mayor resistencia proyectada.
- UIO25000102 (R = 100 %) mostró adecuada estabilidad mecánica.
- UIO25000104 (R = 80 %) combinó resistencia adecuada con mejor control de trabajabilidad.

Estas mezclas validaron técnicamente el uso de agregado reciclado incluso en sustituciones totales.

4.6.3 Mezclas dentro del margen aceptable

Las mezclas con 60 %, 40 % y 20 % de sustitución presentaron comportamiento reológico más estable y resistencias iniciales adecuadas. Aunque no se proyectaron formalmente a 28 días, su desempeño a 1 día indicó desarrollo mecánico satisfactorio.

Estas mezclas pueden considerarse seguras para aplicaciones estructurales convencionales bajo control normal de obra.

4.6.4 Validación del uso de agregado reciclado

El estudio demostró que:

- No existió reducción crítica de resistencia al aumentar el porcentaje reciclado.
- El principal efecto fue reológico (pérdida de trabajabilidad).
- El comportamiento mecánico a 3 días fue estable incluso con 100 % reciclado.



- La proyección estructural superó los 40 MPa en todos los casos evaluados.

Por lo tanto:

- El uso de agregado grueso reciclado es técnicamente viable.
- Puede emplearse hasta en 100 % de sustitución bajo control adecuado de trabajabilidad.
- No compromete la resistencia estructural proyectada.



5 CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

A partir del análisis de las dosificaciones, el comportamiento en estado fresco y los resultados de resistencia a compresión a edades tempranas, se establecieron las conclusiones siguientes:

Se controló adecuadamente la variable de dosificación (a/c). La relación agua/cemento se mantuvo prácticamente constante (0.60–0.61) entre mezclas, por lo que las variaciones de desempeño observadas se atribuyeron principalmente al efecto del agregado reciclado y no a cambios en la dosificación.

La sustitución se concentró en el agregado grueso reciclado. Las tablas evidenciaron que el agregado fino reciclado no se incorporó (0%), mientras que el agregado grueso reciclado se evaluó en rangos entre 0% y 100%, lo que permitió analizar escenarios progresivos de reemplazo.

El efecto más sensible del agregado reciclado se manifestó en la trabajabilidad. El asentamiento disminuyó con el tiempo en todas las mezclas, pero el descenso fue más crítico en mezclas con altos porcentajes de agregado reciclado, lo que indicó mayor demanda de agua efectiva asociada a la absorción y textura del material reciclado. En términos constructivos, este hallazgo confirmó que el control del tiempo de colocación y el manejo de consistencia resultaron determinantes.

La resistencia a 1 día presentó variabilidad y no mostró una tendencia lineal directa con el porcentaje reciclado. Los resultados tempranos reflejaron dispersión entre mezclas, lo cual fue consistente con el comportamiento típico de edades iniciales, donde la hidratación aún se encontraba en etapa acelerada y el efecto de absorción del agregado reciclado podía alterar la disponibilidad de agua en la pasta.

A los 3 días se observó estabilidad mecánica y desempeño competitivo en mezclas con alto contenido reciclado. Las mezclas con 100% de agregado reciclado alcanzaron resistencias a 3 días dentro del rango superior de los resultados disponibles, demostrando que la sustitución total del agregado grueso natural no implicó una pérdida crítica de desempeño a edades tempranas.



La proyección a 7 y 28 días indicó viabilidad estructural para mezclas seleccionadas. Con base en la proyección aplicada a partir de f^c a 3 días, varias mezclas superaron niveles de resistencia proyectada asociados a aplicaciones estructurales convencionales. Sin embargo, se dejó establecido que dichas resistencias a 7 y 28 días correspondieron a una estimación y no a ensayos directos.

Se identificaron mezclas óptimas que validaron el uso de agregado reciclado en alta proporción. La clasificación final del capítulo evidenció cuatro mezclas óptimas:

- UIO25000095 (R = 100%)
- UIO25000102 (R = 100%)
- UIO25000104 (R = 80%)

Estas mezclas combinaron resistencia temprana adecuada, proyección estructural alta y un comportamiento reológico considerado controlable mediante manejo operativo.

Se concluyó que el uso de agregado grueso reciclado fue técnicamente viable. En función de los resultados y de la clasificación final, se determinó que el agregado reciclado pudo emplearse incluso al 100% en mezclas específicas sin comprometer el desempeño mecánico proyectado, siempre que se adopten medidas de control de trabajabilidad.

5.2 Recomendaciones

En función de los resultados obtenidos, se plantearon las siguientes recomendaciones para aplicación en obra y para fortalecer la validez técnica del uso de agregados reciclados:

Controlar la trabajabilidad como variable crítica. Se recomendó planificar el transporte, descarga y colocación reduciendo tiempos muertos, especialmente para mezclas con alto porcentaje reciclado, debido a su mayor tendencia a pérdida de asentamiento.

Ajustar el manejo del agua y condición del agregado reciclado. Para mejorar consistencia y reducir pérdida de asentamiento, se recomendó controlar la humedad del agregado reciclado (idealmente en condición controlada) y evitar variaciones no previstas durante el mezclado.



Considerar el uso de aditivos reductores de agua o superplastificantes. Para mantener trabajabilidad sin aumentar a/c, se recomendó evaluar el uso de aditivos, especialmente cuando se empleen porcentajes altos de agregado reciclado.

Confirmar experimentalmente resistencias a 7 y 28 días. Dado que en este estudio la resistencia a 7 y 28 días se obtuvo por proyección, se recomendó realizar ensayos directos para validar la curva real de ganancia de resistencia.

Incorporar ensayos de durabilidad para una evaluación completa. Se recomendó complementar con absorción, permeabilidad, ataque por sulfatos, carbonatación y cloruros, ya que la viabilidad estructural no depende solo de resistencia sino también de desempeño a largo plazo.

Mantener trazabilidad y estandarización del material reciclado. Se recomendó exigir control de procedencia, granulometría, absorción y densidad del agregado reciclado, debido a que su variabilidad puede afectar trabajabilidad y resistencia.



6 Bibliografía

Acimco. (2024). *Tornillo para fibrocemento con aleta [Fotografía]*. Obtenido de Acimco: <https://www.acimco.com/product/tornillo-fibrocemento-aleta/>

American Concrete Institute. (2019). *ACI Manual of Concrete Practice*. American Concrete Institute.

Archiexpo. (s.f). *Barrera de vapor [Fotografía]*. Obtenido de Archiexpo: <https://www.archiexpo.es/prod/monier-braas/product-56965-279958.html>

ASTM International. (2014). *ASTM C94/C94M: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete*. ASTM International.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2021). *Gestión de residuos de construcción y demolición en América Latina*. BID.

Barbieri. (s.f). *Tornillo T1 Punta Mecha*. Obtenido de Barbieri: <https://www.adbarbieri.com/blog/tipos-de-tornillos-para-steel-frame>

Brito Peña, R., Villa Enderica, D., & Zalamea León, E. (01 de 07 de 2022). *Universidad Politécnica Salesiana*. Recuperado el 31 de 01 de 2025, de Universidad Politécnica Salesiana: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23020/1/ings_n28_Brito-Pe%
c3%b1a_Villa-Enderica_Zalamea-Le%
c3%b3n.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23020/1/ings_n28_Brito-Pe%c3%b1a_Villa-Enderica_Zalamea-Le%c3%b3n.pdf)

Centro auditivo Estaire. (s.f). *Los Niveles de Decibelios en las Acciones Cotidianas*. Obtenido de Estaire Audio: <https://centroauditivoestaire.com/blog/salud/niveles-de-decibelios.php#:~:text=Entre%2030%20y%2055%20decibelios&text=En%20cualquier%20caso%2C%20la%20Organizaci%C3%B3n,recomienda%20sobrepasar%20los%2055%20decibelios.>

Concrete. (s.f). *American Concrete Institute*. Obtenido de Concrete: <https://www.concrete.org/>



- Construcción en seco. (Sf de Sf de 2024). *Construcción en seco*. Obtenido de Construcción en seco: <https://construccionenseco.net/steel-frame/>
- Construrama Colombia. (2025). *Placa de fibrocemento 10mm [Fotografía]*. Obtenido de Construrama Colombia: <https://www.construramacolombia.com/catalogo/materiales-de-construccion/cubiertas-y-tejas/placa-fibrocemento-10mm/p/100002648>
- González Jara, R. (2023). *Comparación técnico constructiva entre el sistema tradicional versus el sistema steel framing en viviendas en Quito*. Obtenido de González Jara, René;: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglcfindmkaj/<https://repositorio.uti.edu.ec/bitstream/123456789/6249/1/GONZALEZ%20JARA%20RENE%20EDUARDO.pdf>
- Jagadesh, P., Tam, V. W., & Xie, J. (2024). Performance of recycled concrete aggregates in structural applications. *Journal of Construction Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.112130
- Joyal. (2010). *Trituradora con motor diésel*. Obtenido de <http://www.joyalchina.com/es/pro/Crushing/Diesel-Engine-Crusher.html>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2016). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Portland Cement Association.
- Kubiec. (s.f). *Placa de yeso Gyplac estandar [Fotografía]*. Obtenido de Kubiec: <https://kubiec.com/placa-de-yeso-gyplac-estandar/>
- La nota en línea. (04 de 04 de 2023). *El mejor sistema de construcción sismo resistente es Steel Framing [Fotografía]*. Obtenido de La nota en línea: <https://lanotaenlinea.com/el-mejor-sistema-de-construccion-sismo-resistente-es-steel-framing/>
- Li, Y., Zhu, H., & Tam, V. (2025). Performance and microstructural characteristics of recycled aggregate concrete with pre-treated coarse aggregates. *Cement and Concrete Research*. doi:10.1016/j.cemconres.2025.107543

- Lituo. (SF). *Tornillo para Volcanita/Drywall con Punta Broca Fosfato Negro [Fotografía]*.
Obtenido de Lituo: <https://www.tornillolituo.com/product/tornillo-para-volcanita-con-punta-broca-fosfato-negro/>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
- Metalhiero. (2021). *Bloque de hormigón [fotografía]*. Obtenido de Metalhiero: <https://metalhiero.com/producto/236-bloque-de-hormigon>
- Mindess, S. (2019). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI). (2023). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Sección Estructural – Hormigón (NEC-SE-HM)*. MIDUVI.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). (2022). *Reglamento de gestión ambiental para residuos de construcción y demolición*. Gobierno del Ecuador.
- Moro, J. (2017). *Acústica Arquitectónica: Principios y Aplicaciones*. Obtenido de MORO J.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology*. Pearson.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (s.f). *El nuevo Ecuador*. Recuperado el 31 de 01 de 2025|, de Norma Ecuatoriana de la Construcción: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- Pacheco-Torgal, F., & Tam, V. W. (2014). *Eco-efficient construction and building materials*. Woodhead Publishing.
- Pérez, M., López, R., & Martínez, A. (2020). *Evaluación de sistemas constructivos: steel framing vs. métodos tradicionales*. Obtenido de Pérez, M.; López, R.; Martínez, A.;

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2022). *Circularity in the Built Environment*. UNEP.

Stalart. (2024). *ISO 9001: Gestión de Calidad*. Obtenido de Stalart: <https://stalart.es/certificados-stalart-la-garantia-de-seguridad-y-calidad-en-la-construccion-steel-frame/#:~:text=%F0%9F%91%89%20ISO%209001:%20Gesti%C3%B3n%20de,en%20cada%20proyecto%20que%20emprendemos>.

Steel. (2025). *American Iron and Steel Institute*. Obtenido de Steel: <https://www.steel.org/>

Tam, V., Le, K., & Li, W. (2016). Recycled aggregates in concrete: Properties and performance. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.078

Via Célere. (27 de 06 de 2019). *Via Célere*. Obtenido de Via Célere: <https://www.viacelere.com/blog/que-es-el-aislamiento-acustico/#:~:text=E1%20aislamiento%20ac%C3%A1stico%20es%20un,que%20tampoco%20salga%20de%20%C3%A9>.

World Green Building Council. (2023). *Bringing embodied carbon upfront*. Obtenido de <https://www.worldgbc.org>