UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

“Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino”

Trabajo de Titulación, Modalidad trabajo experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato

Autor: María José Espinoza Castro

Tutor: Ing. Carlos Patricio Navarro Peñaherrera, Mg.

Ambato – Ecuador

Julio 2025

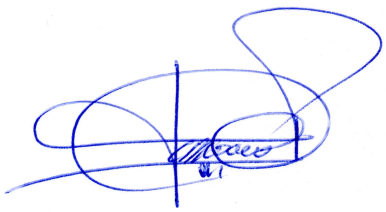
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, con el tema: **"ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN SIMPLE CON AGREGADO GRUESO RECICLADO Y CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO EN REEMPLAZO DEL AGREGADO FINO",** elaborado por la estudiante, María José Espinoza Castro, portadora de la cédula de ciudadanía número 1804710471, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, julio 2025



.....

Ing. Carlos Patricio Navarro Peñaherrera, Mg.

C.C. 1802163038

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **María José Espinoza Castro**, con C.C. 1804710471 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente trabajo experimental con el tema: **"ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN SIMPLE CON AGREGADO GRUESO RECICLADO Y CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO EN REEMPLAZO DEL AGREGADO FINO",** así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, julio 2025



.....

María José Espinoza Castro

C.C. 1804710471

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, julio 2025



.....

María José Espinoza Castro

C.C. 1804710471

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por la estudiante **María José Espinoza Castro**, de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **"ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN SIMPLE CON AGREGADO GRUESO RECICLADO Y CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO EN REEMPLAZO DEL AGREGADO FINO".**

Ambato, julio 2025

Para constancia firma:

.....	.....
Ing. Lourdes Gabriela Peñafiel Valla, Mg.	Ing. Galo Wilfrido Núñez Aldás, Mg.
C.C. 1804420220	C.C. 1802229227
MIEMBRO CALIFICADOR	**MIEMBRO CALIFICADOR**

DEDICATORIA

A mis padres,
por su ejemplo de esfuerzo,
dedicación y valores,
perseverancia y compromiso,
pilares fundamentales en la culminación
de este logro académico.

AGRADECIMIENTO

La culminación de esta tesis representa no solo el cierre de una etapa académica, sino también el resultado de un camino lleno de aprendizajes, desafíos y crecimiento personal. En este trayecto no he estado sola, y es por ello por lo que deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de distintas maneras, han contribuido significativamente a que hoy pueda alcanzar esta meta.

En primer lugar, deseo agradecer a mis padres *Marco y Mónica*, pilares fundamentales de mi vida. Gracias por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia. A mi familia, *Patita, Luchito, Luci, Pipis, Ceci, Pepe, Narci, Irma, Julia, Corita (+), Esthercita (+), Ale* por estar conmigo desde que tengo memoria compartiéndome siempre consejos y enseñanzas.

A *Taquito*, mi leal perrito, por acompañarme en las largas noches de estudio con su silenciosa pero constante presencia. A *Bebé*, el gato más encantador, por robarme el corazón desde la primera foto que vi de ti. Gracias por dejarme quererte como si fueras mío y por hacerme sonreír incluso a la distancia.

A *David*, compañero incondicional durante este proceso, gracias por tu paciencia, tu cariño y tu apoyo constante. Gracias por caminar a mi lado con generosidad, por celebrar cada pequeño logro con entusiasmo sincero, y por ofrecerme tu fortaleza cuando la mía flaqueaba.

A mis amigos, *Alison, Emilia, Michelle, Hon, Mau, Davis, Christian, Anderson, Rubén, Karen, Ronnal, Vane y a mi grupito de curso* quienes han sabido acompañarme con paciencia, comprensión y alegría. Gracias por estar presentes, por escucharme, por alentarme y por recordarme la importancia de equilibrar las responsabilidades con momentos de descanso y risa. Cada palabra de aliento, cada conversación, ha sido un respiro que me permitió seguir avanzando.

A mis docentes de escuela, colegio y universidad *Fernando Mendoza, Javier Barrionuevo, Blanquita Pérez (+), Duly Reyes, Carmita Mesías, Susana Panimboza, Marisol Bayas, Santiago Medina, Carlos Navarro, Maritza Ureña y Jorge Guevara* quienes han dejado huella a lo largo de mi formación académica. Agradezco profundamente sus enseñanzas, su orientación y su compromiso con la educación. Gracias por compartir generosamente sus conocimientos y su amistad.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra forma, formaron parte de este proceso, mi más sincero agradecimiento. Cada palabra, gesto o acción ha dejado una huella en este logro, que no solo es académico, sino también profundamente personal.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

PORTADA……..i
APROBACIÓN DEL TUTOR ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii
DERECHOS DE AUTOR iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO v
DEDICATORIA vi
AGRADECIMIENTO vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO viii
ÍNDICE DE FIGURAS xi
ÍNDICE DE TABLAS xii
ÍNDICE DE ANEXOS xiv
SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS xv
RESUMEN EJECUTIVO xvi
ABSTRACT xvii
CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO 1
I. JUSTIFICACIÓN 1
II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS 2
III. OBJETIVOS 6
A. OBJETIVO GENERAL 6
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 6
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA 7
I. EQUIPOS Y MATERIALES 7
A. FASE 1 - ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS 7

B. FASE 2 - COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA ENTRE EL HORMIGÓN TRADICIONAL Y EL HORMIGÓN ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS 15

C. FASE 3 - EVALUAR LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE MATERIALES RECICLADOS EN COMPARACIÓN CON LOS MATERIALES TRADICIONALES 16

II. MÉTODOS 17

A. FASE 1 - ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS 17

B. FASE 2 - COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA ENTRE EL HORMIGÓN TRADICIONAL Y EL HORMIGÓN ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS 30

C. FASE 3 - EVALUAR LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE MATERIALES RECICLADOS EN COMPARACIÓN CON LOS MATERIALES TRADICIONALES 34

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN 35

I. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 35

A. FASE 1 - ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS 35

B. FASE 2 - COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA ENTRE EL HORMIGÓN TRADICIONAL Y EL HORMIGÓN ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS 48

C. FASE 3 - EVALUAR LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE MATERIALES RECICLADOS EN COMPARACIÓN CON LOS MATERIALES TRADICIONALES 56

II. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS 62

A. HIPÓTESIS 62

B. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS 62

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 63

I. CONCLUSIONES 63

II. RECOMENDACIONES 65

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66

ANEXOS 70

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Fluorescencia de Rayos X (FRX) [22]. 25
Fig. 2. Comparación de contenido de humedad del agregado grueso 35
Fig. 3. Comparación de contenido de humedad del agregado fino 35
Fig. 4. Comparación de la granulometría del agregado grueso 36
Fig. 5. Comparación de la granulometría del agregado fino 36
Fig. 6. Comparación de la densidad real del agregado fino 37
Fig. 7. Comparación de la capacidad de absorción del agregado fino 37
Fig. 8. Comparación de la densidad real del agregado grueso 38
Fig. 9. Comparación de la capacidad de absorción del agregado grueso 38
Fig. 10. Comparación de la densidad compactada del agregado grueso 39
Fig. 11. Comparación de la densidad suelta del agregado grueso 39
Fig. 12. Comparación de la densidad compactada del agregado fino 39
Fig. 13. Comparación de la densidad suelta del agregado fino 40
Fig. 14. Comparación de contenido de humedad del agregado grueso 40
Fig. 15. Densidad y porcentaje óptimo de la mezcla de agregados reciclados..... 41
Fig. 16. Comparación del asentamiento del hormigón según su porcentaje de reemplazo de agregados reciclados..... 49
Fig. 17. Comparación de la resistencia a la compresión a los 7 días..... 49
Fig. 18. Comparación de la resistencia a la compresión a los 14 días..... 50
Fig. 19. Comparación de la resistencia a la compresión a los 28 días..... 51
Fig. 20. Comparación de la resistencia del hormigón con agregados naturales 51
Fig. 21. Comparación de la resistencia del hormigón con agregados reciclados 52
Fig. 22. Comparación de la Edad vs. Resistencia del hormigón con agregados naturales y reciclados..... 53
Fig. 23. Comparación del módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales .. 54
Fig. 24. Comparación del módulo de elasticidad del hormigón con agregados reciclados. 54
Fig. 25. Comparación de la Edad vs. Módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales y reciclados 55

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I MATERIALES PARA EL ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD 7
TABLA II MATERIALES PARA EL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA 8
TABLA III MATERIALES PARA EL ENSAYO DE DENSIDAD REAL, ... 10
TABLA IV MATERIALES PARA EL ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE SUELTA 12
TABLA V MATERIALES PARA EL ENSAYO DE DENSIDAD REAL DEL CEMENTO 13
TABLA VI MATERIALES PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN 14
TABLA VII MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN SIMPLE 15
TABLA VIII MATERIALES PARA LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LOS AGREGADOS 16
TABLA IX TAMAÑO ESTÁNDAR TAMICES AGREGADO GRUESO [15] 18
TABLA X LÍMITES DE PORCENTAJE ASTM [16] 18
TABLA XI TAMAÑO ESTÁNDAR TAMICES AGREGADO FINO [15] 18
TABLA XII LÍMITES DE PORCENTAJE ASTM [16] 19
TABLA XIII CLASIFICACIÓN DEL MÓDULO DE FINURA [16] 19
TABLA XIV NOMENCLATURA PARA UTILIZAR EL MÉTODO DE LA DENSIDAD ÓPTIMA [23] 26
TABLA XV RESISTENCIA A COMPRESIÓN SEGÚN LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO [23] 27
TABLA XVI RANGOS DE RESULTADOS DE ASENTAMIENTOS [24] 28
TABLA XVII TAMAÑO ESTÁNDAR TAMICES AGREGADO FINO [23] 29
TABLA XVIII CANTIDAD Y NOMENCLATURA DE ESPECÍMENES 31
TABLA XIX TABLA RESUMEN DE LOS ENSAYOS A REALIZAR 33
TABLA XX ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN 42
TABLA XXI ENSAYO DE DENSIDAD REAL DEL CEMENTO 42
TABLA XXII ANÁLISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X 43
TABLA XXIII DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS RECICLADOS 44
TABLA XXIV DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS RECICLADOS 46

TABLA XXV NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS 48
TABLA XXVI RUBRO #1 – HORMIGÓN SIMPLE COSTO REAL 56
TABLA XXVII RUBRO #1 – HORMIGÓN SIMPLE COSTO TESISTA 57
TABLA XXVIII RUBRO #2 – HORMIGÓN SIMPLE COSTO REAL 59
TABLA XXIX RUBRO #2 – HORMIGÓN SIMPLE COSTO TESISTA 60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Ensayo de contenido de humedad del ripio 71
Anexo 2: Ensayo de contenido de humedad de la arena 72
Anexo 3: Ensayo de contenido de humedad del ripio reciclado..... 73
Anexo 4: Ensayo de contenido de humedad del FCC 74
Anexo 5: Ensayo de granulometría del agregado grueso 75
Anexo 6: Ensayo de granulometría del agregado fino 76
Anexo 7: Ensayo de granulometría del agregado grueso reciclado..... 77
Anexo 8: Ensayo de granulometría del agregado fino reciclado..... 78
Anexo 9: Ensayo de densidad real y capacidad de absorción del ripio..... 79
Anexo 10: Ensayo de densidad real y capacidad de absorción de la arena 80
Anexo 11: Ensayo de densidad real y capacidad de absorción del ripio reciclado 81
Anexo 12: Ensayo de densidad real y capacidad de absorción del FCC..... 82
Anexo 13: Ensayo de densidad aparente del ripio..... 83
Anexo 14: Ensayo de densidad aparente de la arena..... 84
Anexo 15: Ensayo de densidad aparente del ripio reciclado..... 85
Anexo 16: Ensayo de densidad aparente del FCC..... 86
Anexo 17: Ensayo de densidad óptima de la mezcla con agregados naturales 87
Anexo 18: Ensayo de densidad óptima de la mezcla con agregados reciclados 88
Anexo 19: Resistencia y módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales 89
Anexo 20: Resistencia y módulo de elasticidad del hormigón con agregados reciclados 90
Anexo 21: Análisis Fluorescencia de Rayos X..... 91
Anexo 22: Presupuesto – APU del proyecto UNIDOS POR UN SUEÑO 92
Anexo 23: Presupuesto – APU del proyecto UNIDOS POR UN SUEÑO 93
Anexo 24: Proforma agregados FREVI..... 94

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

FCC	Catalizador Agotado De Craqueo Catalítico Fluidizado
AGR	Agregado Grueso Reciclado
NTE INEN	Norma Técnica Ecuatoriana, elaborada por el Servicio Ecuatoriano de Normalización
ASTM	American Society for Testing and Materials
UTA	Universidad Técnica de Ambato
FRX	Fluorescencia de Rayos X

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo experimental evalúa la resistencia a compresión del hormigón simple al incorporar agregado grueso reciclado (AGR) y catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC) como reemplazo del agregado fino. Esta investigación surge como respuesta a la creciente necesidad de fomentar prácticas sostenibles en la construcción, optimizar recursos y reducir el impacto ambiental generado por el uso extensivo de materiales naturales. La metodología se desarrolló en tres fases: caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados, comparación de la resistencia a compresión del hormigón tradicional frente al hormigón con AGR y FCC, y un análisis de la factibilidad económica. Para ello se elaboraron mezclas de hormigón con el 100% de materiales reciclados y 100% de agregados naturales, siguiendo normativas técnicas como NTE INEN y ASTM, y se evaluaron mediante ensayos estandarizados.

Los resultados mostraron que el uso de AGR y FCC afecta la trabajabilidad y la resistencia del hormigón, pero dentro de rangos aceptables para ciertos usos estructurales. A los 7 días, el hormigón con agregados naturales alcanzó una resistencia de 171,45 kg/cm², mientras que la mezcla con reciclados llegó a 37,75 kg/cm². A los 14 días, las resistencias fueron de 196,55 kg/cm² y 47,47 kg/cm² respectivamente, y a los 28 días, se obtuvieron valores de 239,74 kg/cm² para agregados naturales y 74,17 kg/cm² para reciclados. Estas cifras evidencian que, si bien existe una disminución de aproximadamente el 70% en la resistencia del hormigón reciclado frente al convencional, este puede cumplir con parámetros estructurales para determinadas aplicaciones no críticas. Adicionalmente, se determinó que el uso de materiales reciclados no reduce considerablemente el costo del hormigón: el costo del metro cúbico se aumentó de $100,90 (mezcla tradicional) a $291,77 (mezcla con reciclados), lo cual representa un aporte significativo en términos económicos.

Las conclusiones del estudio indican que la incorporación de AGR y FCC no es viable desde una perspectiva técnica ni económica, incluso si se optimizan las proporciones en la mezcla o se consideran los requerimientos estructurales del proyecto. Sin embargo, para otros usos este enfoque contribuye a la reducción del impacto ambiental, fomenta la economía circular y promueve el uso responsable de los recursos en el sector de la construcción.

PALABRAS CLAVE: HORMIGÓN RECICLADO, RESISTENCIA A COMPRESIÓN, CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO, AGREGADO RECICLADO, FACTIBILIDAD ECONÓMICA.

ABSTRACT

This experimental study evaluates the compressive strength of plain concrete by incorporating recycled coarse aggregate (RCA) and spent fluid catalytic cracking (FCC) catalyst as a replacement for fine aggregate. This research responds to the growing need to promote sustainable practices in construction, optimize resources, and reduce the environmental impact generated by the extensive use of natural materials. The methodology was developed in three phases: characterization of the physical and mechanical properties of recycled aggregates, comparison of the compressive strength of traditional concrete versus concrete with RCA and FCC, and an analysis of economic feasibility. Concrete mixtures with 100% recycled materials and 100% natural aggregates were prepared following regulatory techniques such as NTE INEN and ASTM and were evaluated using standardized tests.

The results show that the use of RCA and FCC affects the workability and strength of concrete, but within acceptable ranges for certain structural uses. After 7 days, the concrete with natural aggregates reached a strength of 171.45 kg/cm², while the mix with recycled aggregates reached 37.75 kg/cm². After 14 days, the strengths were 196.55 kg/cm² and 47.47 kg/cm², respectively, and after 28 days, values of 239.74 kg/cm² were obtained for natural aggregates and 74.17 kg/cm² for recycled aggregates. These figures show that, although there is an approximately 70% decrease in the strength of recycled concrete compared to conventional concrete, it can meet structural parameters for certain non-critical applications. Furthermore, the use of recycled materials is considered not to significantly reduce the cost of concrete: the cost per cubic meter increased from $100.90 (traditional mix) to $291.77 (mix with recycled materials), which represents a significant contribution in economic terms. The study's conclusions indicate that incorporating AGR and FCC is not feasible from a technical or economic perspective, even if the proportions in the mix are optimized or the project's structural requirements are considered. However, for other uses, this approach contributes to reducing environmental impact, fosters the circular economy, and promotes responsible resource use in the construction sector.

KEYWORDS: RECYCLED CONCRETE, COMPRESSIVE STRENGTH, FLUIDIZED CATALYTIC CRACKING, RECYCLED AGGREGATE, ECONOMIC FEASIBILITY.

CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO

I. JUSTIFICACIÓN

La tesis propuesta aborda la evaluación de la resistencia a la compresión del hormigón simple al incorporar agregado grueso reciclado y catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC) en sustitución del agregado fino. En primer lugar, se aborda la escasez de agregados naturales, ya que la extracción excesiva de arena y piedra triturada conlleva a la degradación de ecosistemas, además de poner en riesgo la disponibilidad futura de estos recursos. Para mitigar este problema, se propone el uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición, junto con subproductos industriales, lo cual podría reducir la dependencia de los recursos naturales y prolongar su disponibilidad. En segundo lugar, se busca mejorar la gestión de residuos en una de las industrias más grandes que es la construcción. Al reutilizar tanto los residuos de demolición como los catalizadores agotados, se fomenta la economía circular, minimizando la acumulación de desechos que representan un desafío ambiental si no son gestionados correctamente. En tercer lugar, se pretende mitigar el impacto ambiental asociado a la extracción de agregados vírgenes, que provoca la alteración de paisajes, erosión de suelos y pérdida de biodiversidad, además de contribuir a la huella de carbono de la construcción. La inclusión de FCC ayudaría a reducir estos impactos, promoviendo prácticas constructivas más sostenibles. Otro aspecto relevante es la reducción de costos, dado que la extracción y procesamiento de agregados naturales son costosos, especialmente en zonas con recursos limitados. El uso de materiales reciclados podría representar una opción más económica, siempre y cuando se mantengan las propiedades mecánicas del hormigón. Finalmente, se considera el contexto de normativas ambientales más estrictas, que exigen tecnologías más sostenibles en el sector de la construcción. El empleo de agregados reciclados y subproductos industriales no solo contribuiría a cumplir con estas regulaciones, sino que también podría facilitar la aceptación regulatoria y evitar sanciones por el incumplimiento de las normativas ambientales. La justificación de esta investigación radica en su relevancia para abordar los desafíos críticos que enfrenta el sector de la construcción, como la escasez de recursos naturales, la creciente generación de residuos y las presiones ambientales. El uso de materiales reciclados y subproductos industriales ofrece una solución innovadora y sostenible. Además, desde una perspectiva técnica, resulta esencial evaluar si el hormigón que incorpora estos materiales puede cumplir con los requisitos de resistencia a la compresión. Si se demuestra que este hormigón tiene un rendimiento estructural adecuado, se abriría la posibilidad de reducir significativamente el consumo de recursos vírgenes y la huella ambiental del sector. [1]

II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El agregado grueso reciclado (AGR) es un tipo de agregado que proviene de materiales sobrantes de construcciones y demoliciones. Su uso en hormigón es una alternativa cada vez más considerada debido a sus beneficios ambientales, como la reducción del consumo de recursos naturales y la disminución de desechos en vertederos. Sin embargo, el AGR puede presentar propiedades físicas y mecánicas distintas a las de los agregados naturales. Estas diferencias incluyen una mayor porosidad y una capacidad de absorción de agua superior, lo que puede afectar tanto la resistencia a la compresión como la durabilidad del hormigón resultante. A pesar de estos desafíos, investigaciones han demostrado que, mediante un tratamiento adecuado y una dosificación precisa, el AGR puede ser utilizado en hormigones estructurales sin comprometer la resistencia en comparación con los hormigones convencionales. [2] Diversos estudios han investigado el empleo de agregados gruesos reciclados (AGR) como alternativa parcial o total a los agregados naturales en la elaboración de hormigón. Estos estudios han identificado ciertas características particulares de los AGR, tales como su menor densidad y una capacidad de absorción de agua mayor en comparación con los agregados naturales. Esto se debe principalmente a que los AGR provienen de escombros de construcciones previas, lo que los hace más porosos y menos compactos. Sin embargo, se ha demostrado que, al utilizar AGR en proporciones adecuadas, entre el 20 % y 50 %, es posible fabricar un hormigón cuya resistencia a la compresión sea satisfactoria para algunas aplicaciones estructurales. [3] Investigaciones como las de Zúñiga y Ramírez [3] han mostrado que, en estos rangos de reemplazo, la reducción en la resistencia del hormigón es mínima y se mantiene dentro de los estándares estructurales, permitiendo una reutilización eficiente de los materiales de desecho. A pesar de estos hallazgos, los estudios también resaltan la necesidad de evaluar las propiedades específicas de los AGR en cada región, ya que las características de los desechos de construcción pueden variar según el tipo de edificaciones y materiales de demolición utilizados, lo que influye directamente en el desempeño del hormigón reciclado.

El catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC) es un subproducto del proceso de refinación del petróleo que, al perder su capacidad catalítica, se convierte en un residuo industrial en grandes cantidades. En lugar de desecharlo, estudios recientes han investigado su potencial como sustituto parcial del agregado fino en el hormigón. Este material presenta características físicas y químicas que pueden mejorar las propiedades del hormigón, como su estructura porosa y, en algunos casos, propiedades puzolánicas. Estas propiedades puzolánicas permiten que el FCC reaccione químicamente con el cemento, fortaleciendo la matriz del

hormigón y potenciando su durabilidad y resistencia. Por su tamaño de partícula similar al de la arena, el FCC es fácil de integrar en la mezcla de hormigón, representando una opción innovadora para la construcción sostenible. [4] El uso del catalizador FCC como aditivo o reemplazo parcial en mezclas de hormigón ha sido objeto de varias investigaciones debido a su potencial para mejorar ciertas propiedades del material final. Este tipo de catalizador es un residuo de la industria petrolera y contiene elementos que podrían favorecer reacciones químicas en el hormigón. [5] Por ejemplo, los estudios de Castro, Silva, Medina y Delvasto [5] han examinado el impacto del FCC al incorporarse en pequeñas cantidades dentro de las mezclas de hormigón. Sus hallazgos indican que, en bajas proporciones, el FCC actúa de forma puzolánica, reaccionando con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, lo que permite la formación de compuestos adicionales que contribuyen a incrementar la resistencia del hormigón y mejorar su durabilidad. Además, al reforzar la microestructura del hormigón, este tipo de adición podría reducir la permeabilidad, aumentando la vida útil de las estructuras. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que el efecto del FCC en la resistencia del hormigón varía dependiendo de factores como el método de preparación y la dosificación precisa, lo que sugiere la importancia de ajustar estas variables para maximizar los beneficios de este material en aplicaciones de construcción.

El empleo de materiales reciclados como el AGR y el FCC en el hormigón es un paso importante hacia una construcción más sostenible. Esta práctica se alinea con los principios de la economía circular, que busca reducir el consumo de recursos naturales y minimizar los residuos generados. Al reutilizar estos materiales de desecho, se contribuye a reducir la huella de carbono asociada a la producción de hormigón y a preservar los recursos naturales. No obstante, la incorporación de estos materiales plantea ciertos desafíos, especialmente en términos de control de calidad y de durabilidad, que son fundamentales para asegurar la integridad estructural y la vida útil del hormigón en obras de ingeniería civil. [1] Aunque los materiales reciclados presentan múltiples ventajas, tanto ambientales como económicas, su integración en el hormigón conlleva una serie de desafíos técnicos que deben ser abordados. En el caso del AGR, uno de los principales problemas es que su porosidad y capacidad de absorción de agua pueden afectar la trabajabilidad y cohesión de la mezcla de hormigón, dificultando su manipulación y colocación en obra. Además, estos agregados pueden ocasionar que el hormigón sea menos uniforme y más susceptible a la segregación. Por otro lado, la adición de FCC puede alterar las propiedades reológicas de la mezcla, es decir, su comportamiento bajo tensión y flujo, afectando la viscosidad y la estabilidad de la mezcla, lo que a su vez impacta en la calidad y durabilidad del hormigón. [6] Algunos investigadores, como Silupu, Flores,

Barrera y Reyna [7] han sugerido que es indispensable realizar tratamientos previos a los agregados reciclados, como el lavado o la prehumectación, para reducir la absorción de agua y mejorar su adherencia con la pasta de cemento. Además, proponen llevar a cabo ensayos de calidad específicos que garanticen que el hormigón resultante cumpla con los requisitos técnicos y normativos. Este tipo de ajustes y controles permitirían aprovechar las ventajas de los materiales reciclados sin comprometer el desempeño estructural del hormigón.

La combinación de agregado grueso reciclado (AGR) y de catalizador FCC como sustituto del agregado fino en la mezcla de hormigón crea una matriz con propiedades únicas. La interacción entre ambos materiales podría influir en la porosidad y en la distribución de vacíos dentro del hormigón, factores que son determinantes para su resistencia a la compresión. Dado que los agregados reciclados suelen tener una alta absorción de agua, la proporción de agua-cemento en la mezcla puede necesitar ajustes específicos para mantener la consistencia y trabajabilidad del hormigón. [5]

En Ecuador, se han llevado a cabo diversas investigaciones orientadas al análisis de la resistencia a compresión del hormigón mediante el uso de agregados reciclados y la incorporación de catalizador gastado de craqueo catalítico fluidizado (FCC). Por ejemplo, un estudio realizado por la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí evaluó las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad de agregados gruesos reciclados provenientes del reciclaje de hormigón, promoviendo así construcciones sustentables y se concluyó que los agregados gruesos reciclados presentan propiedades físico-mecánicas adecuadas y buena durabilidad, lo que los hace viables para aplicaciones estructurales, fomentando así construcciones sustentables. [8] De igual forma, en la Universidad Central del Ecuador, se desarrollaron dos estudios: uno sobre el reemplazo parcial del cemento Portland con catalizador gastado de FCC de la refinería de Esmeraldas y otro que evaluó el uso del catalizador como agregado en el hormigón, demostrando que el reemplazo parcial del cemento Portland con catalizador de FCC, en una proporción óptima del 5.54%, incrementa la resistencia a compresión del hormigón en un 13.08%, mientras que otro trabajo de la misma universidad indicó que su uso como agregado, en una proporción del 9.09%, mejora la resistencia a compresión hasta en un 20% a los 7 días. [9] [10] Asimismo, la Universidad Estatal del Sur de Manabí analizó las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición, como una estrategia para disminuir la contaminación ambiental, se concluyó que el uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición resulta en un hormigón con propiedades físicas y mecánicas aceptables, siendo una alternativa efectiva para reducir la contaminación ambiental. [11] Por último, la Escuela Politécnica Nacional

estudió la posibilidad de utilizar el catalizador agotado de FCC como adición puzolánica en hormigón y mortero, evaluando sus propiedades mecánicas y físicas, se determinó que el catalizador agotado de FCC posee características puzolánicas que permiten su utilización como adición en mezclas de concreto y mortero, mejorando ciertas propiedades mecánicas y contribuyendo al desarrollo de materiales más sostenibles. [12]

Estos estudios reflejan un creciente interés en el país por el desarrollo de materiales de construcción más sostenibles, enfocados en la reutilización de residuos industriales y de construcción para reducir el impacto ambiental del sector. La idea de combinar ambos materiales abre la posibilidad de que se generen sinergias que potencien las propiedades de resistencia y durabilidad del hormigón reciclado, permitiendo aprovechar los beneficios individuales de cada uno. Por ejemplo, el AGR aporta la ventaja de reducir la demanda de agregados naturales, mientras que el FCC podría mejorar las propiedades químicas y físicas del hormigón. Sin embargo, para lograr que esta combinación funcione de manera óptima, es necesario realizar ajustes precisos en la dosificación de cada componente, así como en el proceso de preparación de la mezcla, para evitar problemas de trabajabilidad o variaciones en la resistencia. La investigación sobre este tema contribuiría no solo a evaluar el rendimiento de un hormigón más ecológico, sino que también podría ser clave para fomentar el uso de materiales reciclados en proyectos de construcción sostenible en entornos urbanos, donde la reducción de residuos y el ahorro de recursos naturales son cada vez más importantes. [13]

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Determinar la resistencia a la compresión del hormigón simple utilizando agregado grueso reciclado y catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino, para optimizar su dosificación y reducir costos.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Estudiar las propiedades físicas (contenido de humedad, granulometría, gravedad específica, densidad real-aparente, y capacidad de absorción) del catalizador agotado de FCC y las propiedades físicas (contenido de humedad, granulometría, gravedad específica, densidad real-aparente, y capacidad de absorción) y mecánicas (abrasión) del agregado grueso reciclado.
2) Comparar la resistencia a la compresión del hormigón fabricado con agregados tradicionales frente al hormigón con agregado reciclado y catalizador agotado.
3) Evaluar la factibilidad económica del uso de estos materiales reciclados como componentes del hormigón.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

I. EQUIPOS Y MATERIALES

Para la ejecución del presente trabajo experimental, se emplearon los materiales fundamentales requeridos en la elaboración de hormigón, excluyéndose las herramientas menores utilizadas durante el procedimiento. La descripción de los materiales se realizará en función de cada uno de los objetivos propuestos. Es importante señalar que generalmente tanto los materiales como los equipos empleados fueron proporcionados por los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato (UTA), y su especificación se presentará conforme a su aplicación en cada uno de los objetivos del proyecto.

A. FASE 1 - ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS

TABLA I

MATERIALES PARA EL ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO	
EQUIPO Y/O MATERIALES	**DETALLE**
Ripio 	• Origen: Ripio natural proveniente de la Mina “Las Viñas”. • Tamaño nominal de ripio: 1”.
Ripio reciclado 	• Hormigón reciclado. • Tamaño 1”. • Origen: Escombros de Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA
Recipiente metálico pequeño	• Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica – UTA.
Horno eléctrico 	• Marca: Humboldt • Voltaje: 110 V • Temperatura regulable hasta 200 °C. • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Balanza electrónica	• Marca: Boeco • Unidad: gr • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.

ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO	
EQUIPO Y/O MATERIALES	**DETALLE**
Arena 	• Origen: Arena natural lavada de la Mina “Las Viñas”.
Catalizador agotado de FCC 	• Origen: Catalizador agotado de FCC de la Refinería de Esmeraldas.
Recipiente metálico pequeño	• Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica – UTA.
Horno eléctrico 	• Marca: Humboldt • Voltaje: 110 V • Temperatura regulable hasta 200 °C. • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Balanza electrónica	• Marca: Boeco • Unidad: gr • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.

TABLA II

MATERIALES PARA EL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO	
EQUIPO Y/O MATERIALES	**DETALLE**
Ripio 	• Origen: Ripio natural proveniente de la Mina “Las Viñas”. • Tamaño nominal de ripio: 1”.
Ripio reciclado 	• Hormigón reciclado. • Tamaño 1”. • Origen: Escombros de Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica – UTA.

Tamices metálicos 	• Tamaño nominal: 2", 1 1/2",1",3/4",1/2",3/8", #4 y bandeja. • Dimensiones: 50 x 50 cm • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Balanza electrónica	• Marca: Boeco • Unidad: gr • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO	
Arena 	• Origen: Arena natural lavada de la Mina "Las Viñas".
Catalizador agotado de FCC 	• Origen: Catalizador agotado de FCC de la Refinería de Esmeraldas.
Tamices metálicos	• Tamaño nominal: 3/8", #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200 y bandeja. • Diámetro: 25cm • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Tamizadora eléctrica 	• Marca: Controls • Capacidad: 15 tamices • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Balanza electrónica	• Marca: Boeco • Unidad: gr • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.

TABLA III

MATERIALES PARA EL ENSAYO DE DENSIDAD REAL,

GRAVEDAD ESPECÍFICA

Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN

ENSAYO DE DENSIDAD REAL, GRAVEDAD ESPECÍFICA Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO	
EQUIPO Y/O MATERIALES	**DETALLE**
Ripio 	• Origen: Ripio natural proveniente de la Mina “Las Viñas”. • Tamaño nominal de ripio: 1”.
Ripio reciclado 	• Hormigón reciclado. • Tamaño 1”. • Origen: Escombros de Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica – UTA.
Canastilla metálica 	• Malla #8 • Dimensiones: 20.3 x 20.3 cm • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Horno eléctrico 	• Marca: Humboldt • Voltaje: 110 V • Temperatura regulable hasta 200 °C. • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Balanza electrónica	• Marca: Boeco • Unidad: gr • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
ENSAYO DE DENSIDAD REAL, GRAVEDAD ESPECÍFICA Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO	
Arena 	• Origen: Arena natural lavada de la Mina “Las Viñas”.

Catalizador agotado de FCC 	• Origen: Catalizador agotado de FCC de la Refinería de Esmeraldas.
Picnómetro y pipeta 	• Material de vidrio • Volumen 500ml • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Termómetro y embudo 	• Material de vidrio • Material de plástico • Temperatura regulable hasta 100 °C. • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Cono de absorción y pisón 	• Material del cono: Bronce • Material del pisón: Acero • Diámetro del cono: 40 x 90 x 70 mm • Diámetro del pisón: 25.5 x 170 mm
Horno eléctrico 	• Marca: Humboldt • Voltaje: 110 V • Temperatura regulable hasta 200 °C. • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Balanza electrónica	• Marca: Boeco • Unidad: gr • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.

TABLA IV

MATERIALES PARA EL ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE SUELTA

Y COMPACTADA DE LOS AGREGADOS Y DE LA MEZCLA

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTADA DE LOS AGREGADOS	
EQUIPO Y/O MATERIALES	**DETALLE**
Agregado fino y grueso 	• Origen: Ripio natural proveniente de la Mina “Las Viñas”. • Hormigón reciclado. Escombros de Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA • Tamaño nominal de ripio: 1”.
Agregado fino y grueso reciclado 	• Origen: Arena natural lavada de la Mina “Las Viñas”. Catalizador agotado de FCC de la Refinería de Esmeraldas.
Molde metálico para densidad aparente 	• Diámetro: 30cm • Altura: 20.9cm • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Placa de vidrio 	• Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Varilla compactadora	• Dimensiones: 6.1 x 1.6 cm • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Balanza electrónica	• Marca: Boeco • Unidad: gr • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.

TABLA V

MATERIALES PARA EL ENSAYO DE DENSIDAD REAL DEL CEMENTO

ENSAYO DE DENSIDAD REAL DEL CEMENTO	
EQUIPO Y/O MATERIALES	**DETALLE**
Cemento Tipo GU 	• Cemento hidráulico para construcción. • Marca comercial: Holcim.
Gasolina 	• Gasolinera más cercana EP Petroecuador. • 1 galón
Picnómetro y pipeta 	• Material de vidrio • Volumen 500ml • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Termómetro y embudo 	• Material de vidrio • Material de plástico • Temperatura regulable hasta 100 °C. • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Balanza electrónica	• Marca: Boeco • Unidad: gr • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.

TABLA VI

MATERIALES PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	
EQUIPO Y/O MATERIALES	**DETALLE**
Ripio 	• Origen: Ripio natural proveniente de la Mina “Las Viñas”. • Tamaño nominal de ripio: 1”.
Ripio reciclado 	• Hormigón reciclado. • Tamaño 1”. • Origen: Escombros de Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica – UTA.
Máquina de los Ángeles 	• Marca: Rcingtec • Proveniente del laboratorio del GAD Municipal Ambato.
Esferas metálicas 	• Diámetro promedio: 46,8 mm • Proveniente del laboratorio del GAD Municipal Ambato.
Tamices metálicos 	• Tamaño nominal: 1 1/2”,1”,3/4”,1/2”,3/8”, #4 • Proveniente del laboratorio del GAD Municipal Ambato.
Balanza electrónica	• Marca: Boeco • Unidad: gr • Proveniente del laboratorio del GAD Municipal Ambato.

B. FASE 2 - COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA ENTRE EL HORMIGÓN TRADICIONAL Y EL HORMIGÓN ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS

TABLA VII

MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN SIMPLE

ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN SIMPLE	
EQUIPO Y/O MATERIALES	**DETALLE**
Agregado fino y grueso 	• Origen: Ripio natural proveniente de la Mina “Las Viñas”. • Hormigón reciclado. Escombros de Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica – UTA. • Tamaño nominal de ripio: 1”.
Agregado fino y grueso reciclado 	• Origen: Arena natural lavada de la Mina “Las Viñas”. Catalizador agotado de FCC de la Refinería de Esmeraldas.
Moldes cilíndricos para concreto 	• Medidas 200 mm • Diámetro: 100mm • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Aceite quemado	• 1 balde de aceite quemado
Cono de Abrams 	• Dimensiones: Base superior: 100mm Base inferior: 200mm Altura: 300mm • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Concretera eléctrica 	• Voltaje 110V • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.

Bandeja metálica	• Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Varilla lisa de compactación	• Punta redonda 6.1 x 1.6 cm • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Martillo de goma	• Material: Caucho sintético • Masa: 300gr • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Pala, pala de mano y bailejo	• Utilizados para la realización del concreto. • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Flexómetro	• Alcance de medición: 5m
Agua potable	• Embebido en probeta de capacidad de 100 ml. • Proveniente del laboratorio de la facultad de Ingeniería Civil- FICM-UTA.
Cámara de curado 	• Pozos de agua para curar los cilindros a los 7, 14 y 28 días. • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.
Máquina de compresión 	• Máquina hidráulica de marca SHIMADZU • Software: Trapezium X • Capacidad: 40 a 2000 KN • Proveniente del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica - UTA.

C. FASE 3 - EVALUAR LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE MATERIALES RECICLADOS EN COMPARACIÓN CON LOS MATERIALES TRADICIONALES

TABLA VIII

MATERIALES PARA LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LOS AGREGADOS

FACTIBILIDAD ECONÓMICA	
EQUIPO Y/O MATERIALES	**DETALLE**
Microsoft Excel	• Para realizar los rubros.
Proformas de los materiales	• Para estimar los gastos de los materiales.

II. MÉTODOS

Este estudio experimental se fundamenta en una metodología de investigación cuantitativa que integra diversos enfoques como cálculos técnicos, ensayos de materiales, análisis de costos y la valoración de los resultados obtenidos, los cuales se clasifica dependiendo su fase.

A. FASE 1 - ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS

En la primera fase, la metodología aplicada en esta fase corresponde a una caracterización experimental de materiales mediante ensayos estándar de laboratorio. Para el catalizador, se determinarán el contenido de humedad, granulometría, gravedad específica, densidad real, densidad aparente y capacidad de absorción mediante ensayos estándar de laboratorio, siguiendo normativas como la Norma Técnica Ecuatoriana, elaborada por el Servicio Ecuatoriano de Normalización (NTE INEN), American Society for Testing and Materials (ASTM) o similares. Paralelamente, para el agregado grueso reciclado, se evaluarán su contenido de humedad, granulometría, gravedad específica, densidad real, densidad aparente y capacidad de absorción, y resistencia a la abrasión mediante pruebas como la del tamiz y el ensayo de desgaste en la Máquina de los Ángeles.

1) Contenido de humedad

Es el volumen de agua contenido en la estructura de un agregado, lo cual facilita ajustar las proporciones de los agregados en el hormigón. Esto se logra mediante el secado al horno de una muestra de la masa hasta eliminar completamente la humedad, permitiendo así determinar la cantidad de agua presente en la muestra. [14]

$$P(\%) = \left(\frac{W - D}{D}\right) * 100 \qquad (1)$$

Donde:

$P =$ Contenido total de humedad evaporable de la muestra.

$W =$ Masa de la muestra original.

$D =$ Masa de la muestra seca. [14]

El procedimiento para determinar el contenido de humedad de una muestra consiste en varias etapas. Primero, se debe pesar la muestra con una precisión de 0,1%. Luego, se seca completamente en un recipiente utilizando una fuente de calor, asegurándose de no perder partículas. Si se usa un horno de temperatura controlada, se debe evitar el sobrecalentamiento para no alterar las propiedades del material, y si se emplea una fuente de calor diferente, se agita la muestra durante el secado para evitar el sobrecalentamiento localizado. En caso de utilizar un horno de microondas, la agitación es opcional, pero se

debe tener cuidado con la presencia de minerales en la muestra que puedan causar explosiones. Si se usa una plancha caliente, el proceso se acelera añadiendo alcohol anhidro desnaturalizado para cubrir la muestra, agitando y luego dejando que el alcohol se queme durante el secado. La muestra se considera completamente seca cuando el tiempo adicional de calor no causa una pérdida de masa mayor al 0,1%. Finalmente, se pesa la muestra seca después de que se haya enfriado lo suficiente para no dañar la balanza. [14]

2) Granulometría

Este método de ensayo se utiliza principalmente para determinar la graduación de materiales con el propósito de utilizarlos como áridos para hormigón o utilizarlos como áridos para otros propósitos. Los tamices se ordenan según la tabla siguiente: [15]

TABLA IX

TAMAÑO ESTÁNDAR TAMICES AGREGADO GRUESO [15]

# TAMIZ	**ABERTURA (mm)**
2”	50.80
1 1/2”	38.10
1”	26.67
3/4”	18.85
1/2”	13.32
3/8”	9.50
#4	0.15

TABLA X

LÍMITES DE PORCENTAJE ASTM [16]

# TAMIZ	**LÍMITES ASTM**
2”	100
1 1/2”	100
1”	100 - 90
3/4”	85 - 40
1/2”	40 - 10
3/8”	15 - 0
#4	5 -0

TABLA XI

TAMAÑO ESTÁNDAR TAMICES AGREGADO FINO [15]

# TAMIZ	**ABERTURA (mm)**

3/8"	9.50
#4	4.75
#8	2.36
#16	1.18
#30	0.60
#50	0.30
#100	0.15
#200	0.08

TABLA XII
LÍMITES DE PORCENTAJE ASTM [16]

# TAMIZ	**LÍMITES ASTM**
3/8"	100
#4	100 - 95
#8	100 - 80
#16	85 - 50
#30	60 - 25
#50	30 - 5
#100	10 -0
#200	0

TABLA XIII
CLASIFICACIÓN DEL MÓDULO DE FINURA [16]

MÓDULO DE FINURA	**CLASIFICACIÓN**
<2.4	Arena fina
2.4 – 3.1	Arena de finura media
>3.1	Arena gruesa

El procedimiento del ensayo de granulometría consiste en preparar una muestra representativa del material a ensayar, que debe tener un peso mínimo de 300 gramos para árido fino y 10 kg para árido grueso. Primero, la muestra se seca hasta obtener una masa constante a una temperatura de 110°C ± 5°C. Luego, se seleccionan los tamices adecuados según el tamaño de las partículas del material, ordenándolos de mayor a menor apertura y colocándolos en una pila, con el tamiz de mayor abertura en la parte superior. La muestra se distribuye sobre el tamiz superior y se somete a un proceso de tamizado mediante agitación manual o mecánica durante un tiempo suficiente, según lo indicado por la norma, hasta que no pase más del 1% en masa de material retenido en cada tamiz después de un minuto de tamizado. Es importante evitar sobrecargar los tamices, para lo

cual se pueden utilizar tamices adicionales o dividir la muestra en varias porciones. Durante el tamizado, se debe asegurar que las partículas tengan la oportunidad de pasar por las aberturas del tamiz sin forzarlas. Finalmente, se pesa la masa de material retenido en cada tamiz, y los resultados solo serán válidos si la masa total de material tamizado no varía más del 0.3% respecto a la masa inicial de la muestra. [15]

3) Densidad real, gravedad específica y capacidad de absorción en agregado fino

La densidad real mide la masa por unidad de volumen del agregado, excluyendo los espacios vacíos entre las partículas, lo que ayuda a determinar la cantidad de material presente en un volumen específico. La gravedad específica se refiere a la relación entre la densidad del agregado y la densidad del agua, proporcionando una medida de la compacidad del material. Por otro lado, la capacidad de absorción evalúa la cantidad de agua que un agregado fino puede absorber en relación con su masa, lo cual es crucial para comprender cómo este material interactuará con el agua en mezclas de concreto, afectando la trabajabilidad y resistencia de este. Estos tres ensayos proporcionan información clave para el diseño de mezclas de concreto y la selección adecuada de los agregados. [17]

$$DRA\ kg/m^3 = \frac{997.5\ S}{(B + S\ -\ C)} \tag{2}$$

$$GS = \frac{S}{(B + S\ -\ C)} \tag{3}$$

$$CA(\%) = \frac{(S\ -\ A)}{A} * 100 \tag{4}$$

Donde:

$DRA =$ Densidad real del agregado fino.

$GS =$ Gravedad específica del agregado fino.

$CA =$ Capacidad de absorción del agregado fino.

$A =$ Masa de la muestra seca.

$B =$ Masa del picnómetro lleno con agua.

$C =$ Masa del picnómetro lleno con muestra y agua.

$S =$ Masa de muestra saturada superficialmente seca. [17]

El procedimiento para determinar la densidad real, la gravedad específica y la capacidad de absorción en un agregado fino inicia con la preparación de una muestra de aproximadamente 1 kg, siguiendo el método de reducción de muestra indicado en la NTE INEN 2566. La muestra se seca en un horno a 110°C ± 5°C hasta obtener una masa

constante, luego se enfría a unos 50°C para su manipulación. Posteriormente, se cubre con agua para alcanzar al menos un 6% de humedad, y se deja reposar durante 24 horas ± 4 horas. Tras este tiempo, se elimina el exceso de agua y se procede a secar la muestra, asegurando un secado uniforme y controlado, utilizando aire caliente o, si se desea, equipos mecánicos como un agitador. Una vez alcanzada la condición de saturación superficialmente seca, se realizan las mediciones utilizando el método gravimétrico con un picnómetro. Este procedimiento implica llenar parcialmente el picnómetro con agua, introducir 500 g ± 10 g del árido fino saturado superficialmente seco, agitar el picnómetro para eliminar las burbujas de aire, ajustar la temperatura a 23°C ± 2°C, y determinar la masa total. Luego, el árido se seca nuevamente en el horno y se pesa para obtener la masa seca, lo que permitirá calcular la densidad real y la capacidad de absorción del material. [17]

4) Densidad real, gravedad específica y capacidad de absorción en agregado grueso

El ensayo de densidad real mide la masa por unidad de volumen de las partículas sólidas del agregado, excluyendo los vacíos dentro de los granos, lo cual permite conocer su densidad en condiciones secas. La gravedad específica es el cociente entre la densidad del material y la densidad del agua, y proporciona información sobre la pesadez relativa del agregado, lo que influye en la resistencia y durabilidad de las estructuras. Por otro lado, la capacidad de absorción evalúa la cantidad de agua que el agregado puede absorber en relación con su masa seca, lo cual es crucial para determinar la cantidad de agua necesaria en la mezcla de concreto y prevenir la alteración de las propiedades de la mezcla. Estos ensayos son esenciales para garantizar la calidad y el rendimiento del concreto y otros materiales de construcción. [18]

$$DRA\ kg/m^3 = \frac{997.5\ B}{(B\ -\ C)} \tag{5}$$

$$GS = \frac{B}{(B\ -\ C)} \tag{6}$$

$$CA(\%) = \frac{(B\ -\ A)}{A} * 100 \tag{7}$$

Donde:

$DRA =$ Densidad real del agregado grueso.

$GS =$ Gravedad específica del agregado grueso.

$CA =$ Capacidad de absorción del agregado grueso.

$A =$ Masa en aire de la muestra seca.

$B =$ Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca.

$C =$ Masa aparente en agua de la muestra saturada. [18]

El procedimiento para determinar la densidad real, la gravedad específica y la capacidad de absorción del agregado grueso inicia con la toma de muestras conforme a la NTE INEN 695. Posteriormente, se mezcla la muestra y se reduce hasta obtener la cantidad necesaria, utilizando el procedimiento de la NTE INEN 2566. El material que pasa por el tamiz de 4,75 mm se rechaza mediante tamizado en seco, y se elimina el polvo o recubrimiento de la superficie del árido con lavado. Si el agregado contiene una cantidad significativa de material fino, se emplea un tamiz de 2,36 mm en lugar del de 4,75 mm. La muestra se seca en horno a 110 ºC ± 5 ºC hasta obtener una masa constante, y luego se enfría a temperatura ambiente por un periodo de entre 1 y 3 horas. Posteriormente, el árido se sumerge en agua a temperatura ambiente durante 24 horas ± 4 horas. Después de este tiempo, se retira la muestra del agua, se seca superficialmente con un paño absorbente para eliminar el agua visible y se mide la masa de la muestra en su condición saturada superficialmente seca. Finalmente, se determina la masa aparente en agua, sumergiendo la muestra en un recipiente y agitando para remover el aire atrapado, y luego se seca nuevamente en el horno a 110 ºC ± 5 ºC hasta obtener una masa constante. [18]

5) Densidad aparente compactada y suelta de los agregados y de la mezcla

El ensayo de densidad aparente compactada y suelta de los agregados tiene como objetivo determinar la masa de los agregados por unidad de volumen, considerando su compactación. En el caso de la densidad aparente suelta, se mide el volumen ocupado por los agregados sin aplicarles presión, lo que refleja su forma y tamaño irregular. Por otro lado, la densidad compactada se obtiene al aplicar presión a los agregados, reduciendo su volumen. Estos ensayos son fundamentales en la ingeniería civil para evaluar las propiedades de los materiales y su comportamiento en mezclas como el concreto, ya que afectan la dosificación de los materiales y la calidad de las construcciones. La diferencia entre ambas densidades ayuda a comprender cómo los agregados se comportarán en situaciones de manipulación y compactación en obra. [19]

$$M\ kg/m^3 = \frac{(G\ -\ T)}{V} \tag{8}$$

Donde:

$M =$ Masa unitaria.

$G =$ Masa del árido más el molde.

$T =$ Masa del molde.

$V =$ Volumen del molde. [19]

El procedimiento para determinar la densidad aparente compactada y suelta de los agregados comienza con el muestreo, que se realiza siguiendo la normativa NTE INEN 695 y NTE INEN 2 566 para reducir la muestra hasta obtener la cantidad necesaria para el ensayo. La muestra debe ser de un tamaño aproximadamente 125% a 200% superior a lo necesario para llenar el molde, y debe ser manipulada con cuidado para evitar la segregación. Luego, se seca la muestra en un horno a 110 °C ± 5 °C hasta obtener masa constante. Para la determinación de la masa unitaria, si se emplea el procedimiento por paladas, este solo debe usarse si se especifica; de lo contrario, se debe determinar la masa unitaria compactada mediante el procedimiento por varillado, para áridos con tamaño máximo nominal de 37,5 mm o menos, o por el procedimiento por sacudidas para áridos de mayor tamaño, hasta 125 mm. En el procedimiento por varillado, se llena el molde en tres capas: primero, se coloca un tercio del molde, se nivela y se compacta con 25 golpes distribuidos uniformemente. Luego, se repite el proceso con las dos siguientes capas, asegurándose de que la varilla no golpee el fondo del molde en la primera capa, y de que no penetre en las capas anteriores durante la compactación de las siguientes. Finalmente, se nivela la superficie del árido y se determina la masa total del molde y su contenido con una precisión de 0,05 kg. [19]

6) Resistencia a la abrasión

La abrasión consiste en el desgaste de un elemento con ayuda de la fricción. Es importante recalcar que el ensayo de abrasión solo se lo realiza a los agregados gruesos, conocer la resistencia a la abrasión o desgaste de los agregados es útil en el diseño de mezclas. Esta es importante porque con ella conoceremos la durabilidad y la resistencia que tendrá el concreto para la fabricación de losas, estructuras simples o estructuras que requieran que la resistencia del concreto sea la adecuada para ellas. [20]

$$D(\%) = \frac{(B - C)}{B} * 100 \qquad (9)$$

Donde:

$D =$ Valor de degradación.

$B =$ Masa inicial de la muestra de ensayo.

$C =$ Masa de la muestra retenida en el tamiz de 1,70 mm, después del ensayo. [20]

El procedimiento para el ensayo de resistencia a la abrasión comienza con el muestreo, que se realizará siguiendo la normativa NTE INEN 695, y la reducción de la muestra hasta el tamaño adecuado según la NTE INEN 2.566. Posteriormente, la muestra obtenida

se lava y se seca en un horno a 110 °C ± 5 °C hasta alcanzar una masa constante. Luego, se separa en fracciones por tamaño y se recombinan para obtener la gradación que mejor represente el rango de tamaños del árido para el ensayo. Se registra la masa de la muestra antes de comenzar el ensayo con una precisión de 1 g. En el procedimiento, se coloca la muestra y la carga en la máquina de Los Ángeles, que se gira durante 500 revoluciones a una velocidad de entre 30 y 33 revoluciones por minuto. Tras este proceso, se descarga el material y se realiza una separación preliminar de la muestra sobre un tamiz con una abertura mayor a 1,70 mm. Luego, se tamiza la porción fina mediante un tamiz de 1,70 mm según la NTE INEN 696. La porción más gruesa se lava y se seca nuevamente al horno a 110 °C ± 5 °C hasta obtener una masa constante. Finalmente, se determina la masa de esta fracción con una precisión de 1 g. En caso de que el árido no contenga recubrimientos adherentes ni polvo, el lavado después del ensayo es opcional, aunque en los ensayos de arbitraje se requiere. [20]

7) Densidad real del cemento

La densidad real del cemento se refiere a la masa por unidad de volumen de las partículas sólidas del cemento, excluyendo los espacios vacíos entre ellas. Este valor es fundamental para caracterizar la calidad y las propiedades del cemento, ya que influye en su comportamiento durante el proceso de mezclado y fraguado. La determinación de la densidad real se realiza mediante el uso de un picnómetro, un equipo especializado que permite medir el volumen de las partículas al desplazar un líquido de densidad conocida. Esta propiedad es crucial para garantizar la eficiencia del material en la mezcla de concreto, asegurando que la proporción de cemento en la mezcla sea la adecuada para obtener la resistencia y durabilidad esperadas en la estructura final. [21]

$$\rho\ g/cm^3 = \frac{Masa\ del\ cemento}{Volumen\ desplazado} \qquad (10)$$

Donde:

$\rho =$ Densidad real del cemento. [21]

Para realizar el ensayo de densidad real del cemento, se comienza llenando un frasco con uno de los líquidos especificados hasta una altura que se encuentre entre las marcas 0 cm³ y 1 cm³ en el cuello del frasco. Si es necesario, se seca el interior del frasco sobre el nivel del líquido antes de iniciar la medición. Se registra la primera lectura después de sumergir el frasco en un baño de agua a temperatura controlada. A continuación, se introduce el cemento previamente pesado en pequeñas cantidades dentro del frasco, asegurándose de que esté a la misma temperatura que el líquido para evitar salpicaduras.

Se puede usar un vibrador para facilitar la introducción del cemento y evitar que se adhiera al frasco o se atasque en el cuello. Una vez introducido todo el cemento (64 gramos), se coloca el tapón en el frasco y se gira suavemente para liberar el aire atrapado, hasta que ya no suban burbujas a la superficie del líquido. Se registra la lectura final, también después de sumergir el frasco en el baño de agua para mantener la temperatura constante, asegurando que la variación no sea superior a 0,2°C entre las lecturas inicial y final. [21]

8) Análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX)

El análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX) es una técnica instrumental ampliamente utilizada para determinar la composición química elemental de una muestra sólida, líquida o en polvo. En este caso, la técnica fue aplicada específicamente para caracterizar un catalizador agotado proveniente del proceso de craqueo catalítico fluidizado (FCC), con el objetivo de identificar su potencial de valorización como material cementante suplementario. La FRX permite identificar y cuantificar los elementos presentes en materiales inorgánicos como cementos, suelos, minerales industriales o, como en este caso, residuos catalíticos industriales, proporcionando información clave sobre su calidad, origen y posibles aplicaciones. El principio de funcionamiento de esta técnica se basa en la emisión de rayos X secundarios (fluorescencia) por parte de los átomos de la muestra al ser excitados por una fuente primaria de rayos X. Cada elemento químico genera una señal específica al ser excitado, lo que permite su identificación precisa. La intensidad de esa señal está directamente relacionada con su concentración en la muestra. [22]

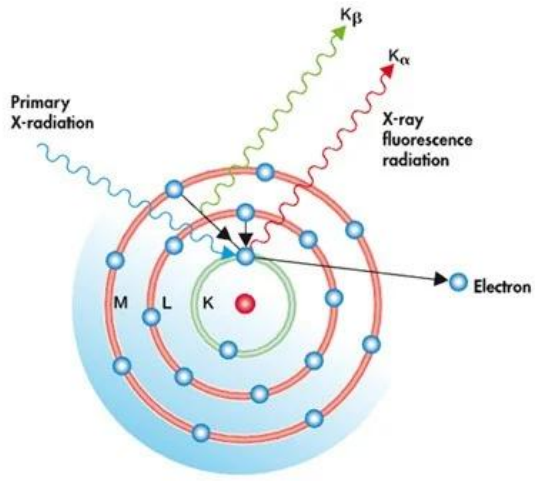


Fig. 1. Fluorescencia de Rayos X (FRX) [22].

Para llevar a cabo este análisis, el catalizador agotado FCC fue previamente secado, molido y compactado en forma de pastilla prensada, siguiendo los protocolos establecidos para este tipo de muestras. Esta preparación es fundamental para asegurar la uniformidad y representatividad del análisis. Una vez lista, la muestra fue sometida a un haz de rayos X en el equipo S8 TIGER, y los datos generados fueron procesados e interpretados mediante el software especializado Spectra Plus, bajo el método QuantExpress, que permite realizar lecturas rápidas y confiables para un amplio rango de elementos, desde el sodio (Na) hasta el uranio (U). Cabe destacar que este ensayo fue realizado en los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional, donde se cuenta con los equipos e infraestructura necesarios para garantizar resultados de alta calidad. [22]

9) Dosificación del hormigón

Se empleó el método de densidad óptima desarrollado por la Universidad Central del Ecuador para determinar la dosificación del hormigón. Este enfoque de diseño prioriza el uso de la mínima cantidad de pasta necesaria para obtener un hormigón de alta calidad, maximizando la eficiencia en la combinación de agregados finos y gruesos con el objetivo de reducir al mínimo el porcentaje de vacíos. La correcta aplicación de este método requiere comprender la nomenclatura utilizada. [23]

TABLA XIV

NOMENCLATURA PARA UTILIZAR EL MÉTODO DE LA DENSIDAD ÓPTIMA [23]

NOMENCLATURA:	
DRC	Densidad Real del Cemento
DRA	Densidad Real de la Arena
DRR	Densidad Real del Ripio
DSA	Densidad Suelta de la Arena
DSR	Densidad Suelta del Ripio
POA	Porcentaje Óptimo de Arena
POR	Porcentaje Óptimo de Ripio
DOM	Densidad Óptima de la Mezcla
W/C	Relación Agua Cemento
CP (%)	Cantidad de Pasta en %
DRM	Densidad Real de la Mezcla
POV	Porcentaje Óptimo de Vacíos
CP	Cantidad de Pasta
C	Cantidad de Cemento
W	Cantidad de Agua
A	Cantidad de Arena

R	Cantidad de Ripio
VR	Volumen Requerido
VN	Volumen Necesario

Para dosificar por este método se realizan los siguientes pasos:

1. Selección de la relación agua/cemento (W/C):

   Elegir la proporción adecuada de agua a cemento en función de la resistencia a compresión deseada al finalizar el período de curado de 28 días. [23]

TABLA XV

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SEGÚN LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO [23]

F'C MPA	**RELACIÓN W/C**
45	0.37
42	0.4
40	0.42
35	0.46
32	0.5
30	0.51
28	0.52
25	0.55
24	0.56
21	0.58
18	0.6

2. Cálculo de la Densidad Real de la Mezcla (DRM):

   Determinar la DRM combinando la densidad real de los agregados grueso y fino en proporción a sus volúmenes aparentes y reales. [23]

$$DRM = \frac{DRA * POA + DRR * POR}{100} \quad (11)$$

3. Determinación del Porcentaje de Vacíos (POV):

   Estimar el porcentaje de espacios vacíos entre los agregados mediante la siguiente fórmula: [23]

$$POV = \frac{DRM - DOM}{DRM} * 100 \quad (12)$$

4. Cálculo de la Cantidad de Pasta (CP):

Determinar la cantidad de pasta necesaria para rellenar los vacíos, ajustada según el asentamiento deseado. [23]

El ensayo de asentamiento del hormigón es una prueba fundamental para evaluar la consistencia y trabajabilidad del hormigón fresco en obra. Este procedimiento permite determinar la facilidad con la que el hormigón puede ser mezclado, transportado, colocado y compactado sin que ocurra segregación ni pérdida de homogeneidad. La medición del asentamiento proporciona una estimación indirecta del contenido de agua y de la fluidez de la mezcla, lo cual influye directamente en la calidad del producto final. Es una prueba sencilla, rápida y ampliamente utilizada en campo para el control de calidad del hormigón recién preparado. [24]

TABLA XVI

RANGOS DE RESULTADOS DE ASENTAMIENTOS [24]

ASENTAMIENTO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	RANGO DE DOS RESULTADOS
Un solo operador		
Asentamiento 30 mm	6 mm	17 mm
Asentamiento 85 mm	9 mm	25 mm
Asentamiento 160 mm	10 mm	28 mm
Multilaboratorio		
Asentamiento 30 mm	7 mm	20 mm
Asentamiento 85 mm	10 mm	28 mm
Asentamiento 160 mm	13 mm	37 mm

El procedimiento para determinar el asentamiento del hormigón inicia con el humedecimiento del molde, el cual debe colocarse sobre una superficie plana, rígida, húmeda y no absorbente. Este se sostiene firmemente mediante presión manual o fijación a la base. Inmediatamente después de obtener la muestra de hormigón, se llena el molde en tres capas iguales, utilizando un cucharón para asegurar una distribución uniforme y evitar la segregación. Cada capa se compacta con 25 golpes aplicados con una varilla, distribuidos de forma uniforme, comenzando en el perímetro y finalizando en el centro con un movimiento en espiral. La capa superior se llena con un ligero exceso de hormigón para asegurar su correcta compactación, añadiendo más material si es necesario. Tras compactar la última capa, se enrasa la superficie con la varilla y se limpia el área alrededor del molde. Luego, se retira cuidadosamente el molde en dirección vertical, en un tiempo de 5 ± 2 segundos y sin movimientos laterales o torsionales. Todo el procedimiento debe realizarse sin

interrupciones y completarse en un máximo de dos minutos. Finalmente, se mide el asentamiento como la diferencia entre la altura del molde y el punto más bajo de la muestra. Si el hormigón sufre desprendimientos o cortes que alteren la forma, el ensayo se considera inválido y debe repetirse con otra porción de la muestra. [24]

TABLA XVII

TAMAÑO ESTÁNDAR TAMICES AGREGADO FINO [23]

ASENTAMIENTO (CM)	CANTIDAD EN PASTA (%)
0 - 3	POV +2% + 3% (POV)
3 - 6	POV +2% + 6% (POV)
6 - 9	POV +2% + 8% (POV)
9 - 12	POV +2% + 11% (POV)
12 - 15	POV +2% + 13% (POV)

5. Determinación de la cantidad de cemento (C):

   Usar la siguiente fórmula para calcular el cemento necesario: [23]

$$C = \frac{CP}{\frac{W}{C} + \frac{1}{DRC}} \tag{13}$$

6. Cálculo de la cantidad de agua (W):

   Derivar el volumen de agua según la fórmula: [23]

$$W = \frac{W}{C} * C \tag{14}$$

7. Cálculo de agregado fino (A):

   Determinar la cantidad de arena necesaria según la ecuación: [23]

$$A = (1000 - CP) * \frac{DRA * POA}{100} \tag{15}$$

8. Cálculo de agregado grueso (R):

   Calcular el ripio requerido con la fórmula: [23]

$$R = (1000 - CP) * \frac{DRR * POR}{100} \tag{16}$$

9. Obtención de la dosificación al peso:

   La dosificación final consiste en expresar las cantidades de agua (W), cemento (C), arena (A) y ripio (R) en proporción al peso del cemento: [23]

$$Dosificación = \frac{Cantidad\ de\ material\ (W.A.R.C.)\ por\ m3}{Cantidad\ de\ cemento\ (C)} \quad (17)$$

Corrección por humedad:

Dado que los agregados no siempre estarán en condición SSS (saturados superficialmente secos), es imprescindible realizar una corrección basada en el contenido de humedad, según la norma NTE INEN 862. El proceso se realiza un día antes de la fabricación del hormigón: [23]

$$Arena = Masa\ arena = \frac{100 + \%humedad\ (arena)}{100 + \%absorción\ (arena)} \quad (18)$$

$$Ripio = Masa\ ripio = \frac{100 + \%humedad\ (ripio)}{100 + \%absorción\ (ripio)} \quad (19)$$

B. FASE 2 - COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA ENTRE EL HORMIGÓN TRADICIONAL Y EL HORMIGÓN ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS

En la segunda fase, la metodología aplicada en esta fase corresponde a un enfoque experimental, ya que implica la fabricación de mezclas de hormigón bajo condiciones controladas y la realización de ensayos específicos para medir la resistencia a la compresión. Según lo establecido en la normativa ACI 318-19, la evaluación del concreto endurecido debe realizarse a través de pruebas de resistencia. Esta normativa indica que cada prueba debe basarse en el promedio obtenido de al menos dos cilindros de 150 x 300 mm o tres cilindros de 100 x 200 mm. En cumplimiento con los lineamientos establecidos para el desarrollo experimental, se tiene prevista la elaboración de un total de 40 probetas de hormigón simple, distribuidas en dos grupos de 20 unidades cada uno. El primer grupo estará compuesto por probetas convencionales, fabricadas con agregados gruesos y finos de origen natural, y diseñadas para alcanzar una resistencia característica de f'c = 240 kg/cm², siguiendo las especificaciones normativas para hormigón estructural. Por otro lado, el segundo grupo estará conformado por probetas elaboradas con materiales reciclados, en las cuales el 100% del agregado grueso natural será reemplazado por agregado reciclado de concreto, mientras que el agregado fino será sustituido completamente por el catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC). Esta configuración experimental tiene como objetivo comparar el comportamiento mecánico entre un hormigón tradicional y uno producido con materiales reciclados, evaluando la viabilidad técnica y el impacto en la resistencia a la compresión. [25]

TABLA XVIII

CANTIDAD Y NOMENCLATURA DE ESPECÍMENES

CÓDIGO	CANTIDAD	REEMPLAZO				DÍAS DE CURADO		
		AGR (%)		FCC (%)		7	14	28
		0	100	0	100			
HC - PROT	5	X	-	X	-	-	-	-
HC - PROT								
HC - PROT								
HC - PROT								
HC - PROT								
HC - 1	5	X	-	X	-	X	-	-
HC - 2								
HC - 3								
HC - 4								
HC - 5								
HC - 6	5	X	-	X	-	-	X	-
HC - 7								
HC - 8								
HC - 9								
HC - 10								
HC - 11	5	X	-	X	-	-	-	X
HC - 12								
HC - 13								
HC - 14								
HC - 15								
HR - PROT	5	-	X	-	X	-	-	-
HR - PROT								
HR - PROT								
HR - PROT								
HR - PROT								
HR - 1	5	-	X	-	X	X	-	-
HR - 2								
HR - 3								
HR - 4								
HR - 5								
HR - 6	5	-	X	-	X	-	X	-
HR - 7								
HR - 8								
HR - 9								
HR - 10								

HR - 11	5	-	X	-	X	-	-	X
HR - 12								
HR - 13								
HR - 14								
HR - 15								

1) Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a compresión del hormigón es un procedimiento técnico que evalúa la capacidad del material para resistir fuerzas de compresión sin fallar. Consiste en tomar muestras de concreto en forma de cilindros o cubos, que se curan en condiciones controladas durante un tiempo determinado, generalmente 28 días. Estas muestras se someten a una carga axial progresiva en una máquina de compresión hasta que se produce la fractura. La resistencia máxima alcanzada se expresa en megapascales (MPa) y se utiliza para verificar si el hormigón cumple con las especificaciones de diseño, asegurando la seguridad y durabilidad de las estructuras. Este ensayo es fundamental para la calidad y control del material en la construcción. [26]

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{20}$$

Donde:

$\sigma =$ Resistencia a la compresión del hormigón.

$P =$ Carga máxima soportada.

$A =$ Área de la sección transversal. [26]

El procedimiento para el ensayo de resistencia a la compresión del cemento comienza con la extracción de los especímenes del almacenamiento húmedo, los cuales deben mantenerse húmedos hasta el momento del ensayo, utilizando cualquier método adecuado para asegurar su humedad. Los especímenes se deben romper dentro de los tiempos establecidos para la edad de ensayo correspondiente. Para la prueba, se coloca el bloque de carga plano, con la cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa de la máquina de ensayo, y luego se coloca el espécimen sobre el bloque inferior, asegurándose de alinear correctamente el eje del espécimen con el centro de carga del bloque esférico superior. Antes de aplicar la carga, se debe verificar que el indicador de carga esté ajustado a cero y, en caso necesario, ajustarlo. Se aplica la carga de forma continua y sin impactos, manteniendo una velocidad de carga de 0,25 ± 0,05 MPa/s durante la última mitad de la fase de carga esperada, pudiendo ser mayor en la primera mitad, pero siempre controlada para evitar impactos. La carga se aplica hasta que se observe una disminución constante en el indicador de carga y se evidencie un patrón de fractura definido en el

espécimen. Si el espécimen presenta fracturas fuera de los modelos esperados, se deben registrar y describir. Finalmente, se registra la carga máxima soportada por el espécimen y se anota el tipo de fractura observado, además de examinar el concreto en caso de resistencias menores a las esperadas para identificar posibles fallos en la mezcla. [26]

2) Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, es una propiedad fundamental de los materiales que mide su capacidad para resistir deformaciones elásticas bajo la aplicación de una fuerza. Este módulo se define como la relación entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica del material, es decir, cuando el material retorna a su forma original una vez que se retira la carga. Los ensayos para determinar el módulo de elasticidad generalmente involucran la aplicación de una carga controlada sobre una muestra del material y la medición de su deformación. [25]

En base a la normativa ACI 318-19 el módulo de elasticidad se puede calcular de las siguientes formas:

Para concreto cuyo peso unitario este entre 1440 y 2560 kg/m3. [25]

$$Ec = w_c^{1.5} * 0.043 * \sqrt{f'c}\, MPa \quad (21)$$

Donde:

$Ec =$ Módulo de elasticidad del hormigón.

$wc =$ Peso unitario/Densidad.

$f'c =$ Resistencia especificada a la compresión del hormigón. [25]

Para concreto de peso normal. [25]

$$Ec = 4700 * \sqrt{f'c}\, MPa \quad (22)$$

Donde:

$Ec =$ Módulo de elasticidad del hormigón.

$f'c =$ Resistencia especificada a la compresión del hormigón. [25]

TABLA XIX

TABLA RESUMEN DE LOS ENSAYOS A REALIZAR

ENSAYOS	NORMAS
Contenido de humedad	NTE INEN 862/ASTM C566
Granulometría	NTE INEN 696 - 872/ASTM C136
Densidad real, gravedad específica y capacidad de absorción en agregado fino	NTE INEN 856/ASTM C128

Densidad real, gravedad específica y capacidad de absorción en agregado grueso	NTE INEN 857/ASTM C127
Densidad aparente compactada y suelta de los agregados y de la mezcla	NTE INEN 858/ASTM C29
Resistencia a la abrasión	NTE INEN 861/ASTM C131
Densidad real del cemento	NTE INEN 156/ASTM C188
Resistencia a la compresión	NTE INEN 1573/ACI 318-19
Determinación del asentamiento	NTE INEN 1578/ASTM C143

C. FASE 3 - EVALUAR LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE MATERIALES RECICLADOS EN COMPARACIÓN CON LOS MATERIALES TRADICIONALES

Finalmente, en la tercera fase del estudio, se aplicará una metodología basada en un análisis comparativo de costos. Esta etapa tiene como objetivo evaluar económicamente la viabilidad del uso de mezclas experimentales en comparación con el hormigón tradicional. Para ello, se recopilarán proformas o presupuestos detallados tanto para las mezclas convencionales como para las formulaciones experimentales que incorporan materiales reciclados. El análisis incluirá no solo el costo de adquisición de los materiales, sino también los gastos asociados a su transporte y procesamiento. Es decir, se considerarán todos los factores que influyen en el costo final del producto, desde la extracción o recolección de los insumos hasta su preparación para el uso en la mezcla. La comparación económica se realizará utilizando la herramienta Microsoft Excel, que permitirá organizar los datos de manera estructurada, facilitar cálculos automáticos y generar gráficos que ayuden a visualizar las diferencias entre ambas alternativas. De este modo, se podrá determinar si las mezclas experimentales representan una opción más rentable o competitiva frente al hormigón tradicional, sin comprometer sus propiedades técnicas.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A. FASE 1 - ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS

En la Fase 1 se analizaron las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, como granulometría, peso específico y resistencia a la abrasión. Los resultados indican que los materiales en su mayoría cumplen con las especificaciones técnicas, lo que garantiza su idoneidad para su uso en mezclas de concreto.

1) Contenido de humedad

- Agregado grueso

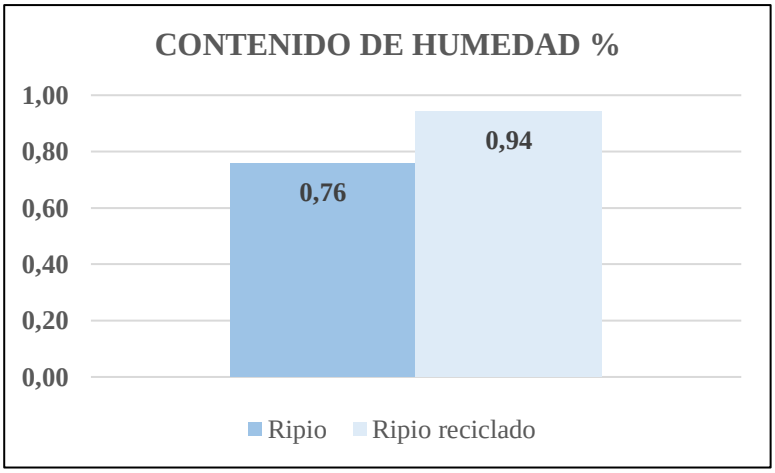


Fig. 2. Comparación de contenido de humedad del agregado grueso

- Agregado fino

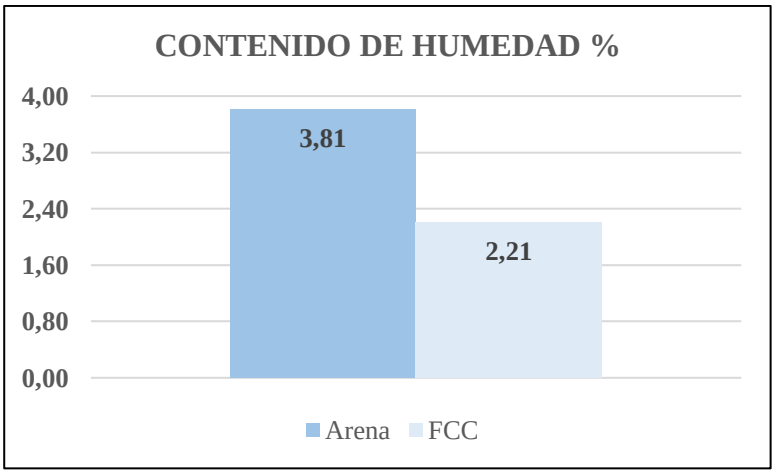


Fig. 3. Comparación de contenido de humedad del agregado fino

El análisis del contenido de humedad, según la Fig. 2, mostró diferencias entre los agregados tradicionales y reciclados. En el caso del agregado grueso, el ripio presentó una humedad de 0,76%, mientras que el ripio reciclado alcanzó un 0,94%, indicando una

mayor capacidad de retención de agua en los materiales reciclados, posiblemente debido a su mayor porosidad. Para los agregados finos, según la Fig. 3, la arena registró un contenido de humedad de 3,81%, superior al 2,21% observado en el catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC).

2) Granulometría

- Agregado grueso

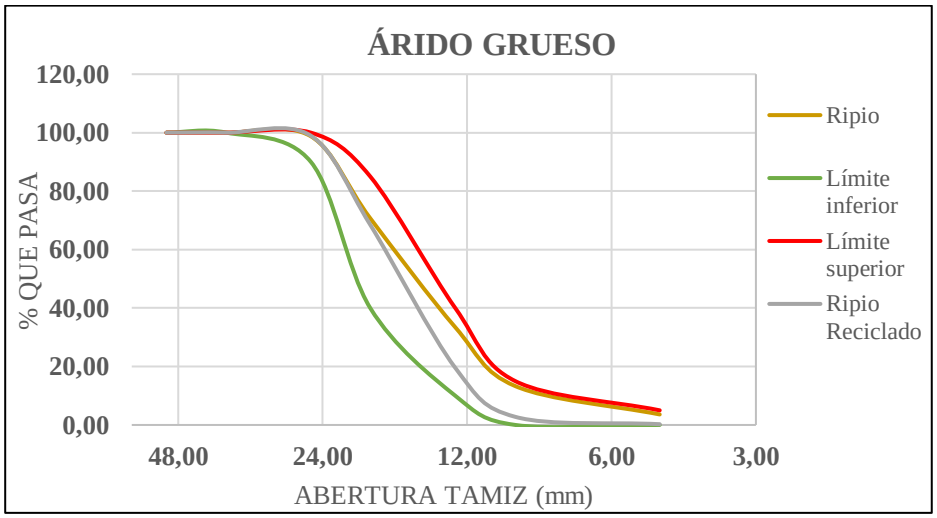


Fig. 4. Comparación de la granulometría del agregado grueso

- Agregado fino

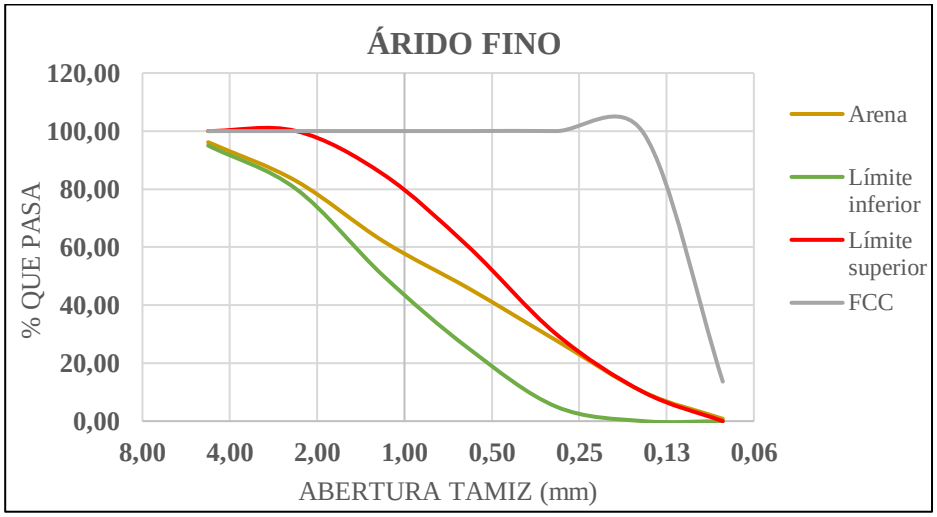


Fig. 5. Comparación de la granulometría del agregado fino

Según la Fig. 4, la arena natural cumple con los requisitos de granulometría, con un paso del 96,16% en el tamiz #4 y valores gradualmente decrecientes hasta un 0,8% en el tamiz #200, lo que indica una adecuada graduación. En el caso del FCC, aunque presenta un mayor porcentaje retenido en tamices finos (#100 y #200), con un 13,63% pasando el tamiz #200, aún puede ser considerado para mezclas siempre que se controle su efecto

sobre la trabajabilidad. Se recomienda precaución en el uso del FCC por su contenido más alto de partículas finas, que podría aumentar la demanda de agua y afectar la cohesión de la mezcla. En el caso de la Fig. 5, el ripio natural presenta una curva bien graduada, con una retención progresiva desde el tamiz de 2" hasta el #4, siendo el 98,76% retenido en el tamiz de 1". El ripio reciclado, por su parte, presenta una distribución similar, aunque con una ligera variación en los porcentajes retenidos, destacando un 59,55% en el tamiz de 1/2", lo que indica una mayor proporción de partículas medianas.

3) Densidad real, gravedad específica y capacidad de absorción en agregado fino

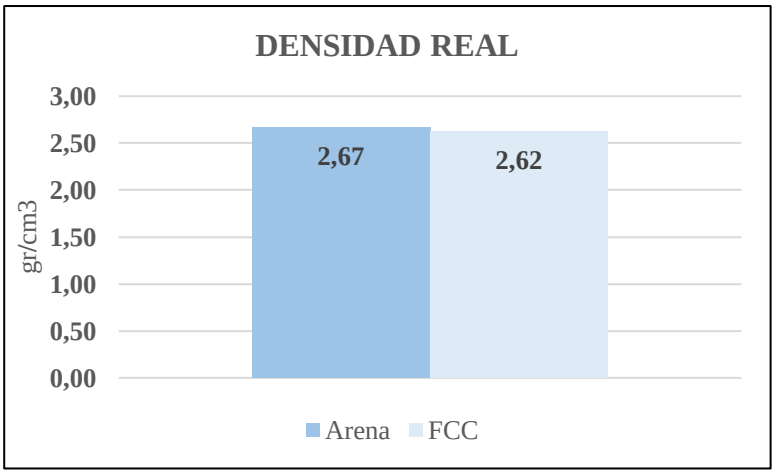


Fig. 6. Comparación de la densidad real del agregado fino

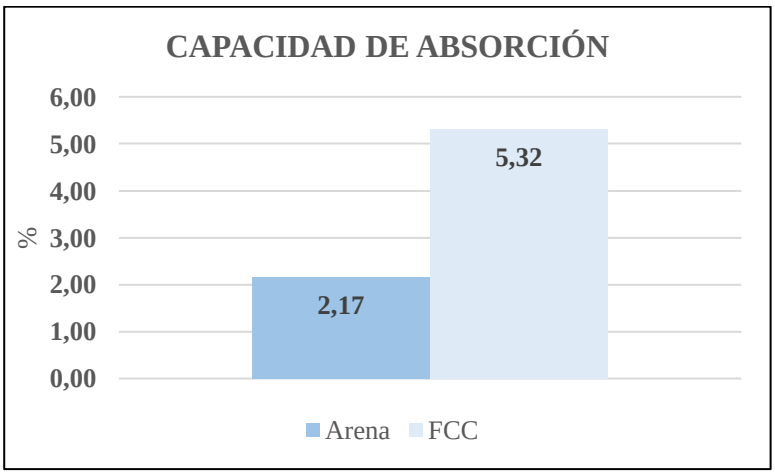


Fig. 7. Comparación de la capacidad de absorción del agregado fino

En el caso del agregado fino, según la Fig. 6 y la Fig. 7, la arena natural presentó una densidad real de 2,67 g/cm³ y una capacidad de absorción del 2,17%, mientras que el fino de FCC mostró una densidad ligeramente menor de 2,62 g/cm³, pero con una capacidad de absorción significativamente mayor del 5,32%. Estos resultados indican que, aunque la arena es ligeramente más densa, el FCC es considerablemente más poroso, lo que implica una mayor demanda de agua en la mezcla. Esta porosidad podría afectar la

trabajabilidad y requerir ajustes en la relación agua/cemento para evitar disminuciones en la resistencia del hormigón.

4) Densidad real, gravedad específica y capacidad de absorción en agregado grueso

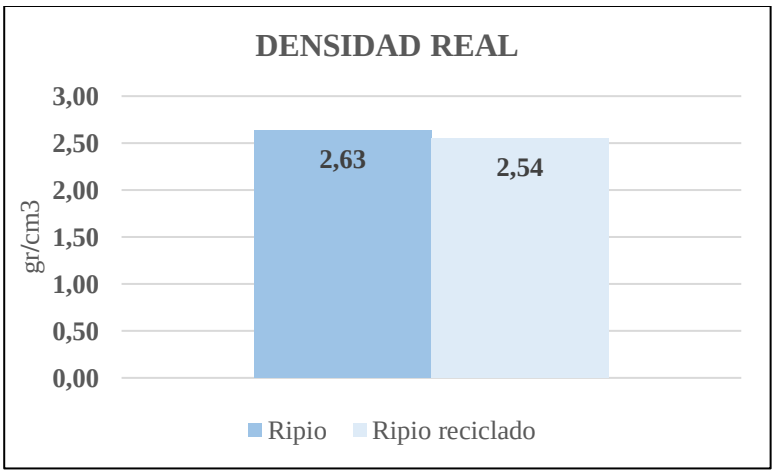


Fig. 8. Comparación de la densidad real del agregado grueso

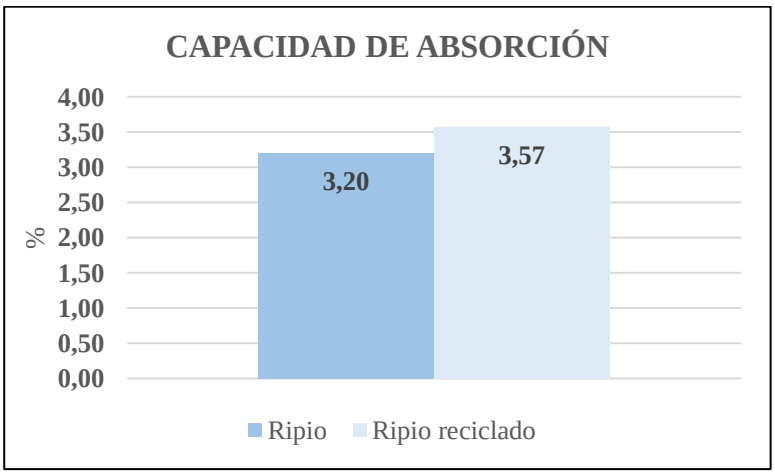


Fig. 9. Comparación de la capacidad de absorción del agregado grueso

En los agregados gruesos, según la Fig. 8 y la Fig. 9, el ripio natural presentó una densidad de 2,63 g/cm³ y una absorción de 3,20%, mientras que el ripio reciclado mostró una densidad menor de 2,54 g/cm³ y una mayor absorción de 3,57% respectivamente, lo cual es coherente con su origen y mayor porosidad.

5) Densidad aparente compactada y suelta de los agregados y de la mezcla

- Agregado grueso

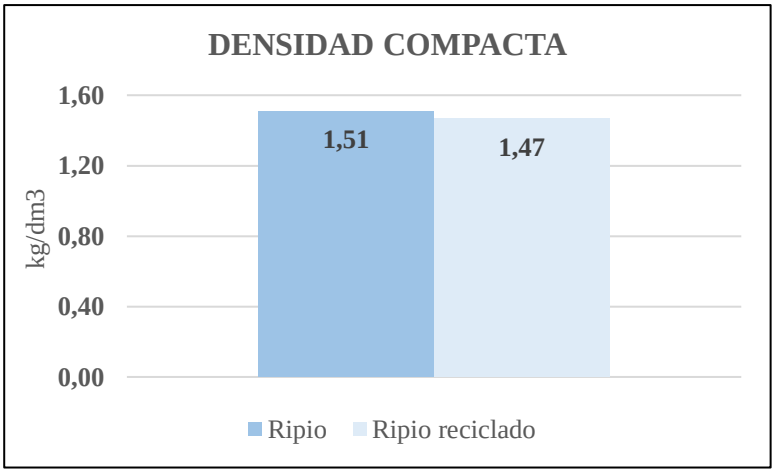


Fig. 10. Comparación de la densidad compactada del agregado grueso

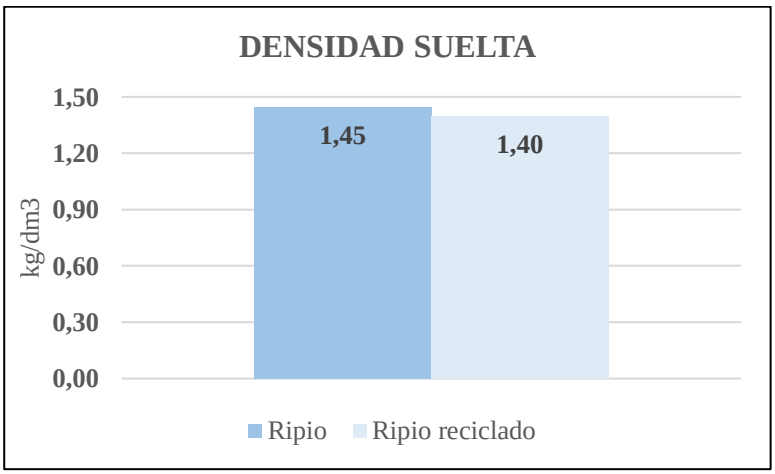


Fig. 11. Comparación de la densidad suelta del agregado grueso

En el caso del agregado grueso, según la Fig. 10 y Fig. 11, el ripio natural presentó una densidad suelta de 1,45 kg/dm³ y compacta de 1,51 kg/dm³, mientras que el ripio reciclado registró valores ligeramente menores: 1,40 kg/dm³ y 1,47 kg/dm³ respectivamente, lo cual es coherente con su origen y mayor porosidad.

- Agregado fino

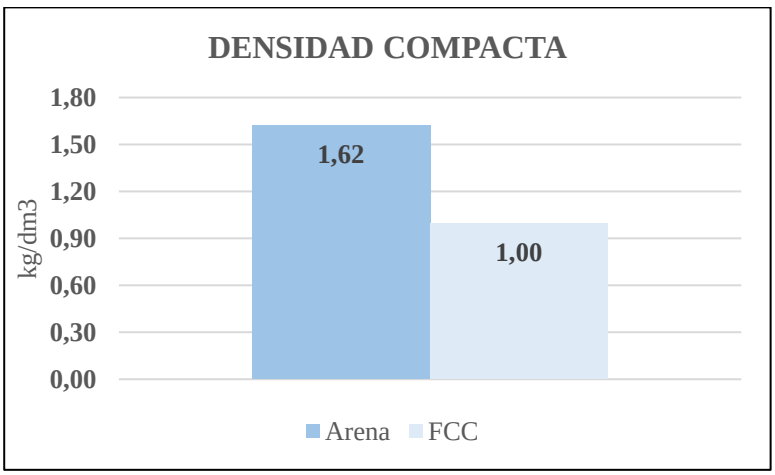


Fig. 12. Comparación de la densidad compactada del agregado fino

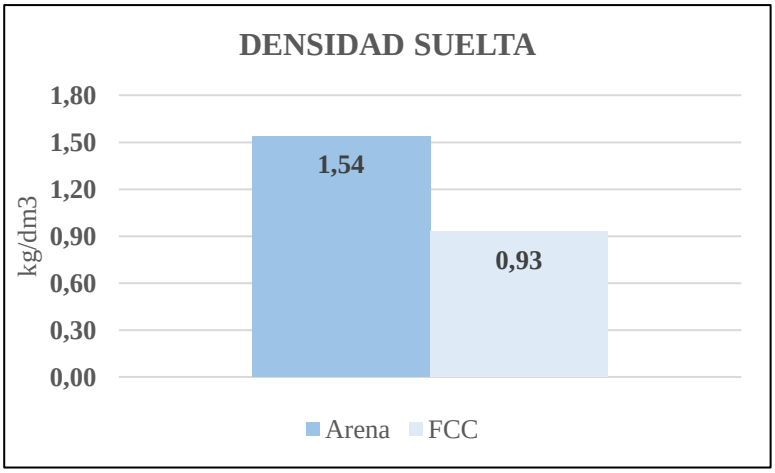


Fig. 13. Comparación de la densidad suelta del agregado fino

Para los agregados finos, según la Fig. 12 y Fig. 13, la arena mostró una densidad suelta de 1,54 kg/dm³ y compacta de 1,62 kg/dm³, mientras que el fino reciclado (FCC) presentó los valores más bajos, con 0,93 kg/dm³ y 1,00 kg/dm³. Estos resultados indican que la arena es el agregado fino más denso, lo que favorece la compacidad de la mezcla; por el contrario, la baja densidad del FCC podría incrementar la porosidad y requerir ajustes en la dosificación de agua para mantener la trabajabilidad y la relación agua/cemento.

- Mezcla de agregados naturales

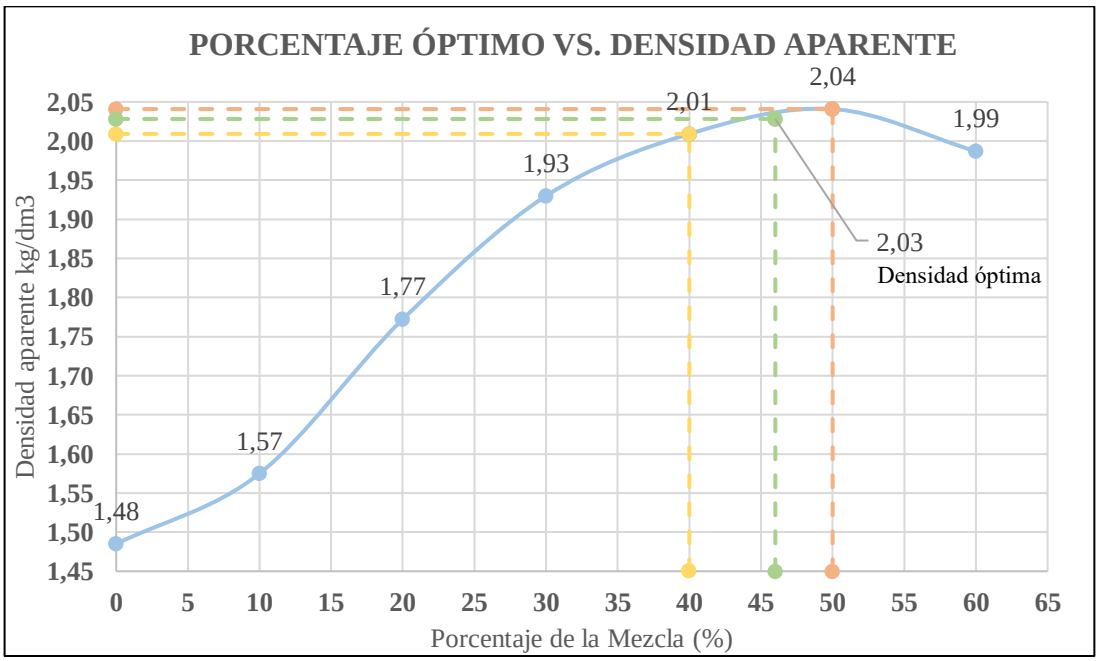


Fig. 14. Comparación de contenido de humedad del agregado grueso

Con base a la Fig. 14, se observa que la densidad aparente de la mezcla de agregados gruesos y finos aumenta progresivamente conforme se incrementa el porcentaje de agregado fino en la mezcla, hasta alcanzar un punto máximo. A partir de una mezcla 100%

de agregado grueso (sin fino), la densidad aparente es de 1,48 kg/dm³. A medida que se incorpora mayor proporción de agregado fino, esta densidad mejora significativamente, alcanzando un valor máximo de 2,04 kg/dm³ en la mezcla 50% grueso – 50% fino. Este comportamiento responde al principio de compactación óptima, donde las partículas más pequeñas (finos) rellenan los vacíos entre las partículas más grandes (gruesos), reduciendo el volumen total de vacíos y aumentando la masa por unidad de volumen. Sin embargo, al superar el 50% de agregado fino, la densidad comienza a disminuir ligeramente, evidenciando que un exceso de fino reduce la eficiencia del empaque por saturación del sistema. El valor máximo obtenido (2,04 kg/dm³) se encuentra muy cercano a la densidad óptima teórica reportada (2,03 kg/dm³), lo que confirma que la mezcla 50-50 logra la mejor compactación posible en este conjunto de datos.

- Mezcla de agregados reciclados

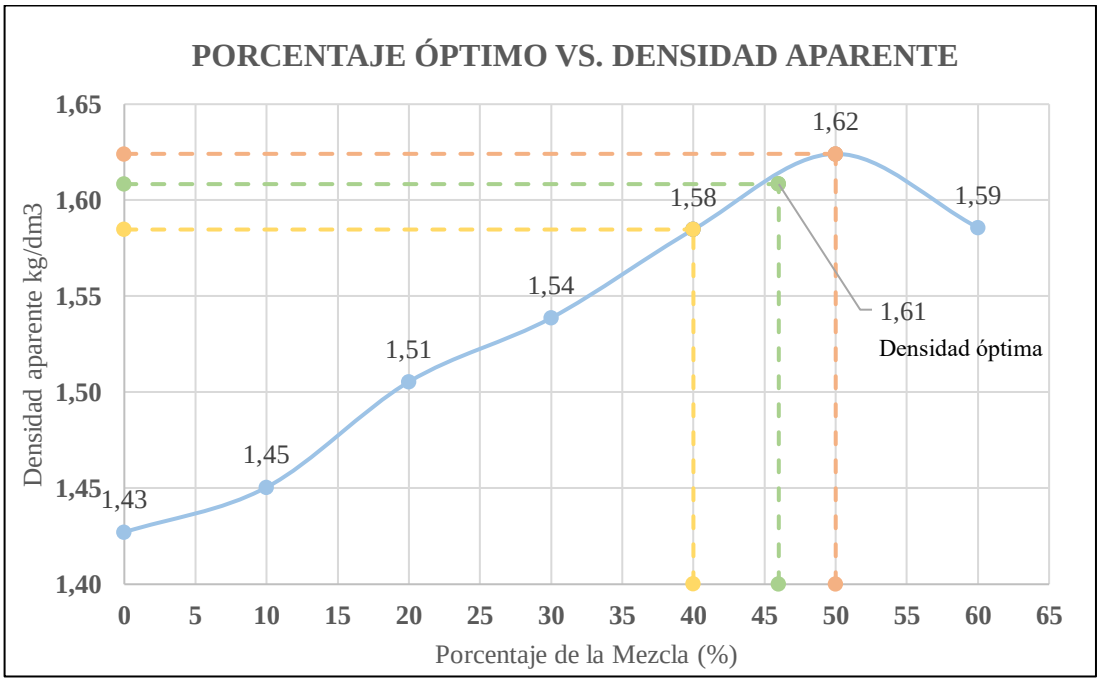


Fig. 15. Densidad y porcentaje óptimo de la mezcla de agregados reciclados

En la Fig. 15 se presenta la variación de la densidad aparente de una mezcla de agregados (grueso y fino) en función del porcentaje de fino añadido. Se observa una tendencia clara: a medida que se incrementa el porcentaje de agregado fino, la densidad aparente de la mezcla aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor máximo, y luego comienza a decrecer levemente. La densidad aparente inicia en 1.43 Kg/dm³ para la mezcla 100% grueso y 0% fino, y alcanza su punto óptimo en 1.61 Kg/dm³ cuando la mezcla contiene un 50% de agregado fino, correspondiente a una cantidad de 13.33 kg de fino añadido. Este comportamiento se explica porque los finos rellenan los vacíos entre

las partículas del agregado grueso, reduciendo la porosidad y aumentando la compacidad de la mezcla. Sin embargo, al superar esta proporción óptima, el exceso de fino comienza a desplazar al grueso, generando una matriz menos densa por una mayor proporción de partículas pequeñas con mayor área superficial y más espacios interparticulares. Esto se evidencia en la disminución de la densidad aparente a partir del 60% de fino. Por lo tanto, se concluye que la mezcla más eficiente en términos de densidad aparente se encuentra alrededor del 50% de agregado fino, coincidiendo con la "densidad óptima" indicada en la figura.

6) Resistencia a la abrasión

TABLA XX

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

MUESTRA	MASA INICIAL (G)	MASA RETENIDA (G)	PÉRDIDA POR ABRASIÓN (%)
Ripio natural	5000	3850	23.0%
Ripio reciclado	5000	3450	35.0%

Los resultados del ensayo de abrasión, según la Tabla XX, revelan diferencias significativas en el comportamiento de los materiales evaluados. El ripio natural presentó una pérdida por abrasión del 23,0%, mientras que el ripio reciclado mostró una pérdida mayor, del 35,0%. Esta diferencia indica que el ripio natural posee una mayor resistencia al desgaste superficial, lo cual se traduce en un mejor desempeño frente a condiciones de fricción o impactos mecánicos repetidos. En cambio, el mayor porcentaje de pérdida del ripio reciclado evidencia su menor durabilidad ante la abrasión, lo cual puede atribuirse a su naturaleza más porosa, la presencia de partículas con adherencias débiles de pasta de cemento vieja y la posible existencia de fisuras internas producto de su proceso de reciclaje.

7) Densidad real del cemento

TABLA XXI

ENSAYO DE DENSIDAD REAL DEL CEMENTO

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
m1	Masa del picnómetro	gr	145,20
m2	Masa del picnómetro + Cemento	gr	209,20
m3	Masa del picnómetro + Cemento + Gasolina	gr	561,10
m4 = m3 - m2	Masa de la gasolina añadida	gr	351,90
m5	Masa del picnómetro + 500 cm3 de gasolina	gr	512,80

m6 = m5 - m1	Masa de 500 cm3 de gasolina	gr	367,60
DG = m6/500cm3	Densidad de la gasolina	gr/cm3	0,74
m7 = m6 - m4	Masa de la gasolina desalojada por el cemento	gr	15,70
Msss = m2 - m1	Masa del cemento	gr	64,00
Vsss = m7/DA	Volumen de gasolina desalojada	cm3	21,35
DRA = Msss/Vsss	**Densidad real del cemento**	gr/cm3	3,00

En el caso del cemento, según la Tabla XXI, se determinó una densidad real de 3,00 g/cm³ mediante el método del picnómetro con gasolina. Para ello, se utilizó una masa de cemento de 64,00 g y se registró un desplazamiento de 21,35 cm³ de gasolina. Esta densidad indica que el cemento es un material compacto, con muy baja porosidad interna, lo cual es coherente con su naturaleza pulverulenta y su comportamiento en mezclas cementicias. Además, la baja densidad de la gasolina utilizada (0,74 g/cm³) permitió una medición precisa del volumen desplazado, asegurando la fiabilidad del valor obtenido.

8) Análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX)

- Catalizador FCC

TABLA XXII

ANÁLISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Elemento	**Muestra 1**
	Contenido (%)
Si	25,86
Al	23,72
La	2,46
Ti	0,62
Fe	0,60
Na	0,22
P	0,11
K	0,10
Mg	0,09
Y	0,06
S	0,06
Ca	0,05
V	0,04
Ni	0,02
Zn	0,01
Zr	0,01

Según la Tabla XXII, los elementos más abundantes en la muestra son el silicio (25,86%) y el aluminio (23,72%), los cuales indican que la estructura básica del material corresponde a una zeolita de tipo Y, comúnmente empleada como fase activa en

catalizadores FCC. Esta matriz aluminosilicatada posee propiedades ácidas y una alta superficie específica, características que, aunque se degradan con el tiempo en el reactor, continúan presentes en el catalizador agotado. Esta composición lo convierte en un candidato potencial para su reutilización en aplicaciones como material cementante suplementario (MCS) o en la fabricación de concretos ecoeficientes. El contenido significativo de lantano es coherente con la formulación de los catalizadores FCC, donde este elemento actúa como estabilizador de la estructura zeolítica, mejorando su resistencia térmica e hidrotermal. Su presencia confirma el origen catalítico del residuo y, aunque no participa directamente en reacciones cementicias, su cuantificación es importante para caracterizar el material completamente. Además, al ser un metal de tierras raras, su presencia puede tener implicaciones en la valorización del residuo o en restricciones normativas ambientales. Se identificaron otros elementos en menores proporciones, pero que también resultan relevantes: Titanio (0,62%) y Hierro (0,60%): Comunes en catalizadores debido a la contaminación con metales presentes en las cargas de refinería. El hierro, en particular, puede influir en la coloración del cemento y en su comportamiento durante el curado. Sodio (0,22%), Potasio (0,10%) y Calcio (0,05%): Estos elementos alcalinos y alcalinotérreos pueden afectar la durabilidad del concreto, especialmente por su posible participación en la reacción álcali-sílice (ASR) si no se controlan adecuadamente. Fósforo (0,11%) y Azufre (0,06%): Provienen de impurezas del petróleo o aditivos utilizados durante el ciclo de vida del catalizador. Estos elementos, si bien están en bajas concentraciones, podrían afectar la hidratación del cemento o generar compuestos secundarios en la matriz del concreto. Níquel, Zinc, Vanadio, Circonio y Ytrio, todos en concentraciones por debajo del 0,1%, se asocian generalmente con la acumulación de metales traza durante el proceso de craqueo. Aunque en pequeñas proporciones, algunos de estos metales pueden presentar riesgos ambientales si se lixivian, por lo que su presencia justifica evaluaciones toxicológicas y de lixiviación.

9) Dosificación del hormigón

- Agregados naturales

TABLA XXIII

DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS NATURALES

DOSIFICACIÓN - MÉTODO DENSIDAD ÓPTIMA					
DATOS DE ENSAYOS			**DATOS DE TABLAS**		
DRC	3,000	kg/dm³	f'c	**240**	kg/cm²
DRA	2,670	kg/dm³	W/C	**0,56**	

DRR	2,630	kg/dm³	Asentamiento	**9**	cm
DAAs	1,640	kg/dm³	**CÁLCULOS**		
DARs	1,450	kg/dm³	DRM	2,648	kg/dm³
DAAc	1,62	kg/dm³	POV	23,35	%
DARc	1,45	kg/dm³	CP	279,18	dm³
MFA	2,760		C	312,52	kg
DOM	2,03	kg/dm³	W	175,01	lts
POR	54	%	A	885,31	kg
POA	46	%	R	1023,70	kg
CAA	2,17	%	Cantidad Requerida	20	Cil (D=10 cm)
CAR	3,2	%	Rendimiento	**61,13**	%
CHA	3,81	%	VR	0,024	m3
CHR	0,76	%	VN	0,033	m3

DOSIFICACIÓN					
Material	**Cantidad en kg por cada m³ de hormigón**	**Dosificación al peso**	**Cantidad por saco de 50 kg de cemento (kg)**	**Dosificación al volumen en obra**	**Cantidad requerida por rendimiento y/o humedad (kg)**
W	175,01	0,56	29,50	29,50 L	6,07
C	312,52	1,00	50,00	1,00 Sac. 50kg	10,23
A	885,31	2,83	144,00	3,30 Parh.	29,44
R	1023,70	3,28	159,50	4,10 Parh.	32,68

Según la Tabla XXIII, la dosificación del hormigón con agregados naturales, realizada mediante el método de densidad óptima, se diseñó para alcanzar una resistencia característica de f'c = 240 kg/cm², con una relación agua/cemento (a/c) de 0,56 y un asentamiento objetivo de 9 cm, lo cual sugiere una mezcla con buena trabajabilidad y adecuada para aplicaciones convencionales en obra. Los materiales utilizados presentaron densidades reales y aparentes dentro de los rangos típicos: el agregado grueso natural (DRA) tuvo una densidad real de 2,670 kg/dm³, y el agregado fino (DAAs) una densidad aparente de 1,640 kg/dm³, indicando buena compacidad y bajo contenido de vacíos. El contenido de cemento fue de 312,52 kg/m³, con 175,01 litros de agua, valores coherentes con mezclas de resistencia media y asentamientos moderados. En cuanto a los agregados, se emplearon 885,31 kg/m³ de arena y 1023,70 kg/m³ de grava, reflejando una proporción A/R bien equilibrada para asegurar tanto la cohesión de la mezcla como su trabajabilidad. El rendimiento estimado fue de 61,13 %, y el volumen neto útil por mezcla se calculó en 0,033 m³, lo que permitió la elaboración precisa de 20 cilindros de ensayo. Los valores de contenido de aire (CAA = 2,17 %, CAR = 3,2 %) y de vacíos (POV = 23,35 %) se encuentran dentro de márgenes aceptables, lo que respalda la compactación adecuada y la baja porosidad del hormigón. Estos resultados indican que la mezcla está bien

proporcionada para asegurar una adecuada durabilidad y resistencia mecánica, con baja probabilidad de segregación o exudación. En general, la dosificación es eficiente tanto técnica como económicamente, permitiendo un control razonable en obra y un comportamiento previsible del hormigón en estado fresco y endurecido. Para la elaboración de las mezclas de hormigón, se utilizó el programa Hormigón Maestro, una herramienta desarrollada como parte del proyecto de tesis de la señorita Valeria Nayelly Velastegui Solís. Este software facilitó la obtención de dosificaciones precisas en función de los requerimientos de resistencia y trabajabilidad establecidos, considerando tanto agregados naturales como reciclados. La aplicación permitió optimizar los diseños de mezcla mediante el ajuste automático de proporciones de cemento, agua, agregados y aditivos, garantizando una distribución coherente de materiales en cada lote de fabricación. Gracias al uso de esta herramienta, se logró estandarizar el proceso de dosificación y reducir el margen de error en la preparación de las probetas, lo que contribuyó significativamente a la confiabilidad de los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados. [27]

- Agregados reciclados

TABLA XXIV

DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS RECICLADOS

DOSIFICACIÓN - MÉTODO DENSIDAD ÓPTIMA					
DATOS DE ENSAYOS			**DATOS DE TABLAS**		
DRC	3,000	kg/dm³	f'c	**240**	kg/cm²
DRA	2,620	kg/dm³	W/C	**0,56**	
DRR	2,540	kg/dm³	Asentamiento	**4**	cm
DAAs	0,930	kg/dm³	**CÁLCULOS**		
DARs	1,400	kg/dm³	DRM	2,577	kg/dm³
DAAc	1	kg/dm³	POV	37,52	%
DARc	1,47	kg/dm³	CP	417,71	dm³
MFA	0,010		C	467,58	kg
DOM	1,61	kg/dm³	W	261,85	lts
POR	54	%	A	701,78	kg
POA	46	%	R	798,67	kg
CAA	5,32	%	Cantidad Requerida	20	Cil (D=10 cm)
CAR	3,57	%	Rendimiento	**54,99**	%
CHA	2,21	%	VR	0,024	m3
CHR	0,94	%	VN	0,034	m3
DOSIFICACIÓN					

Material	Cantidad en kg por cada m³ de hormigón	Dosificación al peso	Cantidad por saco de 50 kg de cemento (kg)	Dosificación al volumen en obra	Cantidad requerida por rendimiento y/o humedad (kg)
W	261,85	0,56	32,50	32,50 L	10,41
C	467,58	1,00	50,00	1,00 Sac. 50kg	15,98
A	701,78	1,50	72,50	2,90 Parh.	23,23
R	798,67	1,71	83,00	2,20 Parh.	26,57

Según la Tabla XXIV, la dosificación del hormigón con agregados reciclados al 100 % fue desarrollada con el objetivo de alcanzar una resistencia característica de f'c = 240 kg/cm², manteniendo una relación agua/cemento (a/c) de 0,56, igual que en la mezcla convencional. No obstante, los resultados revelan diferencias sustanciales en las propiedades del concreto. El asentamiento se redujo drásticamente a 4 cm, lo que indica una menor trabajabilidad, probablemente debido a la alta absorción de agua y textura rugosa de los agregados reciclados, lo que requiere mayor atención durante el mezclado y colocación en obra. El contenido de cemento se incrementó a 467,58 kg/m³, notablemente superior al utilizado con agregados naturales (312,52 kg/m³), con un consumo de agua también elevado (261,85 l/m³). Este aumento refleja la necesidad de compensar la porosidad y menor calidad estructural de los materiales reciclados para alcanzar la misma resistencia objetivo. Sin embargo, esta modificación compromete la sostenibilidad del diseño, al aumentar el uso de cemento —el componente más intensivo en emisiones de CO_2— y agua, lo que podría contradecir los beneficios ambientales del reciclaje. Los agregados reciclados utilizados fueron 701,78 kg/m³ de arena reciclada y 798,67 kg/m³ de grava reciclada, lo que representa una dosificación más ligera en comparación con los naturales, en parte debido a su menor densidad aparente. Asimismo, el porcentaje de vacíos (POV) fue de 37,52 %, significativamente mayor que en la mezcla con agregados naturales (23,35 %), lo que evidencia una estructura interna menos compacta y más propensa a defectos como fisuras o permeabilidad. Esto también explica el menor rendimiento volumétrico (54,99 %) y la necesidad de una mayor cantidad de pasta para llenar los vacíos. En general, aunque la mezcla con agregados reciclados cumple con el requerimiento de resistencia teórica gracias al ajuste en la dosificación de cemento y agua, presenta desventajas importantes en términos de trabajabilidad, durabilidad potencial y eficiencia de materiales. Este tipo de mezcla puede ser adecuado para aplicaciones no estructurales o de baja exigencia, pero requiere mejoras técnicas —como aditivos, pretratamiento de agregados o uso parcial de reciclado— para ser

verdaderamente competitiva frente al hormigón convencional. Para la elaboración de las mezclas de hormigón, se utilizó el programa Hormigón Maestro, una herramienta desarrollada como parte del proyecto de tesis de la señorita Valeria Nayelly Velastegui Solís. Este software facilitó la obtención de dosificaciones precisas en función de los requerimientos de resistencia y trabajabilidad establecidos, considerando tanto agregados naturales como reciclados. La aplicación permitió optimizar los diseños de mezcla mediante el ajuste automático de proporciones de cemento, agua, agregados y aditivos, garantizando una distribución coherente de materiales en cada lote de fabricación. Gracias al uso de esta herramienta, se logró estandarizar el proceso de dosificación y reducir el margen de error en la preparación de las probetas, lo que contribuyó significativamente a la confiabilidad de los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados. [27]

B. FASE 2 - COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA ENTRE EL HORMIGÓN TRADICIONAL Y EL HORMIGÓN ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS

En la Fase 2 se comparó la resistencia a la compresión del hormigón tradicional con la del hormigón elaborado con agregados reciclados. Los resultados mostraron que el hormigón con agregados reciclados presentó una resistencia considerablemente baja, ubicándose por debajo de los rangos aceptables para aplicaciones estructurales, lo que limita su uso a elementos no estructurales o de baja exigencia mecánica.

TABLA XXV

NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS

NOMENCLATURA	DETALLE
HC - PROT	Prototipo del hormigón convencional
HC -	Hormigón convencional
HR - PROT	Prototipo del hormigón reciclado
HR -	Hormigón reciclado

1) Resistencia a la compresión

- Asentamiento

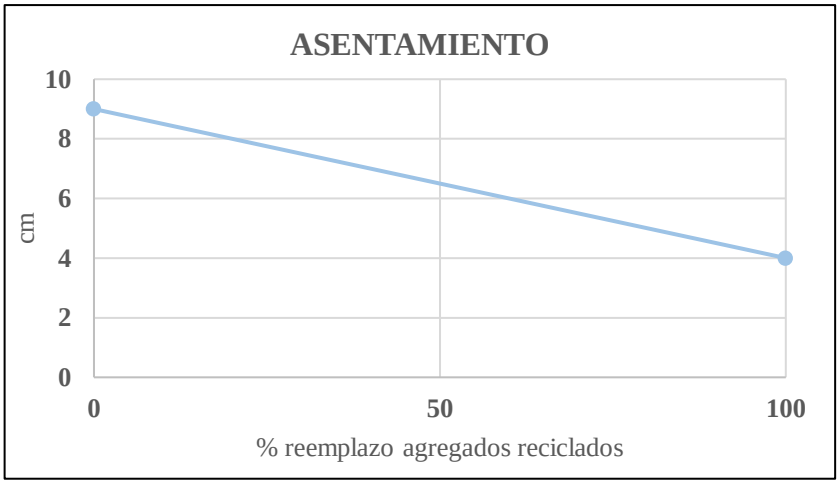


Fig. 16. Comparación del asentamiento del hormigón según su porcentaje de reemplazo de agregados reciclados

La Fig. 16 muestra la relación entre el porcentaje de reemplazo de agregados reciclados y el asentamiento del hormigón fresco, evidenciando una disminución progresiva de la trabajabilidad conforme aumenta el uso de materiales reciclados. Con un 0% de reemplazo, el hormigón alcanza un asentamiento de aproximadamente 9 cm, lo que indica una mezcla con buena fluidez. Sin embargo, al incrementar el reemplazo al 100%, el asentamiento desciende hasta 4 cm, reflejando una mezcla más seca y menos manejable. Esta tendencia puede atribuirse a las características físicas de los agregados reciclados, que suelen tener una mayor porosidad, forma irregular y mayor absorción de agua en comparación con los agregados naturales. Estos factores reducen la cantidad de agua libre disponible en la mezcla, afectando directamente su trabajabilidad. Como resultado, el hormigón con altos porcentajes de agregado reciclado puede requerir ajustes en la dosificación de agua o el uso de aditivos plastificantes para mantener una consistencia adecuada durante el proceso de colocación.

- 7 días

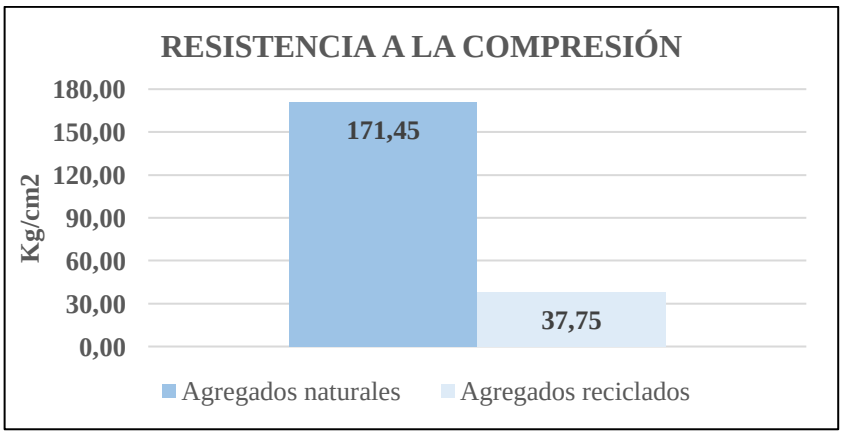


Fig. 17. Comparación de la resistencia a la compresión a los 7 días

Los resultados obtenidos, según la Fig. 17, en la resistencia a compresión del hormigón a los 7 días muestran una diferencia significativa entre las mezclas elaboradas con agregados naturales y las que utilizaron agregados reciclados. En concreto, el hormigón con agregados naturales alcanzó una resistencia de 171,45 kg/cm², mientras que el hormigón con agregados reciclados apenas logró 37,75 kg/cm², lo que representa una disminución del 78% aproximadamente. Esta reducción puede atribuirse a diversas características de los agregados reciclados, como su mayor porosidad, absorción de agua y menor adherencia con la pasta de cemento, factores que influyen negativamente en el desarrollo de la resistencia mecánica del material. Además, la posible presencia de impurezas o residuos de materiales antiguos puede comprometer la calidad de la mezcla.

- 14 días

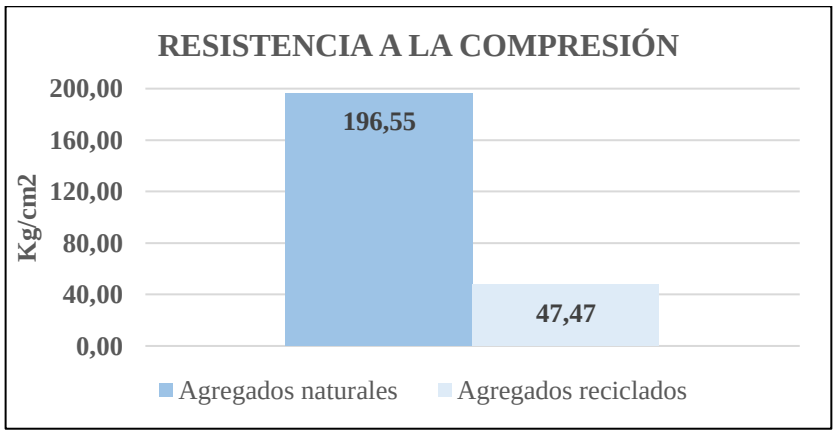


Fig. 18. Comparación de la resistencia a la compresión a los 14 días

Los resultados obtenidos, según la Fig. 18, a los 14 días de curado muestran una diferencia significativa en la resistencia a compresión del hormigón elaborado con agregados naturales frente al elaborado con agregados reciclados. Específicamente, el hormigón con agregados naturales alcanzó una resistencia de 196,55 kg/cm², mientras que el hormigón con agregados reciclados apenas logró 47,47 kg/cm². Esta disminución del 75.9% en la resistencia sugiere que el uso de agregados reciclados afecta negativamente el desarrollo de las propiedades mecánicas del hormigón en esta etapa temprana. Esta diferencia puede atribuirse a varios factores, como la menor calidad y mayor porosidad de los agregados reciclados, así como la posible presencia de impurezas o restos de mortero adherido, lo cual reduce la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados. Además, la absorción de agua por parte de los agregados reciclados podría modificar la relación agua/cemento efectivo, influyendo negativamente en la hidratación del cemento.

- 28 días

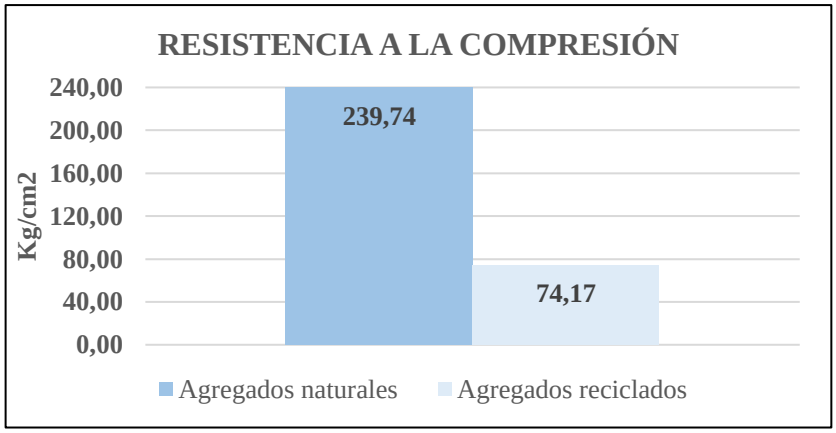


Fig. 19. Comparación de la resistencia a la compresión a los 28 días

Al comparar los resultados de resistencia a compresión a los 28 días, según la Fig. 19, se observa una diferencia significativa entre el hormigón elaborado con agregados naturales y aquel fabricado con agregados reciclados. El hormigón con agregados naturales alcanzó una resistencia de 239,74 kg/cm², mientras que el hormigón con agregados reciclados sólo logró 74,17 kg/cm², lo que representa una disminución aproximada del 69%. Esta reducción sustancial en la resistencia puede atribuirse a varias causas, entre ellas la menor calidad y mayor porosidad de los agregados reciclados, los cuales suelen provenir de residuos de construcción y demolición con restos de mortero adherido y microfisuras.

- Resistencia agregados naturales

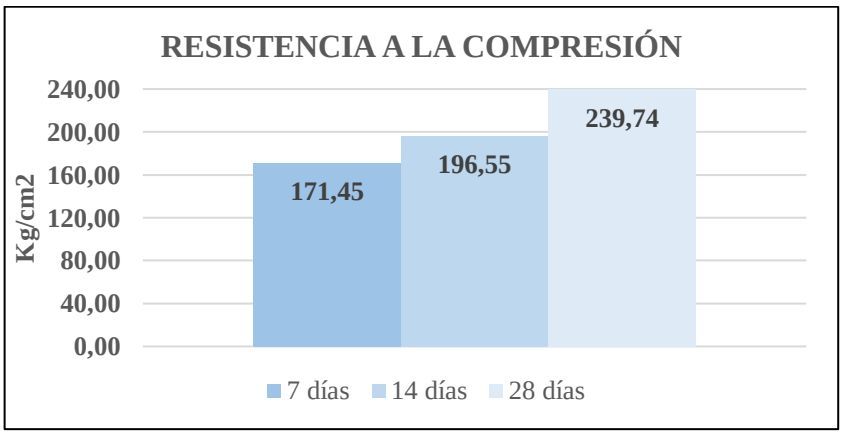


Fig. 20. Comparación de la resistencia del hormigón con agregados naturales

Los resultados obtenidos en la Fig. 20 muestran una evolución progresiva en la resistencia a compresión del hormigón elaborado con agregados naturales, alcanzando valores de 171,45 kg/cm² a los 7 días, 196,55 kg/cm² a los 14 días y 239,74 kg/cm² a los 28 días. Esta tendencia creciente es consistente con el comportamiento esperado del hormigón, el cual continúa su proceso de hidratación del cemento con el tiempo, generando mayor desarrollo de la resistencia mecánica. Se observa un incremento del

14,64% entre los días 7 y 14, y un aumento más significativo del 22% entre los días 14 y 28, lo que indica que el mayor desarrollo de resistencia ocurre en la etapa final del periodo estándar de curado. Estos resultados confirman que el hormigón con agregados naturales presenta un buen desempeño mecánico y cumple con los parámetros típicos de evolución de resistencia, lo cual lo hace adecuado para aplicaciones estructurales donde se requiere un desarrollo progresivo de la capacidad de carga.

- Resistencia agregados reciclados

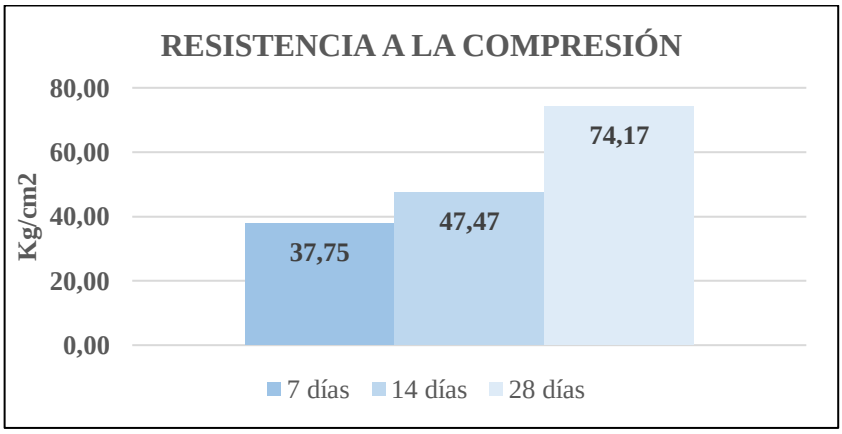


Fig. 21. Comparación de la resistencia del hormigón con agregados reciclados

En base a la Fig. 21, el comportamiento del hormigón con agregados reciclados a lo largo del tiempo muestra un incremento progresivo en la resistencia a la compresión, alcanzando los 74,17 kg/cm² a los 28 días. A los 7 días, la resistencia fue de 37,75 kg/cm², aumentando a 47,47 kg/cm² a los 14 días, lo que representa un crecimiento del 25,7 %. Posteriormente, entre los 14 y 28 días, la resistencia incrementó un 56,3 %, evidenciando una ganancia significativa en la etapa final de curado. Este patrón de desarrollo de resistencia es característico del hormigón, aunque en este caso, los valores obtenidos son relativamente bajos si se comparan con los hormigones convencionales. Esto puede atribuirse a la naturaleza de los agregados reciclados, que suelen presentar mayor porosidad y menor adherencia con la pasta de cemento, afectando la resistencia global del material. Sin embargo, el notable aumento entre los 14 y 28 días sugiere que, con un diseño adecuado de mezcla y un proceso de curado controlado, el uso de agregados reciclados puede ser una alternativa viable en aplicaciones no estructurales o de baja exigencia mecánica.

- Edad vs. Resistencia

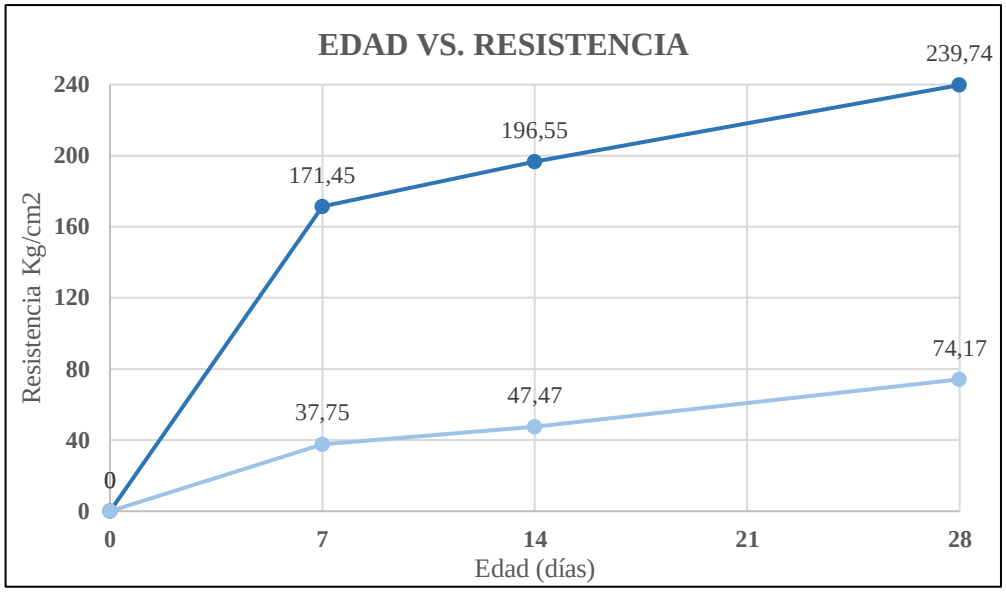


Fig. 22. Comparación de la Edad vs. Resistencia del hormigón con agregados naturales y reciclados

Con base a la Fig. 22, se observa la evolución de la resistencia a la compresión del hormigón en función del tiempo de curado (en días), comparando dos tipos de mezclas: una con agregados convencionales (línea azul oscura) y otra con agregados reciclados (línea azul clara). Ambas mezclas muestran un aumento progresivo de la resistencia con el tiempo, como es característico en el desarrollo del hormigón. Sin embargo, se evidencia una diferencia significativa en los valores alcanzados por cada mezcla. La mezcla con agregados convencionales muestra una resistencia inicial considerable a los 7 días (aproximadamente 170 kg/cm²), que continúa incrementándose de forma sostenida hasta superar los 240 kg/cm² a los 28 días. En cambio, el hormigón con agregados reciclados presenta una resistencia mucho menor en todos los puntos medidos: comienza con cerca de 38 kg/cm² a los 7 días y alcanza sólo unos 74 kg/cm² a los 28 días. Esta diferencia resalta las limitaciones mecánicas que pueden surgir al emplear agregados reciclados, los cuales suelen tener mayor absorción de agua, porosidad y menor adherencia con la matriz cementicia. No obstante, el gráfico también evidencia que, aunque con menor desempeño, el hormigón con agregados reciclados sigue una tendencia positiva y constante de ganancia de resistencia, lo que indica su potencial para aplicaciones no estructurales o donde no se requieran altas prestaciones mecánicas. Esto refuerza la viabilidad del uso de agregados reciclados como parte de estrategias sostenibles en la construcción, siempre que se consideren cuidadosamente las especificaciones del proyecto.

2) Módulo de elasticidad

- Resistencia agregados naturales

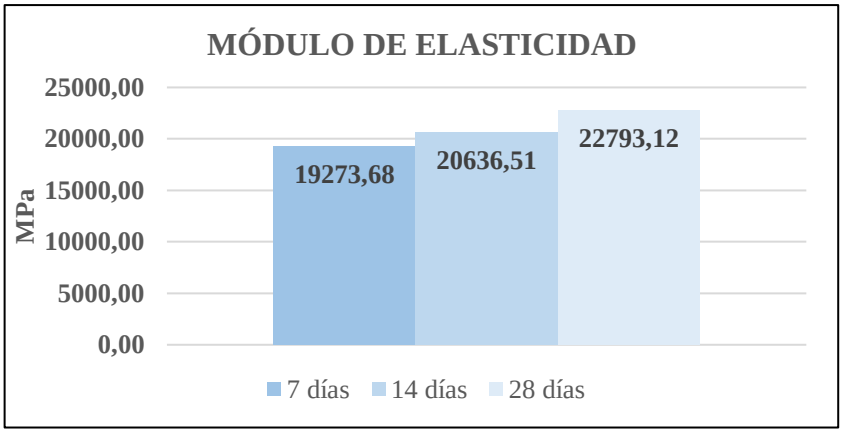


Fig. 23. Comparación del módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales

Según la Fig. 23, los valores obtenidos para el módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales muestran un incremento progresivo conforme avanza el tiempo de curado, lo cual es coherente con el desarrollo de la microestructura del material. A los 7 días, el módulo alcanza 19.273,68 kg/cm², aumentando a 20.636,51 kg/cm² a los 14 días, y llegando a 22.793,12 kg/cm² a los 28 días. Este comportamiento refleja una mejora gradual en la rigidez del hormigón, atribuida principalmente al avance del proceso de hidratación del cemento y a la consolidación de la matriz cementicia. El aumento del módulo de elasticidad con el tiempo es un indicador favorable para aplicaciones estructurales, ya que implica una mayor capacidad del material para resistir deformaciones bajo cargas aplicadas. La diferencia entre los valores de 7 y 28 días representa un crecimiento aproximado del 18,2 %, lo cual es consistente con lo esperado para hormigones bien formulados y curados en condiciones controladas.

- Resistencia agregados reciclados

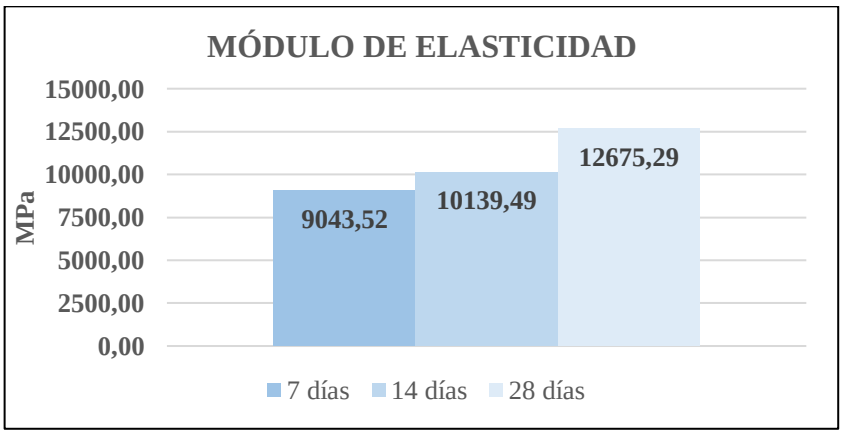


Fig. 24. Comparación del módulo de elasticidad del hormigón con agregados reciclados

Según la Fig. 24, los valores obtenidos para el módulo de elasticidad del hormigón elaborado con agregados reciclados muestran un comportamiento creciente en función del tiempo de curado, aunque significativamente por debajo de los valores alcanzados por

el hormigón con agregados naturales. A los 7 días, el módulo es de 9.043,52 kg/cm², incrementándose a 10.139,49 kg/cm² a los 14 días y alcanzando 12.675,29 kg/cm² a los 28 días. Esta evolución representa un aumento total aproximado del 40 % entre los días 7 y 28, lo que indica que, aunque el desarrollo de rigidez es constante, parte desde una base considerablemente más baja. Esta diferencia se explica por las propiedades físicas de los agregados reciclados, que generalmente presentan mayor porosidad, menor resistencia intrínseca y peor adherencia con la pasta de cemento, lo que reduce la eficiencia en la transferencia de esfuerzos internos.

- Edad vs. Módulo de Elasticidad

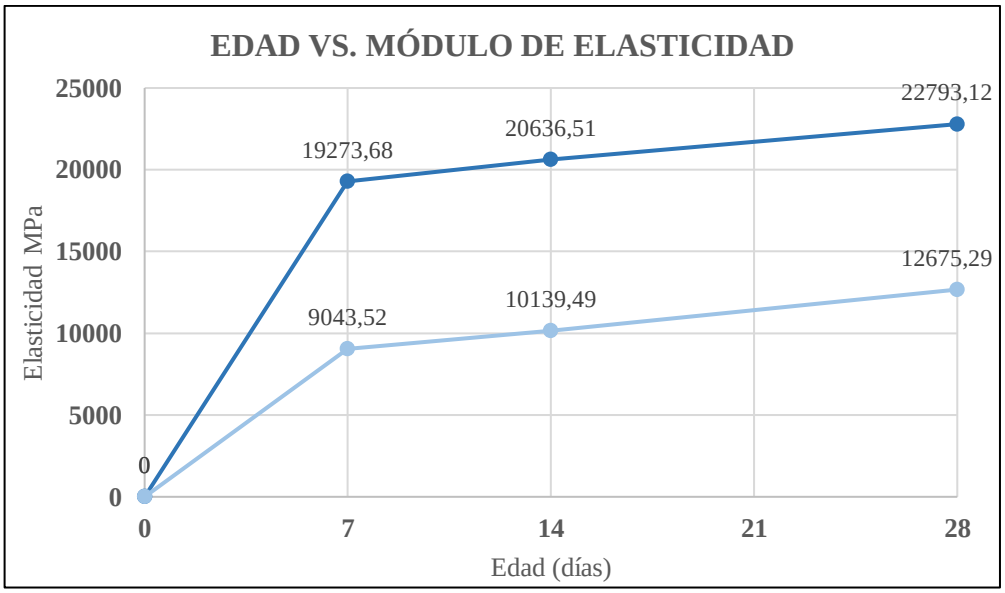


Fig. 25. Comparación de la Edad vs. Módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales y reciclados

La Fig. 25 representa la evolución del módulo de elasticidad del concreto elaborado con agregados naturales y agregados reciclados en diferentes edades de curado: 7, 14 y 28 días. Los valores muestran claramente que el concreto con agregados naturales (línea azul oscura) presenta un mayor módulo de elasticidad en todas las edades analizadas, alcanzando 19273,68 kg/cm² a los 7 días, 20636,51 kg/cm² a los 14 días y 22793,12 kg/cm² a los 28 días. Por su parte, el concreto con agregados reciclados (línea azul clara) presenta valores considerablemente menores: 9043,52 kg/cm², 10139,49 kg/cm² y 12675,29 kg/cm² respectivamente para los mismos periodos. Además, se observa que el incremento del módulo con el tiempo es más acentuado en edades tempranas (de 7 a 14 días) para ambas mezclas, pero especialmente en el concreto con agregados naturales, cuyo módulo aumenta aproximadamente un 7% en ese lapso, mientras que el concreto con agregados reciclados sube cerca de un 12%. Sin embargo, al llegar a los 28 días, la

mezcla con agregados naturales sigue desarrollando propiedades mecánicas, mientras que la mezcla con reciclados tiende a estabilizarse a un valor inferior.

C. FASE 3 - EVALUAR LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE MATERIALES RECICLADOS EN COMPARACIÓN CON LOS MATERIALES TRADICIONALES

En la Fase 3 se evaluó la factibilidad económica del uso de agregados reciclados frente a los tradicionales. El análisis evidenció un aumento en los costos de producción al utilizar materiales reciclados, lo que demuestra su inviabilidad económica y un compromiso significativo en la calidad del hormigón.

TABLA XXVI

RUBRO #1 – HORMIGÓN SIMPLE COSTO REAL

RUBRO:	**1**				**UNIDAD: m3**
DETALLE:	Hormigón estructural de cemento Portland (Agregados comunes / f´c = 240 Kg/cm2)				
EQUIPO	**CANTIDAD**	**TARIFA**	**COSTO HORA**	**RENDIMIENTO**	**COSTO**
DESCRIPCION	**A**	**B**	**C=AxB**	**R**	**D=CxR**
Herramienta Menor 5% de M.O.	5%MO				0,007
Concretera (8HP)	1,00	5,00	5,00	0,03273	0,164
				SUBTOTAL M	**0,171**
MANO DE OBRA	**CANTIDAD**	**JORNAL/HR**	**COSTO HORA**	**RENDIMIENTO**	**COSTO**
DESCRIPCION	**A**	**B**	**C=AxB**	**R**	**D=CxR**
Peón EO E2	1,00	4,23	4,23	0,03273	0,138
				SUBTOTAL N	**0,138**
MATERIALES		**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**PRECIO UNIT.**	**COSTO**
DESCRIPCION			**A**	**B**	**C=AxB**
Cemento		kg	312,52000	0,15	46,878
Arena lavada		m3	0,88500	11,00	9,735
Ripio triturado		m3	1,02300	15,00	15,345
Agua		m3	0,17500	1,20	0,210
				SUBTOTAL O	**72,168**
TRANSPORTE		**KM**	**TARIFA/KM**	**CONSUMO**	**COSTO**
DESCRIPCION			**A**	**B**	**C=AxB**
Cemento		2	0,00026	312,52	0,162
Arena lavada		25	0,24000	0,89	5,310
Ripio triturado		25	0,24000	1,02	6,138
				SUBTOTAL P	**11,610**

TOTAL, COSTO DIRECTO (M+N+O+P)		84,087
INDIRECTOS (%)	20,00%	16,817
UTILIDAD (%)	0,00%	0,000
COSTO TOTAL DEL RUBRO		100,90
VALOR UNITARIO		**100,90**

TABLA XXVII

RUBRO #1 – HORMIGÓN SIMPLE COSTO TESISTA

RUBRO:	**1**				**UNIDAD: m3**
DETALLE:	Hormigón estructural de cemento Portland (Agregados comunes / f´c = 240 Kg/cm2)				
EQUIPO	**CANTIDAD**	**TARIFA**	**COSTO HORA**	**RENDIMIENTO**	**COSTO**
DESCRIPCION	**A**	**B**	**C=AxB**	**R**	**D=CxR**
Herramienta Menor 5% de M.O.	5%MO				0,000
Concretera (8HP)	1,00	0,00	0,00	0,03273	0,000
				SUBTOTAL M	**0,000**
MANO DE OBRA	**CANTIDAD**	**JORNAL/HR**	**COSTO HORA**	**RENDIMIENTO**	**COSTO**
DESCRIPCION	**A**	**B**	**C=AxB**	**R**	**D=CxR**
Estudiante (EST. OCUP.)	1,00	0,00	0,00	0,03273	0,000
				SUBTOTAL N	**0,000**
MATERIALES		**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**PRECIO UNIT.**	**COSTO**
DESCRIPCION			**A**	**B**	**C=AxB**
Cemento		kg	312,52000	0,15	46,878
Arena lavada		m3	0,88500	0,90	0,797
Ripio triturado		m3	1,02300	0,90	0,921
Agua		m3	0,17500	0,00	0,000
				SUBTOTAL O	**48,595**
TRANSPORTE		**KM**	**TARIFA/KM**	**CONSUMO**	**COSTO**
DESCRIPCION			**A**	**B**	**C=AxB**
Cemento		2	0,00026	312,52	0,162
Arena lavada		25	0,24000	0,89	5,310
Ripio triturado		25	0,24000	1,02	6,138
				SUBTOTAL P	**11,610**

TOTAL, COSTO DIRECTO (M+N+O+P)		60,205
INDIRECTOS (%)	20,00%	12,041
UTILIDAD (%)	0,00%	0,000
COSTO TOTAL DEL RUBRO		72,25
VALOR UNITARIO		**72,25**

Según la Tabla XXVI y la Tabla XXVII, los resultados del análisis de costos del hormigón simple estructural con f'c = 240 kg/cm² entre la ejecución real y la realizada por el tesista, se evidencian diferencias económicas significativas. El costo total del rubro bajo condiciones reales asciende a 100,90 USD/m³, mientras que el costo estimado por el tesista se reduce notablemente a 72,25 USD/m³, representando una disminución del 28,4 %. Esta variación se debe principalmente a la eliminación de costos asociados a la mano de obra y al equipo, rubros que en la ejecución real representan una parte significativa del costo (0,171 en equipo y 0,138 en mano de obra). En contraste, en el análisis del tesista estos valores son nulos, dado que se asume que el trabajo fue realizado sin costos de personal ni alquiler o desgaste de maquinaria. Por otro lado, aunque los costos de materiales y transporte se mantienen

relativamente constantes en ambos escenarios, el costo de los agregados (arena y ripio) es sustancialmente menor en la propuesta del tesista, posiblemente por haber sido reutilizados, donados o adquiridos a precios preferenciales. No obstante, los gastos por transporte permanecen iguales en ambas estimaciones, sumando 11,61 USD/m³, lo cual evidencia que este rubro es independiente del tipo de ejecución y responde a variables externas como la distancia y tarifas fijas por kilómetro. Finalmente, al aplicar un 20 % de costos indirectos sobre el total directo, el análisis real alcanza un sobrecosto de 16,82 USD, frente a los 12,04 USD en la propuesta del tesista. La utilidad se mantiene en 0 % en ambos casos, evidenciando que el objetivo del estudio es puramente técnico-comparativo.

TABLA XXVIII

RUBRO #2 – HORMIGÓN SIMPLE COSTO REAL

RUBRO:	**2**				**UNIDAD: m3**
DETALLE:	Hormigón estructural de cemento Portland (Agregados reciclados / f´c = 240 Kg/cm2)				
EQUIPO	**CANTIDAD**	**TARIFA**	**COSTO HORA**	**RENDIMIENTO**	**COSTO**
DESCRIPCION	**A**	**B**	**C=AxB**	**R**	**D=CxR**
Herramienta Menor 5% de M.O.	5%MO				0,007
Concretera (8HP)	1,00	5,00	5,00	0,03273	0,164
				SUBTOTAL M	**0,171**
MANO DE OBRA	**CANTIDAD**	**JORNAL/HR**	**COSTO HORA**	**RENDIMIENTO**	**COSTO**
DESCRIPCION	**A**	**B**	**C=AxB**	**R**	**D=CxR**
Peón EO E2	1,00	4,23	4,23	0,03273	0,138
				SUBTOTAL N	**0,138**
MATERIALES		**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**PRECIO UNIT.**	**COSTO**
DESCRIPCION			**A**	**B**	**C=AxB**
Cemento		kg	467,58099	0,15	70,137
FCC		m3	0,70178	0,90	0,632
Ripio reciclado triturado		m3	0,79867	17,00	13,577
Agua		m3	0,26185	1,20	0,314
				SUBTOTAL O	**84,660**
TRANSPORTE		**KM**	**TARIFA/KM**	**CONSUMO**	**COSTO**
DESCRIPCION			**A**	**B**	**C=AxB**
Cemento		2	0,00026	467,58	0,243
FCC		924	0,24000	0,70	155,627
Ripio reciclado triturado		12	0,24000	0,80	2,300
				SUBTOTAL P	**158,170**

TOTAL, COSTO DIRECTO (M+N+O+P)		243,139
INDIRECTOS (%)	20,00%	48,628
UTILIDAD (%)	0,00%	0,000
COSTO TOTAL DEL RUBRO		291,77
VALOR UNITARIO		**291,77**

TABLA XXIX

RUBRO #2 – HORMIGÓN SIMPLE COSTO TESISTA

RUBRO:	**2**				**UNIDAD: m3**
DETALLE:	Hormigón estructural de cemento Portland (Agregados reciclados / f´c = 240 Kg/cm2)				
EQUIPO	**CANTIDAD**	**TARIFA**	**COSTO HORA**	**RENDIMIENTO**	**COSTO**
DESCRIPCION	**A**	**B**	**C=AxB**	**R**	**D=CxR**
Herramienta Menor 5% de M.O.	5%MO				0,000
Concretera (8HP)	1,00	0,00	0,00	0,03273	0,000
				SUBTOTAL M	**0,000**
MANO DE OBRA	**CANTIDAD**	**JORNAL/HR**	**COSTO HORA**	**RENDIMIENTO**	**COSTO**
DESCRIPCION	**A**	**B**	**C=AxB**	**R**	**D=CxR**
Estudiante (EST. OCUP.)	1,00	0,00	0,00	0,03273	0,000
				SUBTOTAL N	**0,000**
MATERIALES		**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**PRECIO UNIT.**	**COSTO**
DESCRIPCION			**A**	**B**	**C=AxB**
Cemento		kg	467,58099	0,15	70,137
FCC		m3	0,70178	24,00	16,843
Ripio reciclado triturado		m3	0,79867	0,90	0,719
Agua		m3	0,26185	0,00	0,000
				SUBTOTAL O	**87,699**
TRANSPORTE		**KM**	**TARIFA/KM**	**CONSUMO**	**COSTO**
DESCRIPCION			**A**	**B**	**C=AxB**
Cemento		2	0,00026	467,58	0,243
FCC		0	0,24000	0,70	0,000
Ripio reciclado triturado		12	0,24000	0,80	2,300
				SUBTOTAL P	**2,543**

TOTAL, COSTO DIRECTO (M+N+O+P)		90,242
INDIRECTOS (%)	20,00%	18,048
UTILIDAD (%)	0,00%	0,000
COSTO TOTAL DEL RUBRO		108,29
VALOR UNITARIO		**108,29**

Según la Tabla XXVIII y la Tabla XXIX, el análisis comparativo del costo unitario del hormigón estructural con agregados reciclados (f'c = 240 kg/cm²) revela una diferencia significativa entre la ejecución en condiciones reales y la estimación académica realizada por el tesista. En el escenario real, el costo total del rubro asciende a 291,77 USD/m³, mientras que el costo estimado por el tesista es de 108,29 USD/m³, lo cual representa una reducción del 62,9 %. Esta diferencia se debe principalmente a que, en el análisis tesista, se eliminan completamente los costos de mano de obra y equipos, al asumir que la elaboración fue ejecutada por estudiantes y con maquinaria propia o sin cargo. En cuanto a los materiales, ambos escenarios comparten cantidades similares de cemento y agua, aunque el tesista

utiliza precios significativamente más bajos para los agregados reciclados. Por ejemplo, el FCC se cotiza a 0,90 USD/m³ en el escenario real, mientras que el tesista lo valora en 24,00 USD/m³, lo que resulta contradictorio, ya que esta diferencia encarece su estimación de materiales (87,70 USD frente a 84,66 USD en el real). Sin embargo, esta alza es compensada por la fuerte reducción en costos de transporte, que en el análisis real alcanzan los 158,17 USD/m³, mientras que en el caso del tesista apenas llegan a 2,54 USD/m³, principalmente porque se omite el traslado del FCC, posiblemente al considerarse disponible en sitio. Este elevado costo de transporte en la ejecución real constituye el rubro más oneroso, representando más del 54 % del costo directo total, debido a la distancia de 924 km para el FCC, lo que demuestra que el origen de los materiales reciclados puede impactar drásticamente la viabilidad económica del hormigón reciclado. Por su parte, el análisis del tesista plantea un escenario optimista, útil en contextos experimentales o cuando los agregados reciclados son de fácil acceso, pero poco representativo de condiciones comerciales estándar.

A pesar de que el Rubro #2, correspondiente al hormigón elaborado con agregados reciclados y catalizador FCC, muestra un costo unitario más elevado que el Rubro #1 (291,77 USD/m³ frente a 100,90 USD/m³ en el escenario real), su implementación puede representar un paso importante hacia un modelo de economía circular en la construcción. Este enfoque considera no solo el costo monetario inmediato, sino también el impacto ambiental y la optimización de recursos a lo largo del ciclo de vida de los materiales. El uso de ripio reciclado como agregado grueso proviene de residuos de hormigón triturado, lo que permite valorizar un material que, de otra forma, sería desechado en vertederos o espacios no controlados. Esta práctica reduce significativamente la extracción de áridos naturales, que requiere un alto consumo energético y afecta ecosistemas fluviales y montañosos. Por otra parte, el FCC (polvo del proceso de craqueo catalítico fluidizado), un residuo industrial generado en refinerías de petróleo se reutiliza como reemplazo del agregado fino natural. Al incorporar este subproducto en mezclas de hormigón, se evita su acumulación como desecho peligroso, contribuyendo a la reducción de emisiones y pasivos ambientales asociados al sector petrolero. Si bien los costos iniciales son mayores, en parte debido a la logística de recolección y transporte de los materiales reciclados, esta alternativa representa un avance hacia sistemas constructivos más sostenibles. Con el desarrollo de cadenas de suministro locales y el apoyo de políticas públicas que fomenten la economía circular, los costos pueden reducirse progresivamente, haciendo viable su adopción a gran escala.

II. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

A. HIPÓTESIS

El uso combinado de agregado grueso reciclado y catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC) como reemplazo del agregado fino en la fabricación de hormigón simple no permite obtener una resistencia a la compresión comparable o superior a la del hormigón convencional.

B. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis planteada se confirmó. Los resultados experimentales demostraron que el uso combinado de agregado grueso reciclado y catalizador agotado de FCC como reemplazo del agregado fino no permite alcanzar una resistencia a la compresión igual o superior a la del hormigón convencional. Por lo tanto, se verifica que esta combinación de materiales no resulta adecuada para obtener un desempeño mecánico equivalente al del hormigón tradicional.

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

I. CONCLUSIONES

- En la Fase 1 se determinó que los agregados, tanto naturales como reciclados, presentan características físicas que los hacen aptos para el concreto, aunque con diferencias relevantes. La granulometría de la arena natural mostró una graduación óptima, mientras que el catalizador FCC exhibió un mayor contenido de finos (más partículas menores a 0,075 mm), lo que puede afectar la trabajabilidad. El agregado grueso reciclado presentó una distribución granulométrica similar al natural, con un predominio de partículas medianas. El contenido de humedad varió: el agregado grueso reciclado alcanzó 0,94%, superior al 0,76% del natural, y en finos la arena natural mostró 3,81% frente a 2,21% del FCC. Estos datos reflejan diferencias importantes en la absorción y comportamiento al mezclarse con cemento.
- Los agregados reciclados mostraron menor densidad real y mayor absorción que los naturales, indicando una mayor porosidad y capacidad de retención de agua. La densidad real del cemento se midió en 3,00 g/cm³, consistente con su estructura compacta. La densidad aparente compactada y suelta para los reciclados fue menor, confirmando su porosidad. La mezcla óptima de agregados, con aproximadamente 50% de finos, logró la mayor densidad aparente, optimizando la compactación. En resistencia a la abrasión, el ripio reciclado presentó un desgaste del 35%, superior al 23% del natural, atribuido a la mayor porosidad y partículas frágiles, lo que podría afectar la durabilidad del concreto elaborado con estos materiales.
- La dosificación de hormigón para una resistencia característica de 240 kg/cm² y relación agua/cemento de 0,56 evidenció que la mezcla con agregados reciclados requiere un mayor aporte de cemento (467,58 kg/m³ frente a valores típicos menores en natural) y agua (261,85 l/m³), debido a su mayor absorción. Esto ocasionó una reducción significativa en la trabajabilidad, con un asentamiento de 4 cm comparado con 9 cm en la mezcla natural, lo que dificulta la colocación y manejo.
- Los ensayos de compresión a 7, 14 y 28 días muestran que el hormigón con agregados reciclados alcanza resistencias promedio de 3,70 MPa, 4,66 MPa y 7,20 MPa respectivamente, comparados con 16,81 MPa, 19,28 MPa y 23,5 MPa para el hormigón tradicional. Esta caída significativa se debe a la alta porosidad de los agregados reciclados y su menor adherencia con la matriz cementante, que comprometen la integridad estructural y la capacidad portante del concreto.

- Se observa una disminución progresiva del asentamiento del concreto fresco conforme aumenta el porcentaje de agregados reciclados. El asentamiento se reduce de 9 cm en la mezcla con 0 % de reciclados a 4 cm cuando se usa 100 % agregado reciclado, una caída del 56 %. Esta reducción refleja una pérdida considerable de trabajabilidad, atribuible a la mayor absorción de agua y textura rugosa del agregado reciclado. Para mantener la manejabilidad en obra, es necesario incrementar la dosificación de agua o incorporar aditivos plastificantes.
- El módulo de elasticidad del hormigón con agregados reciclados a 28 días es de aproximadamente 12.70 GPa, comparado con 22.80 GPa para el hormigón tradicional. Aunque ambas mezclas muestran aumento progresivo del módulo con el tiempo, el hormigón reciclado presenta una rigidez significativamente menor y se estabiliza en valores bajos, limitando su uso a aplicaciones estructurales de baja demanda o no estructurales, debido a su menor capacidad para resistir deformaciones bajo carga.
- El análisis económico comparativo en condiciones reales mostró que el costo total del hormigón estructural convencional fue de 100,90 USD/m³. Por su parte, la utilización de agregados reciclados implicó costos asociados a procesos adicionales de preparación, selección y transporte que pueden igualar o superar los costos de los agregados naturales. Esto se traduce en una ausencia de ventaja económica significativa, ya que la optimización del proceso de obtención y manejo de materiales reciclados no fue suficiente para compensar los gastos operativos y logísticos implicados.
- Bajo un escenario controlado, sin considerar gastos de mano de obra ni equipo, y asumiendo precios preferenciales o nulos para ciertos materiales, el costo total del hormigón con agregados naturales se redujo a 72,25 USD/m³, lo que representa una disminución del 28,4 % respecto al hormigón en condiciones reales. Sin embargo, esta reducción de costos es teórica y no refleja la realidad de una obra, donde los costos laborales, de maquinaria y logística son inevitables, lo que limita la aplicabilidad práctica de esta ventaja económica en la industria de la construcción.
- Por lo tanto, se concluye que el uso de hormigón con agregados reciclados no es económicamente viable para aplicaciones estructurales en condiciones reales, salvo que existan incentivos, subsidios o normativas que promuevan su uso. El concreto reciclado podría destinarse a obras de menor exigencia mecánica, tales como urbanismo, pavimentos no estructurales o elementos prefabricados, donde el beneficio ambiental de la reutilización supere las restricciones económicas y técnicas. En estos casos, se

maximizaría el aprovechamiento del material reciclado, reduciendo la huella ambiental sin comprometer la seguridad estructural.

II. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios detallados sobre la influencia de la granulometría fina del catalizador FCC y su interacción con distintos aditivos plastificantes en la mezcla de concreto. Este análisis debe incluir pruebas de fluidez y tiempo de fraguado, con el fin de mejorar la trabajabilidad y compensar el alto contenido de finos, aspecto que no pudo ser abordado en profundidad en la presente investigación.
- Es necesario investigar métodos de tratamiento físico o químico para reducir la porosidad y absorción del agregado reciclado, como el curado superficial, impregnación con selladores o el uso de agentes estabilizantes. Estos procesos podrían mejorar su resistencia a la abrasión y densidad real, optimizando así la durabilidad y rendimiento del concreto fabricado.
- Se sugiere desarrollar una línea de investigación que explore dosificaciones alternativas con aditivos específicos y técnicas de mezclado para mejorar la trabajabilidad y reducir la demanda excesiva de cemento y agua en mezclas con agregados reciclados. Además, evaluar el impacto ambiental y económico mediante análisis de ciclo de vida para validar la sostenibilidad del uso de estos materiales, tema que no se profundizó en este estudio, pero es fundamental para su aplicación práctica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] M. Abed, R. Nemes, y B. A. Tayeh, «Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate», *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 32, n.o 2, pp. 108-114, feb. 2020, doi: 10.1016/J.JKSUES.2018.12.002.

[2] L. F. J. TORREZ, «Durabilidad del concreto con agregado grueso reciclado de alta absorción», 2015.

[3] N. C. Zuniga y D. R. Picado, «Evaluación de muestras del agregado grueso proveniente de residuos de concreto para producir nuevos concretos», *Métodos y Materiales*, vol. 12, pp. 1-11, ene. 2022, doi: 10.15517/MYM.V12I0.48029.

[4] H. Carrera y J. Medina, «EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CATALIZADOR DEL PROCESO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO (FCC)».

[5] Y. F. Silva Urrego, A. Arcila Castro, y S. Delvasto, «Efecto de tratamientos en agregados reciclados sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de concretos autocompactantes.», *Revista EIA*, vol. 19, n.o 38, jun. 2022, doi: 10.24050/reia. v19i38.1547.

[6] C. Bedoya y L. Dzul, «El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana», *Revista ingeniería de construcción*, vol. 30, n.o 2, pp. 99-108, 2015, doi: 10.4067/S0718-50732015000200002.

[7] J. Wilmer Elías Silupu, J. Enrique Flores Franco, R. Enrique Barrera Gutiérrez, C. Alberto Reyna Pary, C. Alberto Reyna Pary, y C. de Huamachuco, «Efecto de la Utilización de Agregados de Concreto Reciclado sobre el Ambiente y la Construcción de Viviendas en la Ciudad de Huamachuco Efecto de la Utilización de Agregados de Concreto Reciclado sobre el Ambiente y la Construcción de Viviendas en la Effect of the Use of Recycled Concrete Aggregates on the Environment and Housing Construction in Huamachuco City», vol. 2, n.o 1, 2020, doi: 10.37073/puriq.2.1.68ï.

[8] «UNIVERSIDA LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE: INGENIERO CIVIL».

[9] «FICA-CIC-LOPEZ FRANK-MARIN SEBASTIAN».

[10] «UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA REUTILIZACIÓN DEL

CATALIZADOR GASTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO DE LA REFINERÍA ESMERALDAS COMO AGREGADO PARA EL HORMIGÓN TRABAJO DE TITULACIÓN, MODALIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA».

[11] «Torres Cueva Luis Alfredo».

[12] A. Frederick y M. Canchingre, «ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA OBTENCIÓN DE HORMIGÓN Y MORTERO A PARTIR DEL CATALIZADOR AGOTADO DE LA UNIDAD DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO DE LA REFINERÍA ESMERALDAS COMO ADICIÓN PUZOLÁNICA. PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO».

[13] S. P. Muñoz Pérez, D. M. Díaz Sánchez, E. E. Gamarra Capuñay, y J. A. Chaname Bustamante, «La Influencia de los RCD en reemplazo de los agregados para la elaboración de concreto: Una revisión de la literatura», *Ecuadorian Science Journal*, vol. 5, n.o 2, pp. 107-120, sep. 2021, doi: 10.46480/esj.5.2.111.

[14] «862 - Normas NTE INEN 862 para los ensayos respectivos de los agregados gruesos y - INSTITUTO - Studocu». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/862-normas-nte-inen-862-para-los-ensayos-respectivos-de-los-agregados-gruesos-y/31180419

[15] «695 - Normativa INEN 695 - INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN Quito - Ecuador NORMA TÉCNICA - Studocu». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/695-normativa-inen-695/47030843

[16] «Normas INEN 872 - 535667 - INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN Quito - Ecuador NORMA TÉCNICA - Studocu». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.studocu.com/ec/document/universidad-estatal-peninsula-de-santa-elena/ingenieria-economica/normas-inen-872-535667/6343647

[17] «NTE INEN 856- Densidad Relativa DEL Agregado FINO - INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN Quito - - Studocu». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:

https://www.studocu.com/ec/document/universidad-del-azuay/resistencia-de-materiales-2/nte-inen-856-densidad-relativa-del-agregado-fino/39868633

[18] «857 - Normativa - INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN Quito - Ecuador NORMA TÉCNICA ECUATORIANA - Studocu». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/857-normativa/63322875

[19] «Nte inen 858-1-Determinacion de la Masa Unitaria - INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN Quito - - Studocu». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/nte-inen-858-1-determinacion-de-la-masa-unitaria/23206033

[20] «861 - Normas NTE INEN 861 para los ensayos respectivos de los agregados gruesos y - INSTITUTO - Studocu». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/861-normas-nte-inen-861-para-los-ensayos-respectivos-de-los-agregados-gruesos-y/31180408

[21] «Nte inen 156-2 - Densidad del Cemento Le Chatelier - INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN Quito - Studocu». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.studocu.com/ec/document/universidad-ute/mecanica-de-materiales/nte-inen-156-2-densidad-del-cemento-le-chatelier/33981855

[22] «XRF: Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X | Partes Hi Rel». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://wpo-altertechnology.com/es/xrf-x-ray-fluorescence-spectroscopy-hi-rel-parts/

[23] E. F. Morales Sandoval, J. A. Morocho Jumbo, E. A. Porras Abril, y N. A. Sánchez Reinoso, «Determinación del módulo de rotura y deflexiones en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de las Canteras de Pifo, San Antonio de Pichincha y Guayllabamba.», 2012, *Quito: UCE.* Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/293

[24] «INEN 1578.pdf C143 | PDF». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.scribd.com/doc/223950799/INEN-1578-pdf-C143

[25] «ACI 318 - 19 (español-Sistema Internacional) | PDF». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.slideshare.net/slideshow/aci-318-19-espaolsistema-internacional/256184668

[26] «NTE INEN 1573 - Hormigón. Determinación de la resistencia a la compresión - INSTITUTO ECUATORIANO DE - Studocu». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.studocu.com/ec/document/universidad-tecnica-particular-de-loja/hormigon-armado/nte-inen-1573-hormigon-determinacion-de-la-resistencia-a-la-compresion/47008255

[27] V. N. Velastegui Solis, «Desarrollo de un software para el diseño de dosificaciones de hormigón en base al método ACI y densidad óptima», 2025, *Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil.* Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/44176

ANEXOS

Anexo 1:
Ensayo de contenido de humedad del ripio

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR	
Muestra			1	2
m1	Masa del recipiente	gr	32,50	32,50
m2	Masa del recipiente + Muestra	gr	221,50	216,00
m3 = m2 - m1	Masa de la muestra	gr	189,00	183,50
m4	Masa del recipiente + Muestra seca	gr	220,00	214,70
m5 = m4 - m1	Masa de la muestra seca	gr	187,50	182,20
CH = ((m3 - m5) /m5)	Contenido de Humedad	%	0,80	0,71
CHR = (CH1 + CH2) /2	**Contenido de Humedad Promedio del Ripio**	**%**	**0,76**	

Anexo 2:
Ensayo de contenido de humedad de la arena

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR	
Muestra			1	2
m1	Masa del recipiente	gr	30,00	32,00
m2	Masa del recipiente + Muestra	gr	227,00	230,00
m3 = m2 - m1	Masa de la muestra	gr	197,00	198,00
m4	Masa del recipiente + Muestra seca	gr	219,80	222,70
m5 = m4 - m1	Masa de la muestra seca	gr	189,80	190,70
CH = ((m3 - m5) /m5)	Contenido de Humedad	%	3,79	3,83
CHA = (CH1 + CH2) /2	**Contenido de Humedad Promedio de la Arena**	**%**	**3,81**	

Anexo 3:
Ensayo de contenido de humedad del ripio reciclado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR	
Muestra			1	2
m1	Masa del recipiente	gr	10,00	12,50
m2	Masa del recipiente + Muestra	gr	80,50	81,20
m3 = m2 - m1	Masa de la muestra	gr	70,50	68,70
m4	Masa del recipiente + Muestra seca	gr	79,80	80,60
m5 = m4 - m1	Masa de la muestra seca	gr	69,80	68,10
CH = ((m3 - m5) /m5)	Contenido de Humedad	%	1,00	0,88
CHR = (CH1 + CH2) /2	**Contenido de Humedad Promedio del Ripio Reciclado**	**%**	**0,94**	

Anexo 4:
Ensayo de contenido de humedad del FCC

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

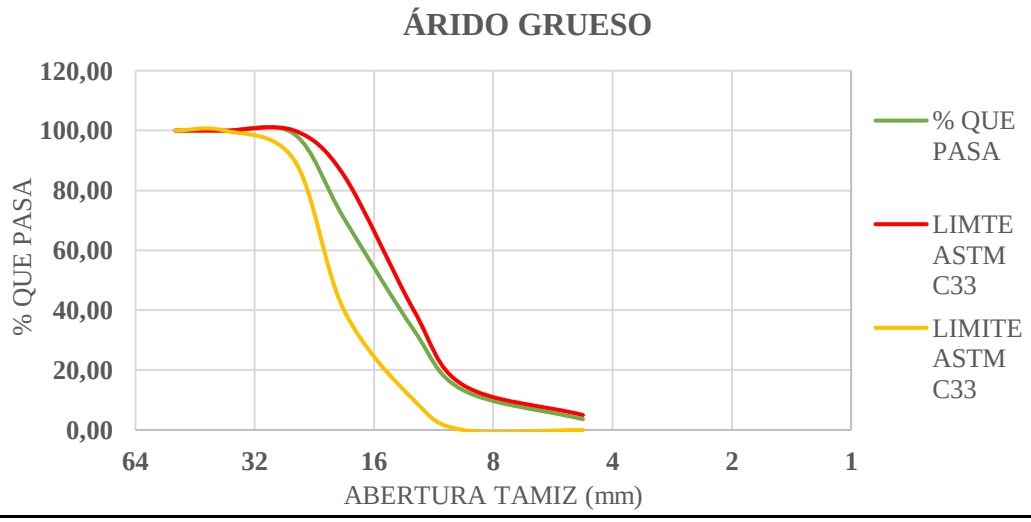
NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR	
Muestra			1	2
m1	Masa del recipiente	gr	10,00	12,50
m2	Masa del recipiente + Muestra	gr	83,50	82,00
m3 = m2 - m1	Masa de la muestra	gr	73,50	69,50
m4	Masa del recipiente + Muestra seca	gr	81,70	80,70
m5 = m4 - m1	Masa de la muestra seca	gr	71,70	68,20
CH = ((m3 - m5) /m5)	Contenido de Humedad	%	2,51	1,91
CHA = (CH1 + CH2) /2	**Contenido de Humedad Promedio del FCC**	**%**	**2,21**	

Anexo 5:
Ensayo de granulometría del agregado grueso

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

Peso de la muestra (gr):		10000	Pérdida de muestra:	0,18%
TAMIZ		**PESO RETENIDO ACUMULADO**	**%RETENIDO**	**% QUE PASA**
50,8	2"	0,00	0,00	100,00
38,1	1 1/2"	0,00	0,00	100,00
25,4	1"	124,00	1,24	98,76
19,1	3/4"	2924,00	29,29	70,71
12,7	1/2"	6646,00	66,58	33,42
9,52	3/8"	8655,00	86,71	13,29
4,76	#4	9623,00	96,40	3,60
PASA #4		**359,00**	3,60	
TOTAL		**9982,0**		

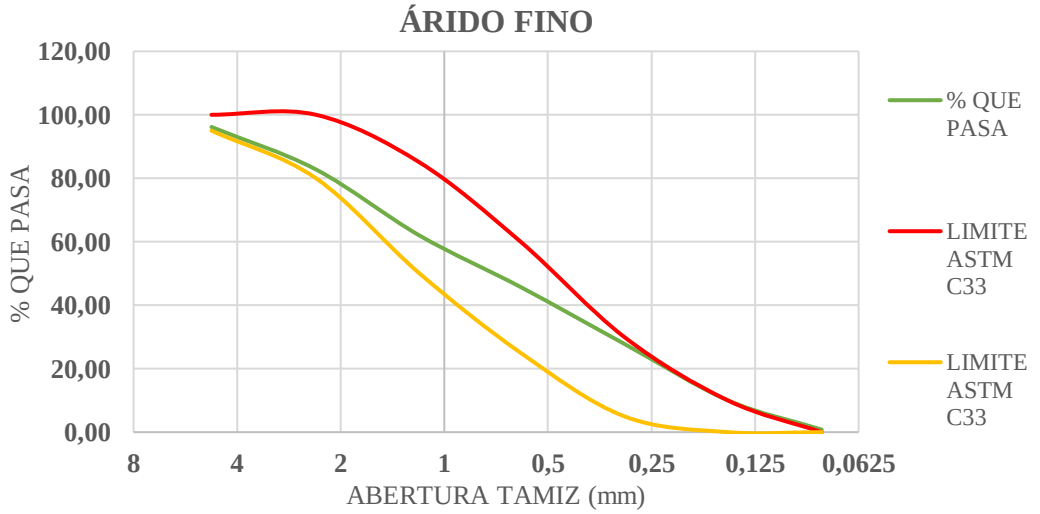


Anexo 6:
Ensayo de granulometría del agregado fino

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

Peso de la muestra (gr):		600	Pérdida de muestra:	0,13%
TAMIZ		**PESO RETENIDO ACUMULADO**	**%RETENIDO**	**% QUE PASA**
4,75	#4	23,00	3,84	96,16
2,36	#8	103,30	17,24	82,76
1,18	#16	228,00	38,05	61,95
0,6	#30	325,20	54,27	45,73
0,3	#50	432,40	72,16	27,84
0,15	#100	539,00	89,95	10,05
0,08	#200	594,40	99,20	0,80
PASA #200		**4,80**	0,80	
TOTAL		**599,2**		

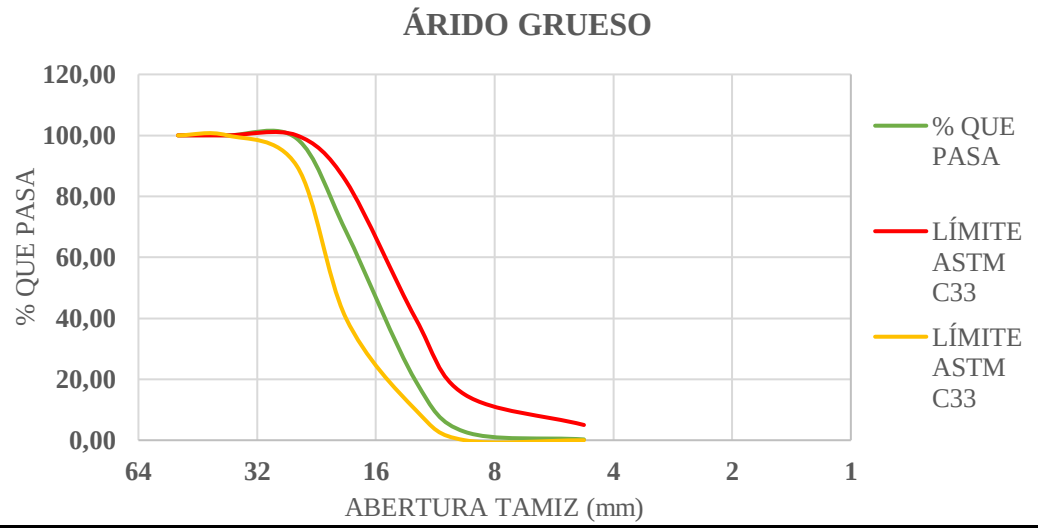


Anexo 7:
Ensayo de granulometría del agregado grueso reciclado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

Peso de la muestra (gr):		10000	Pérdida de muestra:	0,01%
TAMIZ		**PESO RETENIDO ACUMULADO**	**%RETENIDO**	**% QUE PASA**
50,8	2"	0,00	0,00	100,00
38,1	1 1/2"	0,00	0,00	100,00
25,4	1"	105,00	1,05	98,95
19,1	3/4"	3150,70	31,51	68,49
12,7	1/2"	8044,30	80,45	19,55
9,52	3/8"	9721,30	97,22	2,78
4,76	#4	9973,30	99,74	0,26
PASA #4		**25,50**	0,26	
TOTAL		**9998,8**		

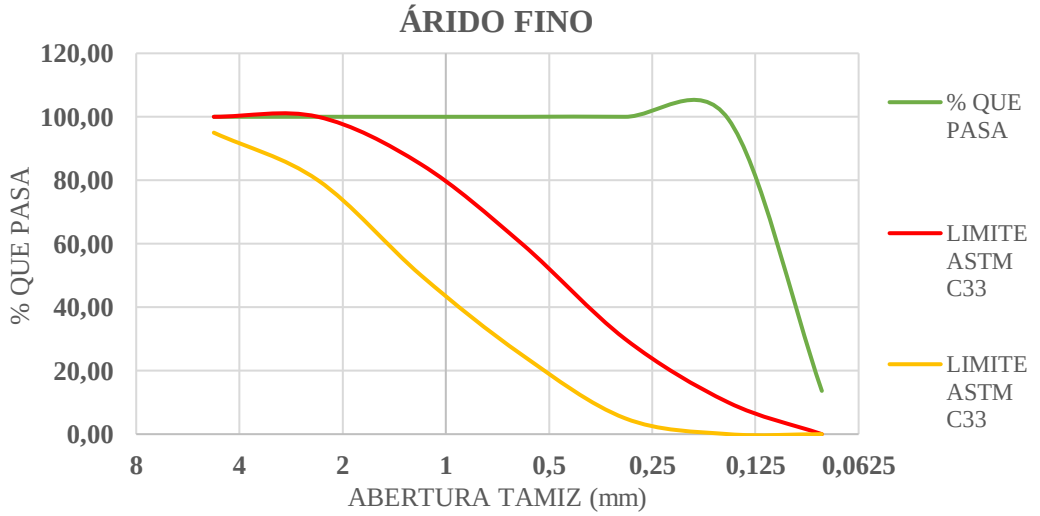


Anexo 8:
Ensayo de granulometría del agregado fino reciclado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

Peso de la muestra (gr):		600	Pérdida de muestra:	0,13%
TAMIZ		**PESO RETENIDO ACUMULADO**	**%RETENIDO**	**% QUE PASA**
4,75	#4	0,00	0,00	100,00
2,36	#8	0,00	0,00	100,00
1,18	#16	0,00	0,00	100,00
0,6	#30	0,00	0,00	100,00
0,3	#50	0,00	0,00	100,00
0,15	#100	4,20	0,70	99,30
0,08	#200	517,50	86,37	13,63
PASA #200		**81,70**	13,63	
TOTAL		**599,2**		



Anexo 9:
Ensayo de densidad real y capacidad de absorción del ripio

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
m1	Masa de la canastilla en el aire	gr	1182,00
m2	Masa de la canastilla en el agua	gr	1026,50
m3	Masa de la canastilla + Muestra SSS en el aire	gr	3181,50
m4	Masa de la canastilla + Muestra SSS en el agua	gr	2267,50
DA	Densidad real del agua	gr/cm3	1,00
m5 = m3 - m1	Masa de la muestra SSS en el aire	gr	1999,50
m6 = m4- m2	Masa de la muestra SSS en el agua	gr	1241,00
VR = (m5-m6) /DA	Volumen real de la muestra	cm3	758,50
DRR = m5/VR	**Densidad real de ripio**	**gr/cm3**	**2,63**

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
m7	Masa del recipiente	gr	131,00
m8	Masa del recipiente + Muestra SSS	gr	2131,00
m9 = m8 - m7	Masa de la muestra SSS	gr	2000,00
m10	Masa del recipiente	gr	131,00
m11	Masa del recipiente + Muestra seca	gr	2068,90
m12 = m11 - m10	Masa de la muestra seca	gr	1937,90
CAR = ((m9 - m12) /m12) *100	**Capacidad de absorción del ripio**	**%**	**3,20**

Anexo 10:
Ensayo de densidad real y capacidad de absorción de la arena

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
m1	Masa del picnómetro	gr	145,10
m2	Masa del picnómetro + Muestra SSS	gr	645,10
m3	Masa del picnómetro + Muestra SSS + Agua	gr	956,40
m4 = m3 - m2	Masa de agua añadida	gr	311,30
m5	Masa del picnómetro + 500 cm3 de agua	gr	642,60
m6 = m5 - m1	Masa de 500 cm3 de agua	gr	497,50
DG = m6/500cm3	Densidad del agua	gr/cm3	1,00
m7 = m6 - m4	Masa del agua desalojada por la muestra	gr	186,20
Msss = m2 - m1	Masa del agregado	gr	500,00
Vsss = m7/DA	Volumen del agua desalojada	cm3	187,14
DRA = Msss/Vsss	**Densidad real de la arena**	**gr/cm3**	**2,67**

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR	
Muestra			1	2
m8	Masa del recipiente	gr	32,00	30,00
m9	Masa del recipiente + Muestra SSS	gr	218,70	204,80
m10 = m9 - m8	Masa de la muestra SSS	gr	186,70	174,80
m11	Masa del recipiente	gr	33,00	30,20
m12	Masa del recipiente + Muestra seca	gr	215,10	201,90
m13 = m12 - m11	Masa de la muestra seca	gr	182,10	171,70
CA = ((m10 - m13) /m13) *100	Capacidad de absorción	%	2,53	1,81
CAA = (CA1 + CA2) /2	**Capacidad de absorción promedio de la arena**	**%**	**2,17**	

Anexo 11:
Ensayo de densidad real y capacidad de absorción del ripio reciclado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
m1	Masa de la canastilla en el aire	gr	1179,20
m2	Masa de la canastilla en el agua	gr	1037,50
m3	Masa de la canastilla + Muestra SSS en el aire	gr	3180,50
m4	Masa de la canastilla + Muestra SSS en el agua	gr	2253,20
DA	Densidad real del agua	gr/cm3	1,00
m5 = m3 - m1	Masa de la muestra SSS en el aire	gr	2001,30
m6 = m4- m2	Masa de la muestra SSS en el agua	gr	1215,70
VR = (m5-m6) /DA	Volumen real de la muestra	cm3	785,60
DRR = m5/VR	**Densidad real de ripio reciclado**	**gr/cm3**	**2,54**

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
m7	Masa del recipiente	gr	130,00
m8	Masa del recipiente + Muestra SSS	gr	2135,00
m9 = m8 - m7	Masa de la muestra SSS	gr	2005,00
m10	Masa del recipiente	gr	130,00
m11	Masa del recipiente + Muestra seca	gr	2065,90
m12 = m11 - m10	Masa de la muestra seca	gr	1935,90
CAR = ((m9 - m12) /m12) *100	**Capacidad de absorción del ripio reciclado**	**%**	**3,57**

Anexo 12:
Ensayo de densidad real y capacidad de absorción del FCC

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
m1	Masa del picnómetro	gr	144,20
m2	Masa del picnómetro + Muestra SSS	gr	207,20
m3	Masa del picnómetro + Muestra SSS + Agua	gr	558,10
m4 = m3 - m2	Masa de agua añadida	gr	350,90
m5	Masa del picnómetro + 500 cm3 de agua	gr	512,80
m6 = m5 - m1	Masa de 500 cm3 de agua	gr	368,60
DG = m6/500cm3	Densidad del agua	gr/cm3	0,74
m7 = m6 - m4	Masa del agua desalojada por la muestra	gr	17,70
Msss = m2 - m1	Masa del agregado	gr	63,00
Vsss = m7/DA	Volumen del agua desalojada	cm3	24,01
DRA = Msss/Vsss	**Densidad real del FCC**	**gr/cm3**	**2,62**

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR	
Muestra			1	2
m8	Masa del recipiente	gr	4,10	4,00
m9	Masa del recipiente + Muestra SSS	gr	114,70	113,00
m10 = m9 - m8	Masa de la muestra SSS	gr	110,60	109,00
m11	Masa del recipiente	gr	4,10	4,00
m12	Masa del recipiente + Muestra seca	gr	108,90	107,70
m13 = m12 - m11	Masa de la muestra seca	gr	104,80	103,70
CA = ((m10 - m13) /m13) *100	Capacidad de absorción	%	5,53	5,11
CAA = (CA1 + CA2) /2	**Capacidad de absorción promedio del FCC**	**%**	**5,32**	

Anexo 13:
Ensayo de densidad aparente del ripio

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Masa del recipiente	Kg	9,98
Masa de la placa de vidrio	Kg	2,34
Masa de la placa de vidrio + molde + agua	Kg	32,58
Masa del agua	Kg	20,26
Temperatura del agua	C°	19,00
Densidad del agua	Kg/m3	998,49
Volumen del Recipiente	dm3	20,30

Densidad Aparente	Agregado + Recipiente	Agregado (Kg)	Densidad Aparente (Kg/dm3)
Suelta	39,40	29,42	**1,45**
	39,25	29,27	
Compactada	40,59	30,61	**1,51**
	40,76	30,78	

Anexo 14:
Ensayo de densidad aparente de la arena

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Masa del recipiente	Kg	9,98
Masa de la placa de vidrio	Kg	2,34
Masa de la placa de vidrio + molde + agua	Kg	32,58
Masa del agua	Kg	20,26
Temperatura del agua	C°	19,00
Densidad del agua	Kg/m3	998,49
Volumen del Recipiente	dm3	20,30

Densidad Aparente	Agregado + Recipiente	Agregado (Kg)	Densidad Aparente (Kg/dm3)
Suelta	41,26	31,28	**1,54**
	41,14	31,16	
Compactada	43,01	33,03	**1,62**
	42,88	32,90	

Anexo 15:
Ensayo de densidad aparente del ripio reciclado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Masa del recipiente	Kg	9,98
Masa de la placa de vidrio	Kg	2,34
Masa de la placa de vidrio + molde + agua	Kg	32,58
Masa del agua	Kg	20,26
Temperatura del agua	C°	19,00
Densidad del agua	Kg/m3	998,49
Volumen del Recipiente	dm3	20,30

Densidad Aparente	Agregado + Recipiente	Agregado (Kg)	Densidad Aparente (Kg/dm3)
Suelta	38,50	28,52	**1,40**
	38,31	28,33	
Compactada	39,75	29,77	**1,47**
	39,82	29,84	

Anexo 16:
Ensayo de densidad aparente del FCC

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Masa del recipiente	Kg	9,98
Masa de la placa de vidrio	Kg	2,34
Masa de la placa de vidrio + molde + agua	Kg	32,58
Masa del agua	Kg	20,26
Temperatura del agua	C°	19,00
Densidad del agua	Kg/m3	998,49
Volumen del Recipiente	dm3	20,30

Densidad Aparente	Agregado + Recipiente	Agregado (Kg)	Densidad Aparente (Kg/dm3)
Suelta	28,56	18,58	**0,93**
	29,10	19,12	
Compactada	30,45	20,47	**1,00**
	29,92	19,94	

Anexo 17:
Ensayo de densidad óptima de la mezcla con agregados naturales

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Masa del recipiente	Kg	9,98
Masa de la placa de vidrio	Kg	2,34
Masa de la placa de vidrio + molde + agua	Kg	32,58
Masa del agua	Kg	20,26
Temperatura del agua	C°	19,00
Densidad del agua	Kg/m3	998,49
Volumen del Recipiente	dm3	20,30

Mezcla %		Cantidad (Kg)		Fino añadido (Kg)	Agregado + Recipiente	Agregado (Kg)	Densidad Aparente (Kg/dm3)
GRUESO	FINO	GRUESO	FINO	FINO	AGREGADO FINO + GRUESO		
100,00	0,00	40,00	0,00	0,00	40,35	30,37	**1,48**
					39,90	29,92	
90,00	10,00	40,00	4,44	4,44	41,85	31,87	**1,57**
					42,05	32,07	
80,00	20,00	40,00	10,00	5,56	45,89	35,91	**1,77**
					46,02	36,04	
70,00	30,00	40,00	17,14	7,14	48,95	38,97	**1,93**
					49,36	39,38	
60,00	40,00	40,00	26,67	9,52	50,85	40,87	**2,01**
					50,68	40,70	
50,00	50,00	40,00	40,00	13,33	51,46	41,48	**2,04**
					51,36	41,38	
40,00	60,00	40,00	60,00	20,00	50,48	40,50	**1,99**
					50,15	40,17	

Anexo 18:
Ensayo de densidad óptima de la mezcla con agregados reciclados

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Masa del recipiente	Kg	9,98
Masa de la placa de vidrio	Kg	2,34
Masa de la placa de vidrio + molde + agua	Kg	32,58
Masa del agua	Kg	20,26
Temperatura del agua	C°	19,00
Densidad del agua	Kg/m3	998,49
Volumen del Recipiente	dm3	20,30

Mezcla %		Cantidad (Kg)		Fino añadido (Kg)	Agregado + Recipiente	Agregado (Kg)	Densidad Aparente (Kg/dm3)
GRUESO	FINO	GRUESO	FINO	FINO	AGREGADO FINO + GRUESO		
100,00	0,00	40,00	0,00	0,00	38,85	28,87	**1,43**
					39,05	29,07	
90,00	10,00	40,00	4,44	4,44	39,50	29,52	**1,45**
					39,35	29,37	
80,00	20,00	40,00	10,00	5,56	40,43	30,45	**1,51**
					40,65	30,67	
70,00	30,00	40,00	17,14	7,14	41,26	31,28	**1,54**
					41,17	31,19	
60,00	40,00	40,00	26,67	9,52	42,09	32,11	**1,58**
					42,21	32,23	
50,00	50,00	40,00	40,00	13,33	42,89	32,91	**1,62**
					43,01	33,03	
40,00	60,00	40,00	60,00	20,00	42,30	32,32	**1,59**
					42,04	32,06	

Anexo 19:
Resistencia y módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

CÓDIGO	N°	REEMPLAZO				DÍAS DE CURADO					
		AGR (%)		FCC (%)		ÁREA (cm2)	CARGA (kg)	ESFUERZO COMPRESIÓN (kg/cm2)	ESF. PROM	MÓDULO ELASTICIDAD MPa	MÓD. ELASTICIDAD PROMEDIO MPa
		0	100	0	100						
HC - 1	5	X	-	X	-	78,54	13309,03	169,46	171,45	19162,85	19273,68
HC - 2						78,54	13548,13	172,50		19334,22	
HC - 3						78,54	13245,26	168,64		19116,89	
HC - 4						78,54	13105,85	166,87		19016,01	
HC - 5						78,54	14120,57	179,79		19738,45	
HC - 6	5	X	-	X	-	78,54	14993,91	190,91	196,55	20339,69	20636,51
HC - 7						78,54	15005,54	191,06		20347,58	
HC - 8						78,54	15707,57	199,99		20818,12	
HC - 9						78,54	15455,24	196,78		20650,23	
HC - 10						78,54	16024,25	204,03		21026,93	
HC - 11	5	X	-	X	-	78,54	18729,75	238,47	239,74	22732,80	22793,12
HC - 12						78,54	18852,15	240,03		22806,96	
HC - 13						78,54	18856,25	240,08		22809,44	
HC - 14						78,54	18808,26	239,47		22780,39	
HC - 15						78,54	18900,23	240,64		22836,02	

Anexo 20:
Resistencia y módulo de elasticidad del hormigón con agregados reciclados

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
"Análisis de la resistencia a compresión del hormigón simple con agregado grueso reciclado y craqueo catalítico fluidizado en reemplazo del agregado fino"

CÓDIGO	N°	REEMPLAZO				DÍAS DE CURADO					
		AGR (%)		FCC (%)		ÁREA (cm2)	CARGA (kg)	ESFUERZO COMPRESIÓN (kg/cm2)	ESF. PROM	MÓDULO ELASTICIDAD MPa	MÓD. ELASTICIDAD PROMEDIO MPa
		0	100	0	100						
HR - 1	5	X	-	X	-	78,54	3069,54	39,08	37,75	9202,88	9043,52
HR - 2						78,54	2855,94	36,36		8876,90	
HR - 3						78,54	2934,78	37,37		8998,60	
HR - 4						78,54	2938,42	37,41		9004,17	
HR - 5						78,54	3024,46	38,51		9135,05	
HR - 6	5	X	-	X	-	78,54	3912,58	49,82	47,47	10390,07	10139,49
HR - 7						78,54	3576,15	45,53		9933,33	
HR - 8						78,54	3620,45	46,10		9994,66	
HR - 9						78,54	3589,48	45,70		9951,82	
HR - 10						78,54	3940,85	50,18		10427,54	
HR - 11	5	X	-	X	-	78,54	6158,26	78,41	74,17	13035,15	12675,29
HR - 12						78,54	5548,89	70,65		12373,43	
HR - 13						78,54	5815,95	74,05		12667,68	
HR - 14						78,54	6025,56	76,72		12893,94	
HR - 15						78,54	5578,36	71,03		12406,24	

Anexo 21:
Análisis Fluorescencia de Rayos X

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Resultados Análisis Fluorescencia de Rayos X

Solicitante: Srta. María José Espinoza
Referencia: ST - 8957
Fecha: 12/06/2025
Muestras recibidas: Una muestra sólida denominada:
Muestra 1: Catalizador FCC (*Código registrado según el solicitante*).

El análisis químico de la muestra se determinó en el equipo de Fluorescencia de rayos X S8 Tiger, con el programa Spectra Pluss. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis:

Elemento	**Muestra 1**
	Contenido (%)
Si	25,86
Al	23,72
La	2,46
Ti	0,62
Fe	0,60
Na	0,22
P	0,11
K	0,10
Mg	0,09
Y	0,06
S	0,06
Ca	0,05
V	0,04
Ni	0,02
Zn	0,01
Zr	0,01

Nota: *La muestra fue analizada mediante* ***pastilla prensada*** *utilizando el método QuantExpress. Además, es importante indicar que,* ***el equipo de FRX*** *lee los elementos presentes en la muestra* ***desde el sodio hasta el uranio.***

DIANA ENDARA BRANICHNIKOVA

Ing. Diana Endara PhD.
Jefa de Departamento

EVELYN PAMELA CRIOLLO TIRADO

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio

Anexo 22:
Presupuesto – APU del proyecto UNIDOS POR UN SUEÑO

RUBRO: 17 **Bordillo de tina de baño alto=15cm**
DETALLE: **Hormigón Simple f'c=180 Kg/cm2** UNIDAD: **m**

EQUIPOS

DESCRIPCION	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
HERRAMIENTA MANUAL	1,00	0,30	0,30	0,44	0,13
SUBTOTAL M					0,13

MANO DE OBRA

DESCRIPCION (CATEG.)	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
Albañil (Cat. III) Est. Ocupac. D2	1,00	3,08	3,08	0,44	1,36
Peón (Cat. I) Estr. Ocupacional E2	0,40	3,04	1,22	0,44	0,54
Maestro de obra (Cat IV.) Est. Ocupac. B3	0,05	3,41	0,17	0,44	0,08
SUBTOTAL N					1,98

MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNITARIO B	COSTO C = A x B
CEMENTO TIPO PORTLAND	KG	4,95	0,15	0,74
ARENA	M3	0,03	17,00	0,51
RIPIO	M3	0,03	17,00	0,51
AGUA POTABLE	M3	0,05	0,50	0,03
TABLA DE MONTE	U	0,25	2,20	0,55
CLAVOS 2" - 3"	KG	0,10	2,10	0,21
SUBTOTAL O				2,55

Anexo 23:
Presupuesto – APU del proyecto UNIDOS POR UN SUEÑO

RUBRO: 3 **Replantillo H.S. 180Kg/cm2**

DETALLE: **hormigón f'c = 180 Kg/cm2** UNIDAD: **m3**

EQUIPOS

DESCRIPCION	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
HERRAMIENTA MANUAL	6,00	0,30	1,80	2,29	4,12
CONCRETERA 1 SACO	1,00	3,36	3,36	2,29	7,69
COMPACTADOR DE PLANCHA	0,30	3,36	1,01	2,29	2,31
CILINDROS TOMA DE MUESTRAS Y CONO DE ABRAHAMS	0,10	0,20	0,02	2,29	0,05
SUBTOTAL M					14,17

MANO DE OBRA

DESCRIPCION (CATEG.)	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
Maestro de obra (Cat IV.) Est. Ocupac. B3	0,15	3,41	0,51	2,29	1,17
Albañil (Cat. III) Est. Ocupac. D2	2,00	3,08	6,16	2,29	14,11
Peón (Cat. I) Estr. Ocupacional E2	3,00	3,04	9,12	2,29	20,88
SUBTOTAL N					36,16

MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNITARIO B	COSTO C = A x B
CEMENTO TIPO PORTLAND	SAC	6,70	7,93	53,13
ARENA	M3	0,70	17,00	11,90
RIPIO	M3	0,80	17,00	13,60
AGUA POTABLE	M3	0,20	0,50	0,10
SUBTOTAL O				78,73

Anexo 24:
Proforma agregados FREVI

FERRETERÍA FREVI S.A.

Distribuidora de materiales para la construcción

Dirección: Av. Cevallos y Rocafuerte, Ambato, Ecuador

Teléfono: (03) 284-1122 | Email: ventas@frevisa.com

Fecha de emisión: 20/05/2025

PROFORMA DE MATERIALES - HORMIGÓN SIMPLE

Material	Unidad	Precio Unitario ($)
Arena lavada	m3	11,00
Ripio triturado 1 pulgada	m3	15,00

_____

Encargado de Ventas - FREVI S.A.