

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Implementación de Fibras Naturales y Agregados Reciclados en
Vigas de Hormigón**

Tommy Mateo Silva Cabascango

Juan Martín Tamayo Marín

Ingeniería civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 18 de Diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Implementación de fibras naturales y agregados reciclados en
vigas de hormigón**

**Tommy Mateo Silva Cabascango
Juan Martín Tamayo Marín**

Nombre del profesor, Título académico

Francisco Játiva, PhD

Quito, 18 de Diciembre de 2024

© **DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Juan Martín Tamayo Marín
 Tommy Mateo Silva Cabascango

Códigos: 00321812
 00321414

Cédulas de identidad: 1724403538
 1720993342

Lugar y fecha: Quito, 18 de Diciembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>. 5

RESUMEN

El reemplazo de agregados pétreos, que representan cerca del 70% de la mezcla de hormigón en volumen, por agregados reciclados, junto con el uso de fibras naturales en lugar de sintéticas para mejorar la ductilidad, se presenta como una solución prometedora para disminuir el impacto ambiental de la industria de la construcción. En esta tesis se analiza la efectividad de los agregados reciclados en comparación con los convencionales y el desempeño de fibras naturales de abacá y coco frente a fibras de polipropileno mediante ensayos mecánicos i.e. resistencia a compresión, tenacidad y módulo dinámico, además de una caracterización detallada del agregado que incluye granulometría, densidad, absorción, abrasión y reactividad álcali-sílice. Los resultados muestran que el uso de agregados reciclados reduce, en promedio, la resistencia a compresión del hormigón en un 38% en comparación con el control, y disminuye la resistencia máxima a flexión en un 33%. En cuanto a la tenacidad, las fibras de abacá y coco presentan reducciones del 54% y 72%, respectivamente, en comparación con las fibras de polipropileno. Sin embargo, el uso de agregados reciclados aumenta la tenacidad en un promedio del 30% frente a los agregados control. Por último, el análisis del módulo elástico dinámico muestra que los agregados reciclados tienen un valor promedio de 18% inferiores a los del control, mientras que el uso de fibras naturales incrementa dicho módulo en comparación al uso de fibras de polipropileno.

Palabras clave: Agregados reciclados, fibras naturales, resistencia a la compresión, ensayo de tenacidad, modulo dinámico, hormigón sostenible.

ABSTRACT

The replacement of natural aggregates, which represent about 70% of the concrete mix by volume, with recycled aggregates, along with the use of natural fibers instead of synthetic ones to improve ductility, emerges as a promising solution to reduce the environmental impact of the construction industry. This thesis analyzes the effectiveness of recycled aggregates compared to conventional ones and the performance of natural fibers such as abaca and coconut compared to polypropylene fibers through mechanical tests i.e. compressive strength, toughness, and dynamic modulus, as well as a detailed characterization of the aggregates, including granulometry, density, absorption, abrasion, and alkali-silica reactivity. The results show that the use of recycled aggregates reduces, on average, the compressive strength of concrete by 38% compared to the control and decreases the maximum flexural strength by 33%. Regarding toughness, abaca and coconut fibers show reductions of 54% and 72%, respectively, compared to polypropylene fibers. However, the use of recycled aggregates increases toughness by an average of 30% compared to control aggregates. Finally, the analysis of the dynamic elastic modulus shows that recycled aggregates have an average value 18% lower than the control, while the use of natural fibers increases this modulus compared to the use of polypropylene fibers.

Keywords: Recycled aggregates, natural fibers, compressive strength, toughness test, dynamic modulus, sustainable concrete.

1.INTRODUCCIÓN	12
1.1 Antecedentes.....	12
1.2 Justificación.....	14
1.3 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo principal.....	15
1.2.2 Objetivos Secundarios.....	15
2.1 Materiales	16
2.1.1 Agregados reciclados.....	16
2.1.2 Fibras naturales y sintéticas.....	17
2.2 Metodología	19
2.2 Ensayos de características mecánicas y de clasificación del agregado.	19
2.2.2 Fabricación de mezcla y elementos para ensayos.	19
2.2.3 Ensayos de propiedades mecánicas de hormigón fabricado a base de agregados reciclados y fibras naturales.	21
2.3 Resultados y análisis de resultados.	23
2.3.1 Resultados y análisis de granulometría (ASTM C136/C33).	23
2.3.2 Resultados y análisis de prueba de densidad y absorción (ASTM C127/C128).	27
2.3.3 Resultados y análisis de prueba de Álcali-sílice (ASTM C1260).	28
2.3.4 Resultados y análisis prueba de compresión.	29
2.3.5 Resultados y análisis prueba de tenacidad.	31

2.3.6 Resultados y análisis ensayo de módulo dinámico.	36
3. CONCLUSIONES	38
4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	40
ANEXOS.....	42
Resultados de ensayo a compresión	42
Resultados de ensayo a flexión	43
Resumen resultados de ensayo a flexión.....	44
Resultados de Abrasión de Piedra #57	45
Resultados de Abrasión de Piedra #7	45
Resultados densidad y absorción piedra #57: Agregado Reciclado	46
Resultados densidad y absorción piedra #7: Agregado Reciclado	46
Resultados densidad y absorción arena: Agregado Reciclado Triturado	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA # 1: Resultados de granulometría para P#57	23
TABLA # 2: Resultados de granulometría para P#7	24
TABLA # 3: Resultados de granulometría para Arena	25
TABLA# 4: Resultados de densidad y absorción de los agregados	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: (a) Recolección de escombros, (b) Clasificación de escombros, (c) separación de chatarra mediante el uso de un electroimán, (d) producción de piedra #57, piedra #7 y arena reciclados, (e-f) agregados reciclados utilizados (Piedra #57, piedra #7 y arena).	16
Figura 2: (a) Fibra de abacá, (b) Fibra de coco, (c) Medición de fibra de polipropileno, (d) medición fibras naturales, (e) Medición de diámetro de fibras naturales, (f) Ensayo de tracción a fibras naturales.	17
Figura 3: (a) Curvas esfuerzo vs deformación de las fibras de coco, (d) Curvas esfuerzo vs deformación de las fibras de abacá.	19
Figura 4: (a) Primas fabricados con agregados reciclados y fibras, (b) cilindros obtenidos de la mezcla, (c) discos fabricados para ensayo de modulo dinámico	20
Figura 5: (a) Ensayo de compresión, (b) ensayo de flexión, (c) Ensayo de módulo dinámico.	22
Figura 6: Curva granulométrica para P#57.	23
Figura 7: Curva granulométrica para P#7.	24
Figura 8: Curva granulométrica para arena.	25
Figura 9: Resultados de ensayo de reactividad de álcali-sílice de especímenes fabricados con agregados reciclados y comparación con viguetas control.	28
Figura 10: Resultados de ensayo de resistencia a la compresión de cilindros fabricados con agregados naturales y fibras, y comparación con especímenes control.	29
Figura 11: Resultados normalizados de ensayo de resistencia a la compresión.	29
Figura 12: Resultados de ensayo de tenacidad a vigas fabricadas con: (a) Agregado control y fibra de polipropileno, (b) Agregado reciclado y fibra de polipropileno, (c) Agregado	

control y fibra de abacá, (d) Agregado reciclado y fibra de abacá, (e) Agregado control y fibra de coco, (f) Agregado reciclado y fibra de coco.	31
Figura 13: Cargas máximas de los ensayos a tracción de cada una de las mezclas ensayadas.	32
Figura 14: Resultados de tenacidad promedio de las vigas ensayadas con cada una de las mezclas realizadas.	32
Figura 15: Resultados del índice de resistencia a la flexión.	33
Figura 16: Resultados de ensayo de módulo dinámico a discos de hormigón.	37
Figura 17: Gráficas de Voigt-Reuss de reducción de módulo de elasticidad al agregar fibras: (a) mezcla con FPP, (b) mezcla con FAA, (c) mezcla con FCC.	38

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El crecimiento poblacional a nivel mundial, entre otros factores, ha impulsado un proceso acelerado de urbanización, lo que ha resultado en la expansión de las metrópolis. Según el Banco Mundial, alrededor del 56% de la población en el mundo vive actualmente en ciudades, y se espera que para 2050 esta cifra se duplique (Grupo Banco Mundial, 2023). Este proceso de urbanización conlleva la necesidad de una mayor construcción de infraestructura para garantizar el bienestar general. De hecho, se prevé una alta demanda de construcción: "Alrededor del 60% de la superficie que se espera urbanizar para 2030 aún no ha sido construida" (ONU, 2015). Esta demanda de infraestructura implica un mayor consumo de materiales como el cemento, un incremento en la producción de residuos, como escombros, y la búsqueda de planes sostenibles en la industria de la construcción.

En sus varios campos de aplicación, la industria de la construcción y del hormigón aporta mucho al desarrollo de las comunidades. Sin embargo, se sabe que esta tiene un gran impacto sobre el ambiente. Se ha reportado que, a escala global, esta industria es responsable por casi el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero, 40% de la producción total de energía, 16% del consumo total de agua y entre 30% y 40% de todos los desechos sólidos (Radich, 2023). La producción de escombros por la construcción y demolición, la minería de agregados pétreos, uso de fibras plásticas, son algunos ejemplos de cómo esta industria impacta en el ambiente. A nivel mundial, cada año se producen más de 10 mil millones de toneladas de residuos de construcción y demolición a partir de actividades de construcción, demolición y excavación de terrenos. (Islam et al., 2024).

Se han llevado a cabo varias investigaciones para proponer soluciones para el impacto ambiental generado por la industria de la construcción y la fabricación de hormigón, como por ejemplo la implementación de agregado reciclado en el hormigón. Esto ha tenido una gran aceptación ya que, estos pueden ser hasta un 100% reciclables, disminuyen la contaminación debido a que los residuos no llegarán a cuencas o vertederos y se reduce la extracción de materias primas naturales no renovables (Mendoza & Chávez, 2017). Es una solución atractiva también, porque la composición del concreto generalmente está formada en un 70% por agregados por volumen.

El hormigón es el material antropogénico más utilizado en el mundo, y las estrategias de economía circular serán clave para abordar los innumerables desafíos que enfrenta su uso hoy y en el futuro (Marsh et al., 2022). Sin embargo, el uso de agregados reciclados puede afectar la resistencia a la compresión del hormigón, aumentar la segregación e incidir en la trabajabilidad. Un estudio en la Universitat Politècnica de Catalunya investigó mezclas de hormigón que reemplazaban hasta el 50% de los agregados tradicionales por agregados reciclados. Se encontró que, debido a la calidad variable y menor del agregado reciclado, el cual contiene más impurezas y mortero residual, estas mezclas presentaron un aumento en la absorción de agua. Esto conduce a la necesidad de incrementar la relación agua-cemento, afectando negativamente la trabajabilidad y reduciendo la resistencia a la compresión del hormigón, además de causar problemas en el fraguado y una mayor segregación. (Gonzalez-Corominas & Etxeberria, s/f)

El uso de fibras en el hormigón ayuda a mejorar varias propiedades mecánicas de este material. Las fibras se utilizan en el hormigón para mejorar su rendimiento posterior al agrietamiento esto al unir las grietas y prevenir la propagación de grietas por contracción.

Además, al aplicar fibras de polipropileno a la mezcla se obtiene una mayor resistencia a la tracción del hormigón y mejora la capacidad de deformación (Małek et al., 2020). El uso de fibras de polipropileno no es amigable con el ambiente, por lo que usar fibras naturales en cambio es un útil recurso para la producción de un hormigón sostenible. Se han realizado estudios de la abundancia de fibras en Ecuador, donde se encontró que en el país existen más de 800 especies de fibras y se utilizan alrededor de 199 especies vegetales en diferentes industrias, entre ellas se encuentran las fibras de coco y abacá (Páez Moscoso, 2007). Se ha probado que el uso de fibras en el hormigón ayuda en gran medida a varias características termo acústicas, debido a un excelente desempeño térmico, absorción, atenuación acústica y resistencia al fuego. (Martínez, 2015). Investigaciones han evidenciado que la inclusión de fibras en el hormigón no solo mejora su resistencia a la tracción y a la flexión, sino que también amplía su durabilidad. Además, la adición de fibras es eficaz en la reducción de la formación de fisuras por contracción, lo que contribuye significativamente a la integridad estructural a largo plazo del hormigón. (Lantsoght, 2019)

1.2 Justificación

Las investigaciones realizadas a lo largo de los años han demostrado que el hormigón sostenible es una solución viable para contrarrestar el impacto ambiental de la industria de la construcción, por ejemplo, el reciclaje de residuos de construcción y demolición en hormigón es una de las soluciones sostenibles para prevenir una grave amenaza al medio ambiente debido a la extracción de áridos vírgenes y su ubicación en vertederos (Tenzin et al., 2023). Además, la integración de fibras naturales en el hormigón tiene el potencial de contribuir a la innovación sostenible en la industria de la construcción. (Batallas et al., 2024). Se puede decir entonces que el uso de materiales reciclados y naturales para la fabricación de

elementos de hormigón brinda una alternativa atractiva para la investigación en búsqueda de una aplicación en un futuro a grandes escalas en la industria de la construcción.

En búsqueda de una economía circular y gracias a una respuesta para la producción de materiales circulares, en conjunto con Holcim del Ecuador S.A., se ha realizado una investigación sobre el uso de materiales reciclados y fibras naturales. Este trabajo de titulación de pregrado de la carrera de Ingeniería Civil busca evaluar propiedades mecánicas de hormigón sostenible elaborado con agregados reciclados y con fibras naturales de abacá y coco. Se compara el hormigón tradicional fabricado con agregados naturales y con fibras de polipropileno con hormigón fabricado con agregados reciclados y fibras naturales de abacá y coco. Tanto los agregados minados como reciclados fueron catalogados según: granulometría, absorción y densidad, abrasión, reactividad álcali-sílice. De igual manera propiedades mecánicas como: resistencia a la compresión, flexión y tenacidad y módulo de elasticidad dinámico fueron evaluadas

1.3 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

- Desarrollo de hormigón con agregados reciclados y fibras naturales.

1.2.2 Objetivos Secundarios

- Evaluar las características mecánicas y de clasificación del agregado reciclado. i.e. Granulometría, densidad y absorción, abrasión, reactividad álcali-sílice.
- Evaluar las propiedades mecánicas, i.e. Resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y tenacidad y medición del módulo dinámico del hormigón fabricado a base de agregados reciclados y fibras naturales (i.e fibra de abacá y fibra de coco) y

compararlo con el hormigón fabricado a base de agregado tradicional y fibras plásticas (i.e. fibras de polipropileno).

2. DESARROLLO

2.1 Materiales

2.1.1 Agregados reciclados

Los agregados reciclados fueron obtenidos por medio de la colaboración con Holcim del Ecuador S.A. Se procesaron 180 toneladas de escombros de construcción y demolición. Materiales no aptos para mezclas de hormigones tales como varillas de acero, plástico y basura, fueron separados del material principal. El agregado fue clasificado en tres granulometrías diferentes acorde a ASTM C136-19 Y ASTM C33-18 (ASTM, 2016, 2019b), piedra #57: 67.3 toneladas, piedra #7: 25.5 toneladas y arena: 87.2 toneladas fueron procesadas.

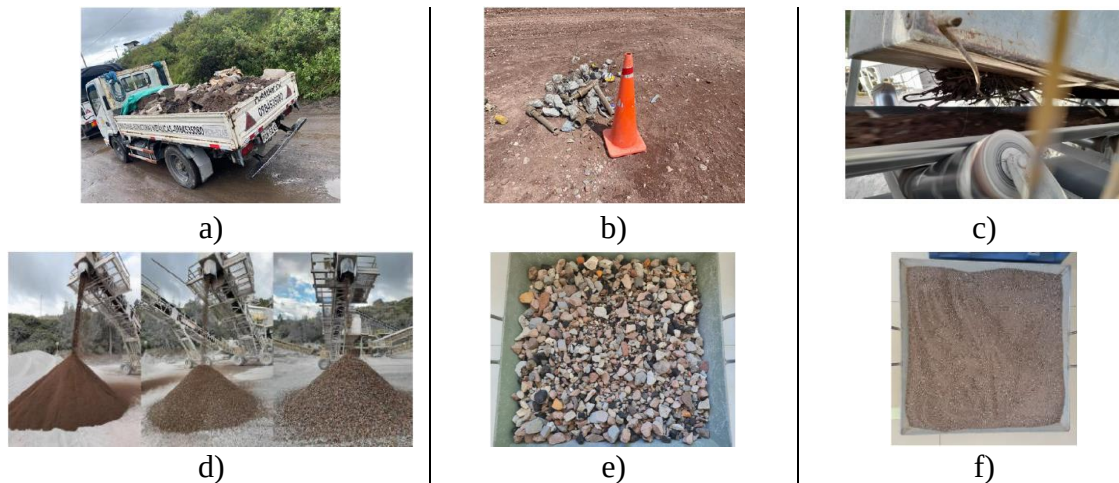


Figura 1: (a) Recolección de escombros, (b) Clasificación de escombros, (c) separación de chatarra mediante el uso de un electroimán, (d) producción de piedra #57, piedra #7 y arena reciclados, (e-f) agregados reciclados utilizados (Piedra #57, piedra #7 y arena).

2.1.2 Fibras naturales y sintéticas

Las muestras control fueron realizadas con fibras de polipropileno (FPPP) TUF-Strand-SF fabricada por Euclid®. Estas fibras cuentan con una longitud, $L=50\text{mm}$, un diámetro, $\varnothing = 0.68\text{ mm}$, y un módulo de elasticidad, E , de 9.5 GPa . En cuanto a las fibras naturales, se usaron fibras de abacá (FAA) y coco (FCC). Las FAA utilizadas provienen de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. Estas fibras originalmente tenían una longitud de entre 1.5m - 2m . Sin embargo, estas se cortaron a una longitud de 100mm para esta investigación. Las FCC, por otro lado, fueron obtenidas de la provincia de Manabí, Ecuador. La longitud de estas fibras originalmente oscilaba entre los 100mm y 150mm . Las mismas no fueron cortadas.

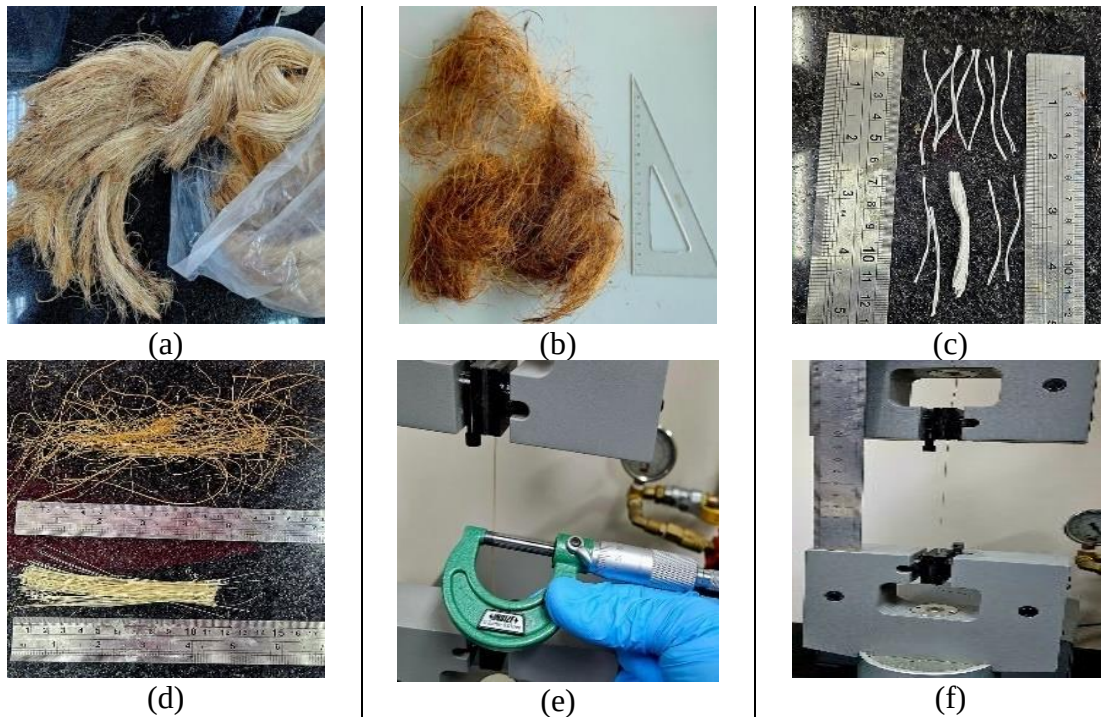
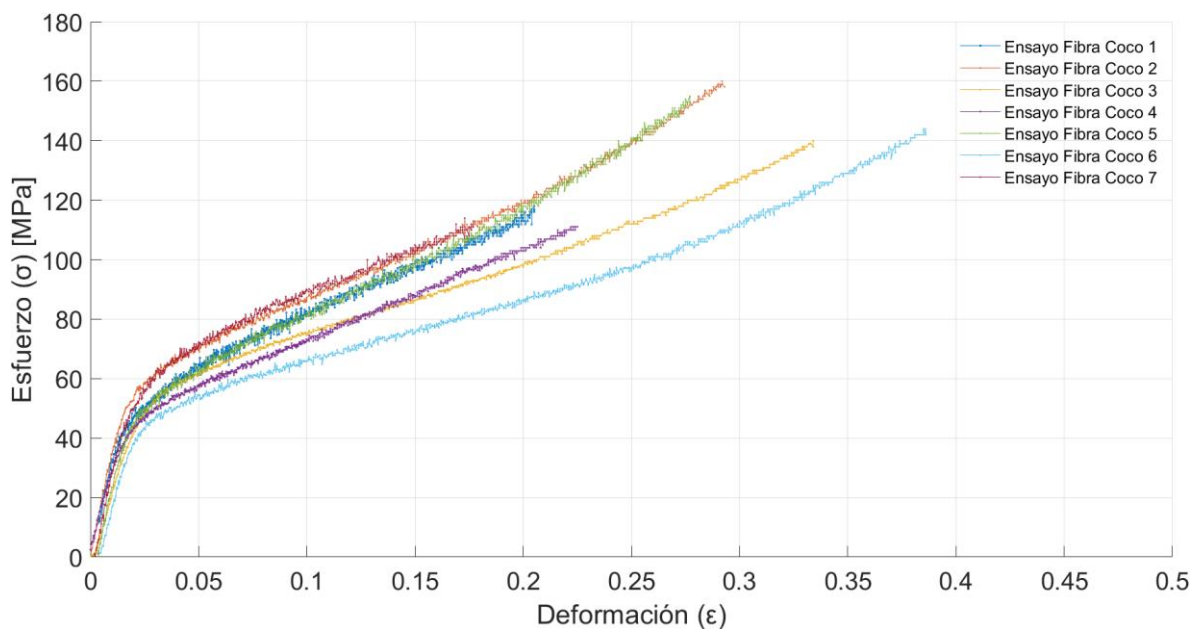
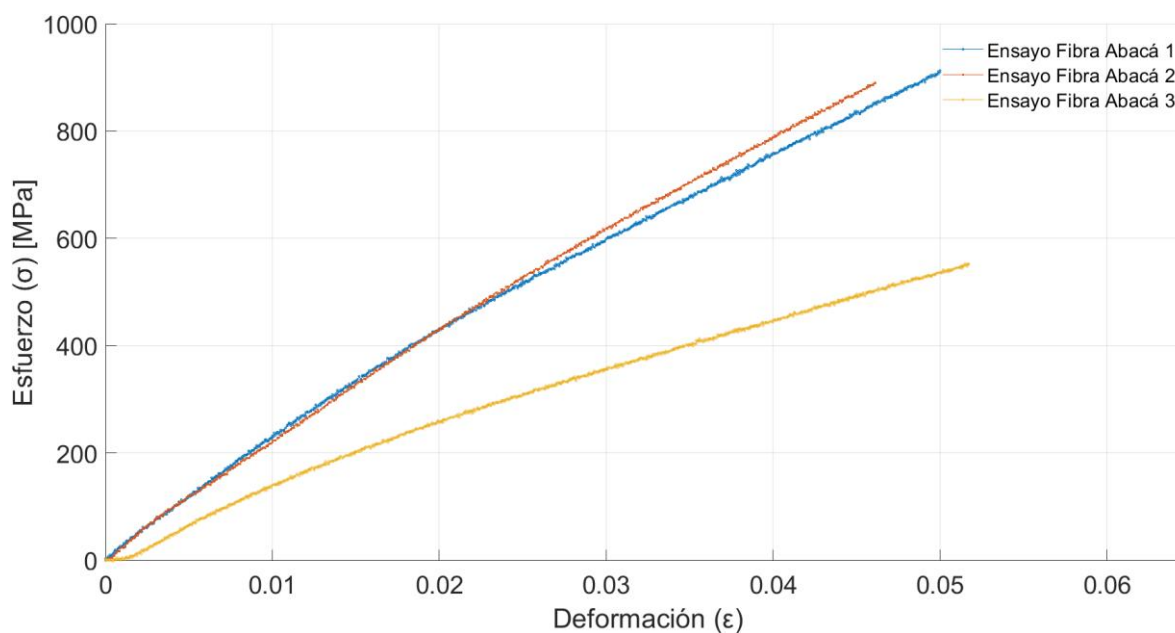


Figura 2: (a) Fibra de abacá, (b) Fibra de coco, (c) Medición de fibra de polipropileno, (d) medición fibras naturales, (e) Medición de diámetro de fibras naturales, (f) Ensayo de tracción a fibras naturales.

Se obtuvieron las propiedades mecánicas y físicas de las fibras FCC y FAA en el Laboratorio de Materiales de la USFQ. Para las FAA, se ha medido un diámetro promedio $\varnothing_{prom}=0.2\text{mm}$, una deformación axial máxima de 0.5cm, y se ha calculado un módulo de elasticidad $E=15.8\text{ GPa}$. De igual manera, se obtuvieron propiedades físicas y mecánicas para las FCC en el laboratorio de materiales de la USFQ, obteniendo un diámetro promedio, $\varnothing_{prom} = 0.18\text{ mm}$, una deformación máxima axial de 0.15cm y un módulo de elasticidad, $E=3.1\text{ GPa}$. Para obtener los datos de diámetro se realizaron mediciones como se muestra en la figura #2 (e). Los datos del ensayo de tracción se procesaron en Matlab para graficar esfuerzo vs deformación y obtener el módulo de elasticidad promedio a partir de la pendiente de la zona elástica como se muestra en la Figura 3.



a)



b)

Figura 3: (a) Curvas esfuerzo vs deformación de las fibras de coco, (d) Curvas esfuerzo vs deformación de las fibras de abacá.

2.2 Metodología

2.2.1 Ensayos de características mecánicas y de clasificación del agregado.

Para evaluar las características mecánicas y de clasificación del agregado, se realizaron los siguientes ensayos: granulometría (ASTM C136-19), densidad y absorción (ASTM C127-15 y ASTM C128-22), abrasión y uniformidad (ASTM C131-20), y reactividad álcali-sílice (ASTM C1260-14).

2.2.2 Fabricación de mezcla y elementos para ensayos.

Se desarrolló una mezcla donde se utilizó piedra #7 y arena como agregados debido a limitaciones geométricas del encofrado. La mezcla desarrollada constaba de un 60% de agregados por peso total de los materiales. Del total de agregados utilizados en la mezcla, el 60% fue piedra #7, considerada como agregado grueso, y el 40% restante fue arena,

considerada agregado fino. Esta composición de mezcla contaba con una relación agua-cemento, $a/c = 0.45$. Se usó un cemento de uso general, cemento Holcim GU, de acuerdo con la norma ASTM C1157-17 (ASTM, 2020). Para obtener una trabajabilidad adecuada, se utilizó un plastificante de cuarta generación. En todas las mezclas, se añadió un 1% por volumen de mezcla fabricada.

Se llevaron a cabo seis mezclas siguiendo la norma ASTM C192 (ASTM, 2019a). Tres mezclas fueron realizadas con agregado natural y FPP, FAA y FCC, y otras tres con agregado reciclado y las mismas fibras. Durante el proceso de mezclado, se añadió el plastificante y las fibras al mismo tiempo. De cada mezcla se obtuvieron seis cilindros con dimensiones $\varnothing = 101\text{mm} \times L = 200\text{mm}$ y cuatro prismas con dimensiones $500\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$. Tres de los cilindros fueron utilizados para ensayos de compresión, mientras que uno fue cortado en discos para realizar el ensayo de módulo dinámico ($\varnothing = 101\text{mm} \times L = 25\text{mm}$). De los cuatro prismas, tres fueron usados para el ensayo de tenacidad. Los especímenes restantes son duplicados para futuras pruebas.

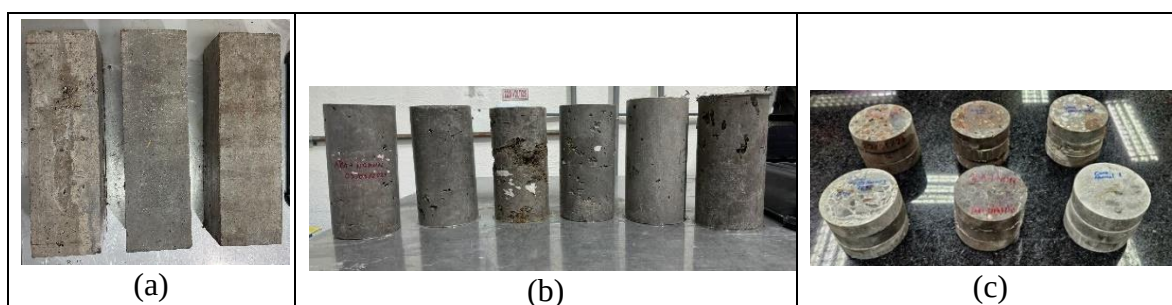


Figura 4: (a) Prismas fabricados con agregados reciclados y fibras, (b) cilindros obtenidos de la mezcla, (c) discos fabricados para ensayo de modulo dinámico

2.2.3 Ensayos de propiedades mecánicas de hormigón fabricado a base de agregados reciclados y fibras naturales.

La resistencia a la compresión fue realizada siguiendo la norma ASTM C39-23 (ASTM, 2021). Los ensayos fueron realizados después de 28 días de curado en condiciones standard.

La prueba de resistencia a flexión de hormigones reforzados con fibra fue realizada en base a la norma ASTM C1609-12 (ASTM, 2012). Para este ensayo se utilizaron prismas. Este ensayo se llevó a cabo después de los 28 días de curado en condiciones standard.

Para medir el módulo dinámico, se realizaron pruebas en discos de hormigón de 2.5 cm (1”) de espesor y 10.1 cm (4”) de diámetro, con diferentes mezclas: agregado natural y reciclado, combinados con fibras FPP, FAA y FCC. El método se basa en la teoría de Hutchinson (1979), que proporciona una solución aproximada para la vibración de flexión axisimétrica en placas circulares gruesas bajo condiciones libre-libre. La teoría supone que el desplazamiento axial no depende de la coordenada axial y que el desplazamiento radial varía linealmente con el espesor z . Esto implica un esfuerzo cortante constante a lo largo del espesor del disco y un efecto promedio nulo de la tensión axial. De esta manera, el método utiliza la frecuencia natural de un disco de hormigón relativamente delgado. (Rosero, 2018) Se midió la vibración axisimétrico tras un impacto generado por la caída de una bola de acero, con una masa de 150g con diámetro de una canica, en el centro del disco. Un acelerómetro de alta frecuencia, el cual se acopló al centro de la muestra mediante un adhesivo de secado rápido comercial, en el lado opuesto al impacto, registró la respuesta, conectado a un osciloscopio mediante un amplificador.

Los datos obtenidos, representados como voltaje en función del tiempo, se procesaron mediante MATLAB para calcular la frecuencia, lo que permitió determinar el módulo

dinámico. La señal fue analizada utilizando técnicas de Transformada Rápida de Fourier (FFT). La frecuencia fundamental se identificó a partir del pico más fuerte en el gráfico de densidad espectral, el cual típicamente indicaba solo una frecuencia dominante dentro del rango de frecuencias de interés, esto sirvió de base para el cálculo del módulo dinámico (Leming et al., 1998).

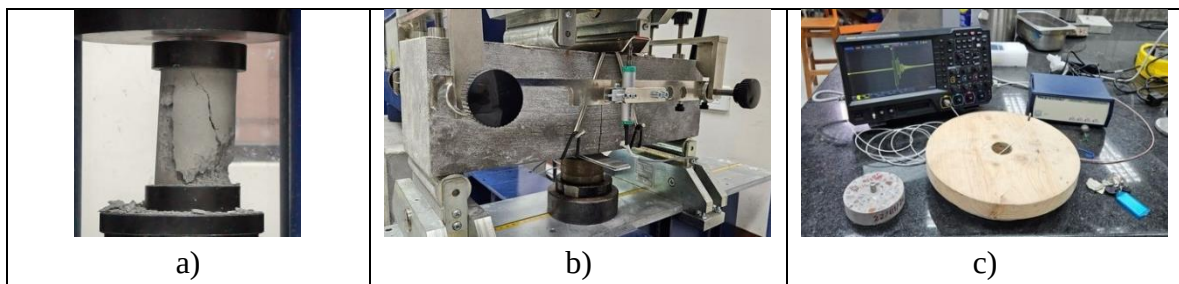


Figura 5: (a) Ensayo de compresión, (b) ensayo de flexión, (c) Ensayo de módulo dinámico.

2.3 Resultados y análisis de resultados.

2.3.1 Resultados y análisis de granulometría (ASTM C136/C33).

TABLA # 1: Resultados de granulometría para P#57

Tamices ASTM	Apertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido individual (%)	Porcentaje retenido acumulado	Pasante (%)
3"	76.200				
2 1/2"	63.500				
2"	50.600				
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0	100
1"	25.400	186.00	4	4	96
3/4"	19.050	946.00	19	23	77
1/2"	12.700	1878.00	38	60	40
3/8"	9.525	789.00	16	76	24
1/4"	6.350				
No. 4	4.760	1068.50	21	97	3
No. 8	2.680	88.00	2	99	1
No. 10	2.000				
No. 16	1.190	6.50	0	99	1
No. 20	0.840				
No. 30	0.590	3.50	0	99	1
No. 40	0.420				
No. 50	0.300				
No. 60	0.250				
No. 80	0.180				
No. 100	0.149				
No. 200	0.074				
Bandeja		28.00	0.56	100.00	0.00
Total		4993.50	100.00		
% Perdida		0.2	Mod. Finura		4.72

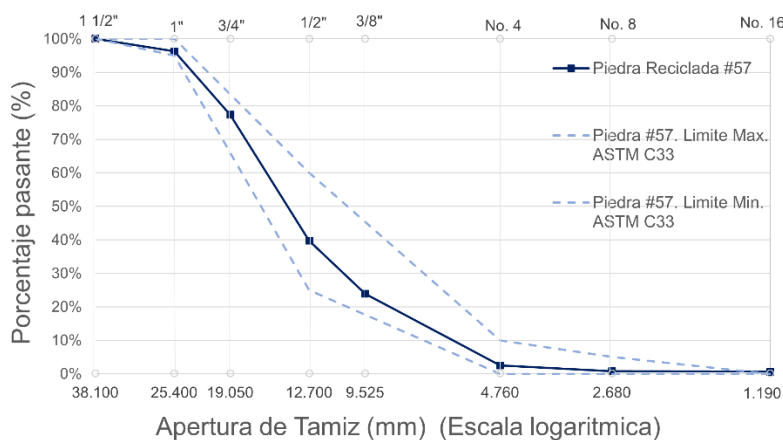


Figura 6: Curva granulométrica para P#57.

TABLA # 2: Resultados de granulometría para P#7

Tamices ASTM	Apertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido individual (%)	Porcentaje retenido acumulado	Pasante (%)
3"	76.200				
2 1/2"	63.500				
2"	50.600				
1 1/2"	38.100				
1"	25.400				
3/4"	19.050	0.00	0	0	100
1/2"	12.700	1724.50	35	35	65
3/8"	9.525	1714.50	34	69	31
1/4"	6.350				
No. 4	4.760	1415.00	28	97	3
No. 8	2.680	65.00	1	98	2
No. 10	2.000				
No. 16	1.190	9.00	0	99	1
No. 20	0.840				
No. 30	0.590	8.00	0	99	1
No. 40	0.420				
No. 50	0.300				
No. 60	0.250				
No. 80	0.180				
No. 100	0.149				
No. 200	0.074				
Bandeja		59.50	1.19	100.00	0.00
Total		4995.50	100.00		
% Perdida		0.2	Mod. finura		4.96

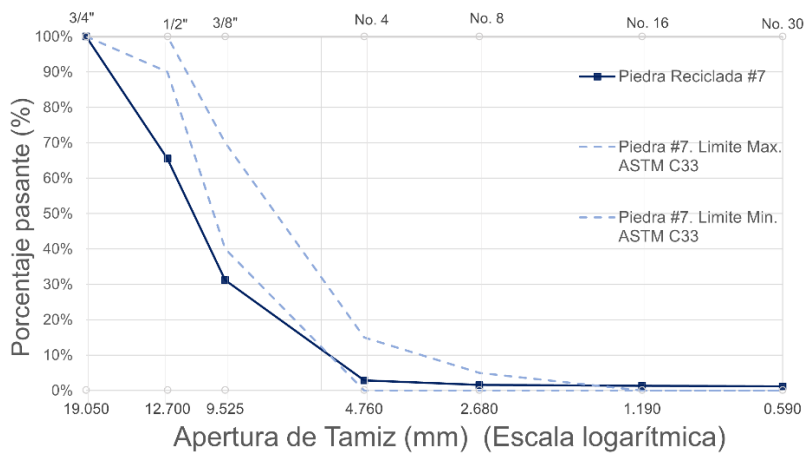


Figura 7: Curva granulométrica para P#7.

TABLA # 3: Resultados de granulometría para Arena

Tamices ASTM	Apertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido individual (%)	Porcentaje retenido acumulado	Pasante (%)
3"	76.200				
2 1/2"	63.500				
2"	50.600				
1 1/2"	38.100				
1"	25.400				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700				
3/8"	9.525	9.50	1	1	99
1/4"	6.350				
No. 4	4.760	23.00	2	3	97
No. 8	2.680	170.00	17	20	80
No. 10	2.000				
No. 16	1.190	191.50	19	39	61
No. 20	0.840				
No. 30	0.590	164.50	16	56	44
No. 40	0.420				
No. 50	0.300	157.5	16	72	28
No. 60	0.250				
No. 80	0.180				
No. 100	0.149	131.00	13	85	15
No. 200	0.074	78.00	8	93	7
Bandeja		73.00	7.31	100.00	0.00
Total		998.00	100.00		
% Perdida		0.2	Mod. finura		2.77

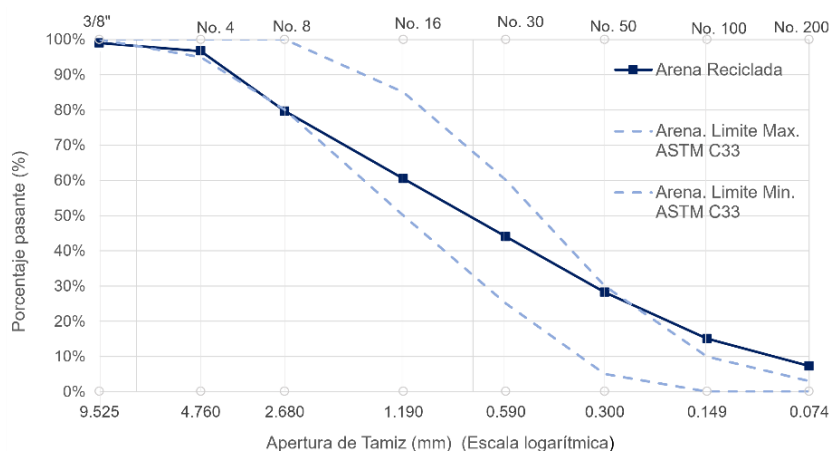


Figura 8: Curva granulométrica para arena.

Se procesaron un total de 67.3 toneladas de agregado bajo la clasificación P#57, 25.5 toneladas como P#7, y 87.2 toneladas designadas como arena. La categorización de estos agregados se realizó conforme a las normas ASTM C136 y ASTM C33. Posteriormente, se llevó a cabo la verificación de la granulometría para cada tipo de agregado, los detalles se muestran en las Figuras 6, 7 y 8.

En la Figura 6, la curva granulométrica para el agregado P#57 se ajusta a los límites especificados por la norma ASTM C33-18, lo que indica una buena gradación del material según los estándares establecidos.

Por otro lado, la curva granulométrica de P#7 no cumple con los estándares requeridos, ya que se ubica por debajo del límite inferior especificado por la norma. Este comportamiento indica una fragmentación ineficiente de las partículas más grandes, lo que resulta en un exceso de fracciones gruesas y una escasez de partículas finas. Además, este agregado muestra un coeficiente de uniformidad de 2, sugiriendo que es uniforme o está mal gradado, aunque su coeficiente de curvatura de 1.2 se encuentra dentro del rango aceptable de 1 a 3.

En cuanto a la arena procesada a partir de agregado grueso triturado, se observa en la figura 8 que excede el límite superior de la norma ASTM C33-18 en cuanto a partículas finas se refiere. Concretamente, un 7.3% de las partículas atraviesa el tamiz #200, como se muestra en la Tabla 3, superando el límite máximo de 7% para materiales finos (menores de 75 μm) permitido por la norma para agregados reciclados usados en hormigón no sujeto a abrasión. Por otro lado, el módulo de finura de esta arena es de 2.77, valor que se encuentra dentro del rango aceptado por la norma, que oscila entre 2.3 y 3.1.

2.3.2 Resultados y análisis de prueba de densidad y absorción (ASTM C127/C128).

Se determinaron la densidad en condición saturada seca (SSD) y el porcentaje de absorción para los agregados P#57, P#7 y arena. Los resultados están detallados en la Tabla 4, donde también se comparan con las características de los agregados control de mina.

TABLA # 4: Resultados de densidad y absorción de los agregados

Material	Control		Reciclados	
	ρ_{relativa} OD	% ABS	ρ_{relativa} OD	% ABS
Piedra #57	2.4	2.3	2.2	6
Piedra #7	2.31	2.4	2.18	6
Arena	2.03	2.5	1.67	21.6

Los resultados de la tabla indican que los agregados reciclados presentan una menor densidad y un mayor porcentaje de absorción en comparación con los agregados control.

En el caso de los agregados gruesos (P#57 y P#7), se registra una disminución promedio en la densidad del 7.5%, y el porcentaje de absorción se incrementa en un factor de 2.5 en comparación con los agregados control de mina. Estos cambios sugieren una posible alteración en las propiedades mecánicas del hormigón, incluyendo una reducción en la resistencia mecánica. Para la arena reciclada, las variaciones son aún más significativas: una reducción del 21.6% en la densidad y un aumento de 10.6 veces en la absorción comparado con la arena control.

2.3.3 Resultados y análisis de prueba de Álcali-sílice (ASTM C1260).

Se prepararon seis primas de mortero de dimensiones (25x25x285mm): tres con arena control que cumple con la norma ASTM C778 y tres con arena reciclada. Todas fueron sumergidas en NaOH a 80 °C durante 14 días, monitoreando diariamente su expansión para evaluar la reactividad álcali-sílice.

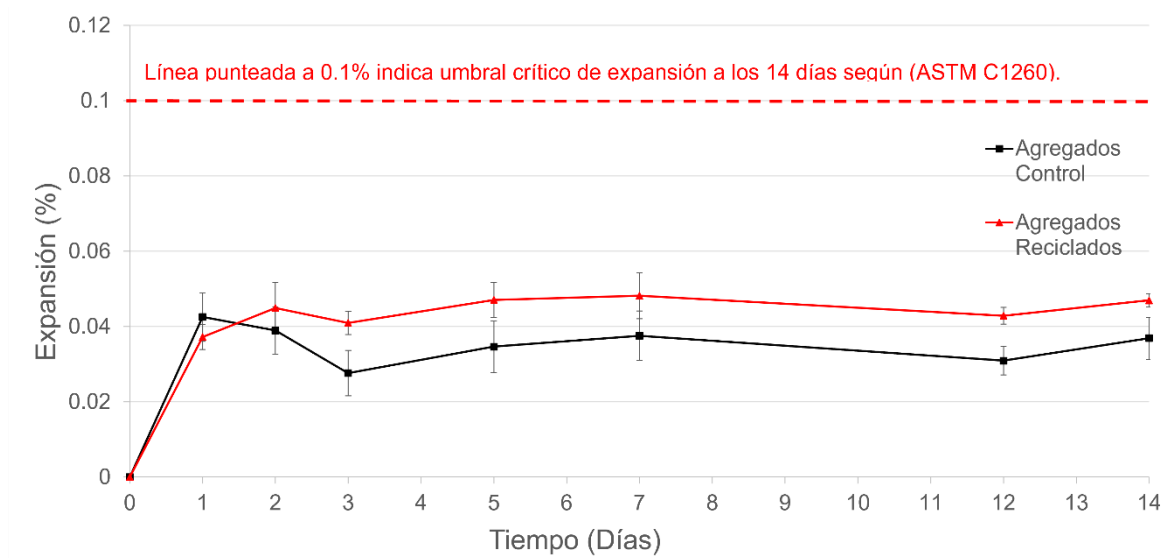


Figura 9: Resultados de ensayo de reactividad de álcali-sílice de especímenes fabricados con agregados reciclados y comparación con viguetas control.

La gráfica del ensayo de reactividad álcali-sílice muestra un comportamiento muy similar entre los agregados reciclados y control. Tanto los agregados reciclados como los de control exhiben un aumento inicial de expansión, estabilizándose rápidamente por debajo del límite crítico de 1000 $\mu\epsilon$ (0.1%) establecido por la norma ASTM 1260. Ambos comportamientos indican un bajo potencial de reactividad álcali-sílice.

2.3.4 Resultados y análisis prueba de compresión.

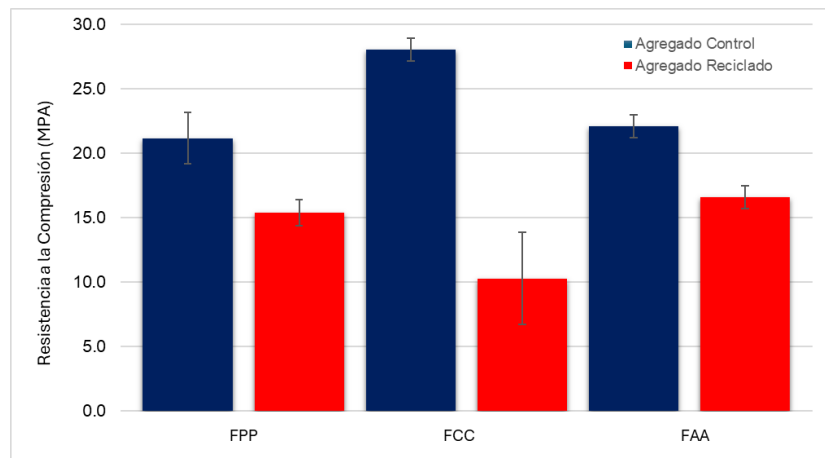


Figura 10: Resultados de ensayo de resistencia a la compresión de cilindros fabricados con agregados naturales y fibras, y comparación con especímenes control.

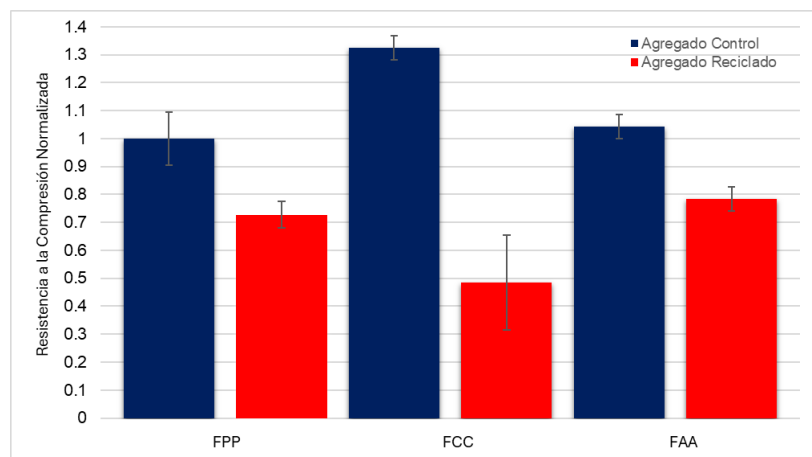


Figura 11: Resultados normalizados de ensayo de resistencia a la compresión.

Para obtener la resistencia a la compresión, se realizaron ensayos en los cilindros especificados en la sección 2.2.2, los cuales se llevaron a cabo después de los 28 días de curado estándar. Los cilindros fueron elaborados con agregado control o agregado reciclado y se utilizó un solo tipo de fibra para cada uno. Los resultados de las pruebas se muestran en la figura 10. La mezcla control tuvo una resistencia a la compresión de 21.2 MPa. En la figura 11, se muestra la normalización de los resultados a la muestra control. Se distingue que el

uso de agregados reciclados reduce la resistencia en un 27% respecto a la muestra control. Con FAA, las mezclas con agregado control alcanzaron 22.1 MPa, mientras que las con agregado reciclado tuvieron una resistencia 25% menor. Con FCC, el agregado control alcanzó 28.1 MPa, pero el agregado reciclado mostró una resistencia 63% menor, aunque estos resultados no son representativos debido a problemas en el encofrado y la trabajabilidad, resultando en cilindros porosos. El uso de fibras no influye directamente en la resistencia a la compresión. Sin embargo, se cree que existe un efecto de curado interno, debido al agua que absorben las fibras naturales durante el proceso de mezclado, que afecta positivamente la resistencia del hormigón, por lo que se puede ver en las gráficas que los cilindros fabricados con FAA y FCC, alcanzan resistencias a la compresión mayores a los fabricados con FPP. Esto debe corroborarse con ensayos de laboratorio.

2.3.5 Resultados y análisis prueba de tenacidad.

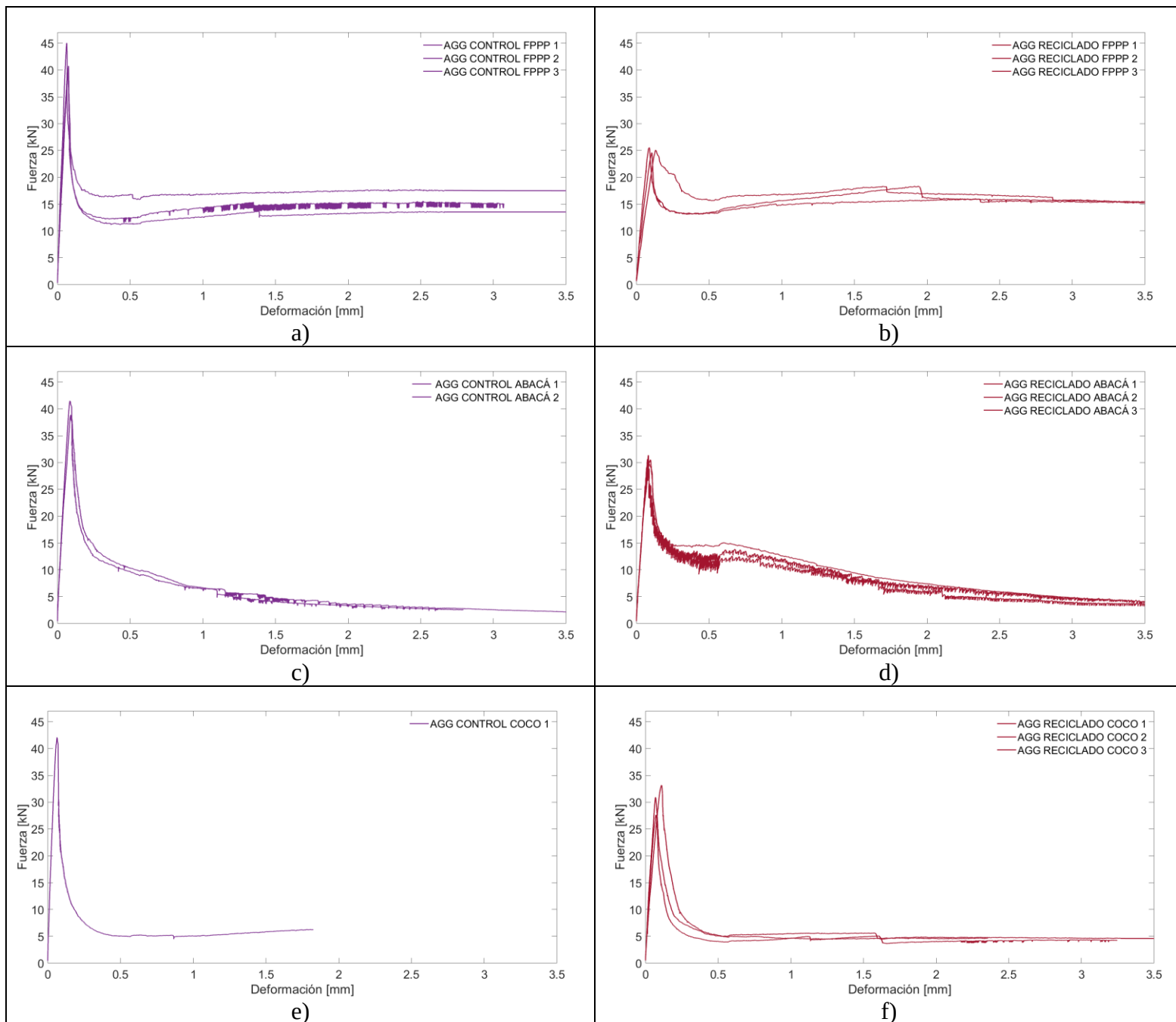


Figura 12: Resultados de ensayo de tenacidad a vigas fabricadas con: (a) Agregado control y fibra de polipropileno, (b) Agregado reciclado y fibra de polipropileno, (c) Agregado control y fibra de abacá, (d) Agregado reciclado y fibra de abacá, (e) Agregado control y fibra de coco, (f) Agregado reciclado y fibra de coco.

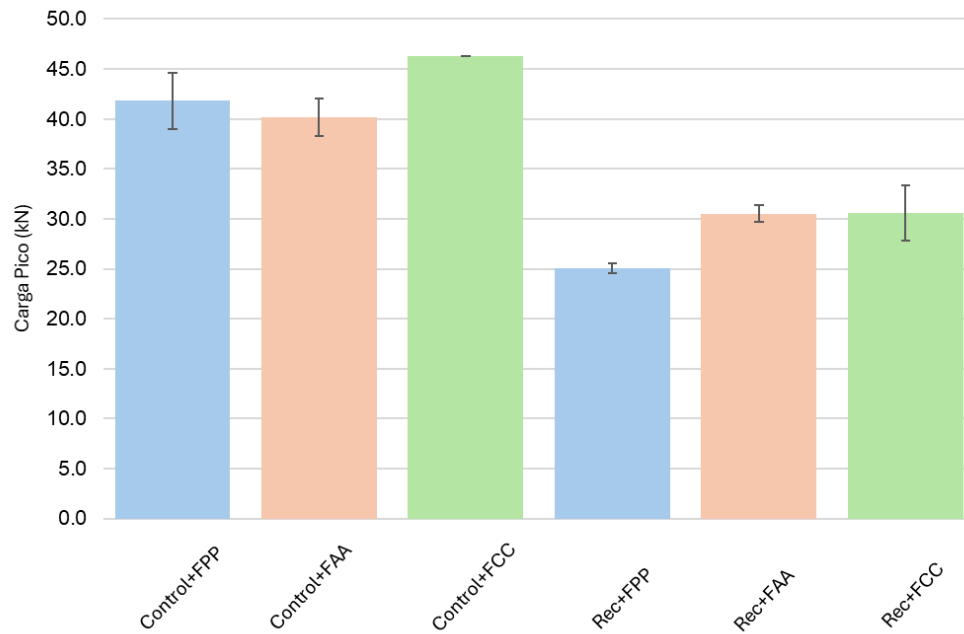


Figura 13: Cargas máximas de los ensayos a tracción de cada una de las mezclas ensayadas.

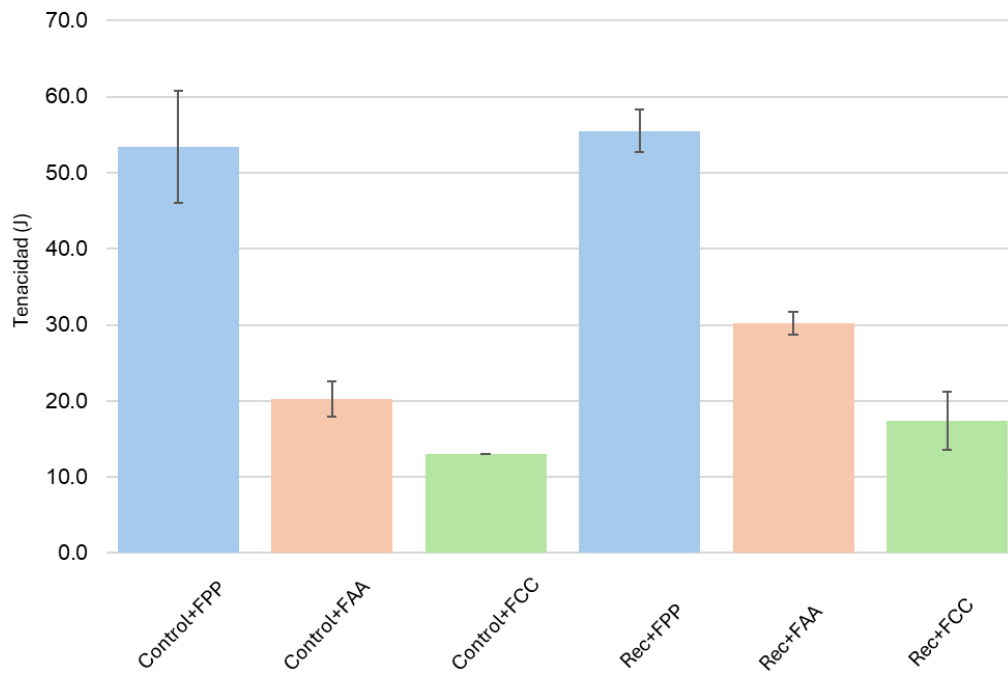


Figura 14: Resultados de tenacidad promedio de las vigas ensayadas con cada una de las mezclas realizadas.

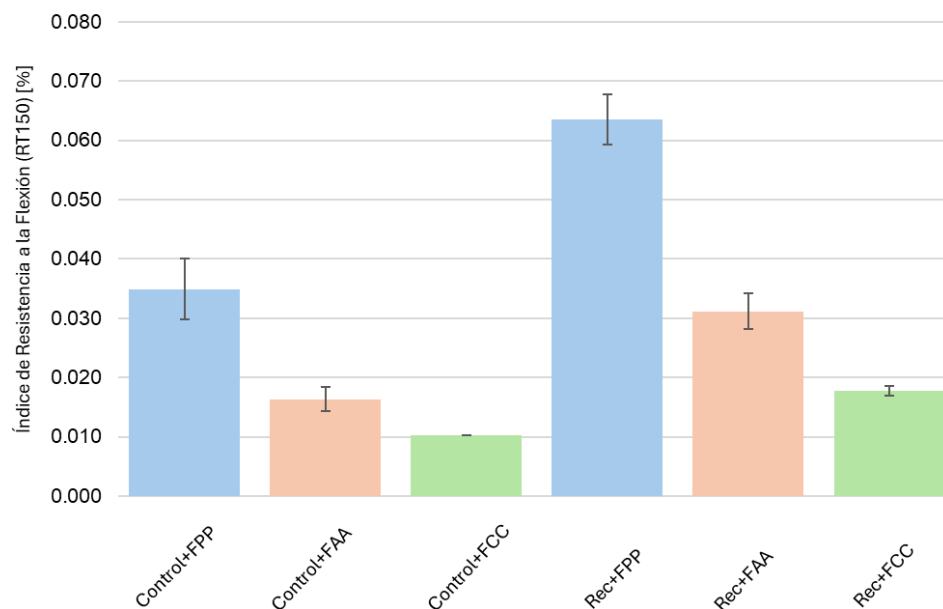


Figura 15: Resultados del índice de resistencia a la flexión.

Para obtener los resultados de los ensayos de tenacidad, se realizaron pruebas en 15 especímenes diferentes. Se fabricaron vigas utilizando agregado control o agregado reciclado, y en cada mezcla se empleó un solo tipo de fibra. Se llevó a cabo un ensayo de flexión a tres puntos, basado en la norma ASTM-1609. Se utilizó una máquina con capacidad de realizar el ensayo controlado por desplazamiento, con el objetivo de evaluar la resistencia máxima a flexión, el comportamiento post-fractura, la rigidez y la energía de deformación. En la figura 12, se observan los resultados que muestran una disminución de carga máxima del 33% cuando son comparadas con las muestras control.

En el comportamiento post-fractura, todas las vigas, excepto la fabricada con fibras de coco y agregado control, alcanzaron una deformación de 3.5 mm. La viga con fibras de coco y agregado control solo logró una deformación máxima de 1.8 mm, incumpliendo el requisito mínimo de 3.5 mm establecido por la norma ASTM-1609. Esto demuestra que la

adición de fibras mejora significativamente la ductilidad del hormigón post-fractura. Tras alcanzar el pico de fuerza máxima, la resistencia disminuye en promedio de 40%, pero se mantiene estable hasta alcanzar la deformación deseada, excepto en las vigas con fibras de abacá, que presentan una disminución continua de resistencia durante la fase post-pico. Se observó una diferencia significativa en el comportamiento post-fractura entre las vigas según el tipo de fibra. Las vigas con fibra de polipropileno resistieron una fuerza promedio de 15 kN post-pico, mientras que las de fibra de abacá alcanzaron aproximadamente 7 kN, equivalentes al 46% de la resistencia de las vigas control. Por su parte, las vigas con fibra de coco lograron alrededor de 5 kN, representando solo el 33% de la resistencia post-pico comparado a las vigas control.

Los resultados evidencian que las fibras son clave para almacenar energía de deformación, influyendo significativamente en la tenacidad según su tipo (i.e FPP, FAA, FCC) como se muestra en la gráfica #14. Las fibras de polipropileno (FPP) presentan la mayor tenacidad promedio entre las mezclas con agregado control y reciclado, de 54.45 Joules, superando ampliamente a las fibras naturales. En comparación, las fibras de abacá muestran una tenacidad promedio de 25.23 Joules, 54% menor que las FPP. Las fibras de coco presentan el valor más bajo de 15.18 Joules, una reducción del 72% respecto a las FPP. Estas variaciones en las tenacidades pueden deberse a las características intrínsecas de cada fibra. Las fibras de polipropileno muestran la mayor capacidad de absorción de energía, debido a su estructura sintética e isotrópica, que le permite resistir mejor la deformación. La reducción en la tenacidad al usar FAA podría deberse a una naturaleza más rígida y menos elástica de estas fibras. En el caso de las fibras de coco, se considera que la reducción en el valor puede deberse a una menor cohesión con el hormigón o incluso un hormigón de menor

resistencia alrededor de las fibras, lo que afecta su capacidad para contribuir a la absorción de energía.

Igualmente, los resultados indican que el uso de agregados reciclados mejora la tenacidad en comparación con los agregados naturales. En las muestras con fibras de polipropileno (FPP), el uso de agregados reciclados genera un incremento del 4% en tenacidad respecto a los agregados control, alcanzando un valor de 53.4 Joules. Con fibras de abacá (FAA), la tenacidad aumenta en un 50% al emplear agregados reciclados, en comparación con los 20.23 Joules obtenidos con agregados naturales. En el caso de las fibras de coco (FCC), la tenacidad promedio se incrementa en un 34% al usar reciclados, frente a los 13 Joules con agregados control. Este aumento se atribuye a que los agregados reciclados, al ser menos rígidos y tener menor resistencia y densidad, facilitan procesos de fisuración, lo que permite almacenar y absorber más energía de deformación.

Lo mencionado anteriormente revela que el tipo de agregado utilizado es el principal factor que influye en la resistencia máxima de los elementos ensayados, ya que los agregados reciclados disminuyen la resistencia del hormigón, resultando en cargas máximas menores, como se aprecia en la Figura 13. Por otro lado, las fibras son las responsables de aportar tenacidad y ductilidad a los elementos de hormigón. Se observa que, aunque el uso de fibras naturales permite una mayor deformación, también reduce la tenacidad en comparación con las fibras sintéticas. Esto significa que las vigas fabricadas con fibras de abacá y coco soportan una carga post-pico considerablemente menor que las vigas fabricadas con fibra de polipropileno.

2.3.6 Resultados y análisis ensayo de módulo dinámico.

Para obtener los resultados del módulo dinámico, se realizó un ensayo de impacto a discos de hormigón, como se especifica en la sección 2.2.3. Una vez obtenidos los datos, se contaba con resultados de voltaje vs tiempo, los cuales se procesaron utilizando MATLAB para calcular la frecuencia y, a partir de ella, el módulo de elasticidad dinámico. Los resultados en la figura 16 muestran que los módulos dinámicos de los discos con FAA y FCC son mayores que los de FPP. La figura 17 indica es un modelo de homogenización el cual denota que al aumentar la cantidad de fibra hasta un 100% este valor tome el valor del módulo de la fibra. Dado a que tan solo un 1% de fibra fue añadida por volumen, los resultados de modulo dinámico no se ven afectados por la adición de la fibra. La variación entre fibras se atribuye al posible fenómeno de curado interno discutido en la sección 2.3.4.

El módulo dinámico disminuye al usar agregado reciclado debido a su menor densidad y capacidad para resistir cargas. En las mezclas con FPP y agregado reciclado, el módulo dinámico se reduce un 30% respecto al uso de agregado control. Con fibra de abacá y agregado reciclado, la disminución es del 15%. Los elementos con fibra de coco y agregado reciclado muestran una reducción del 20% de modulo dinámico respecto al uso de agregado control. Los resultados para las fibras naturales (coco y abacá) son muy similares entre sí.

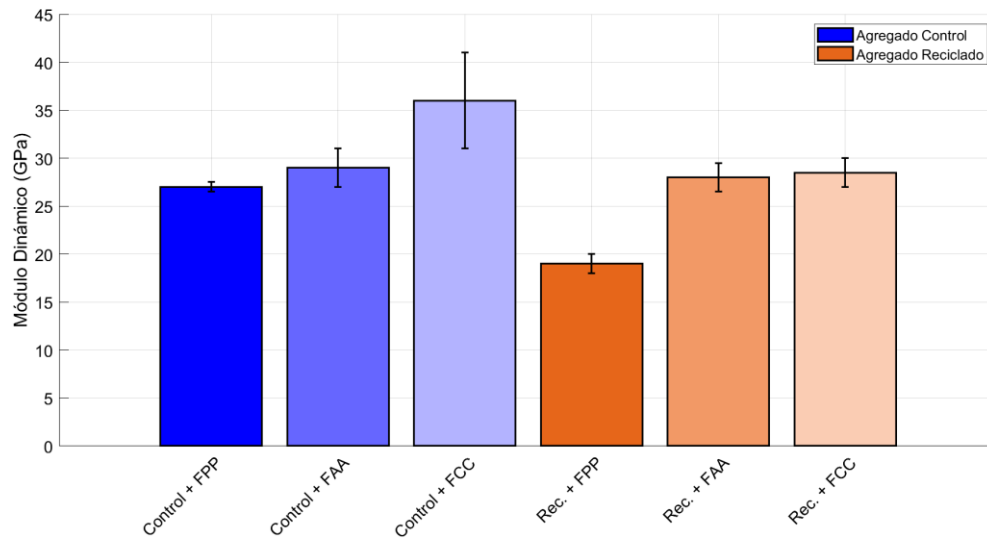
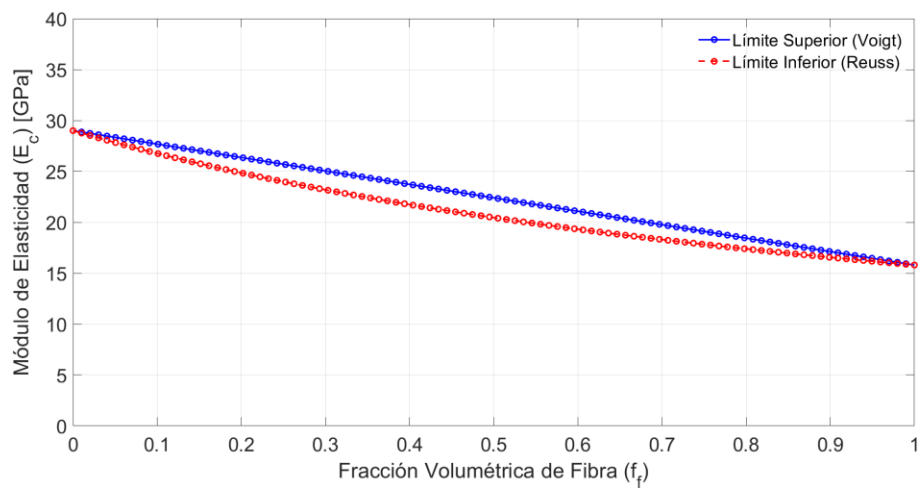
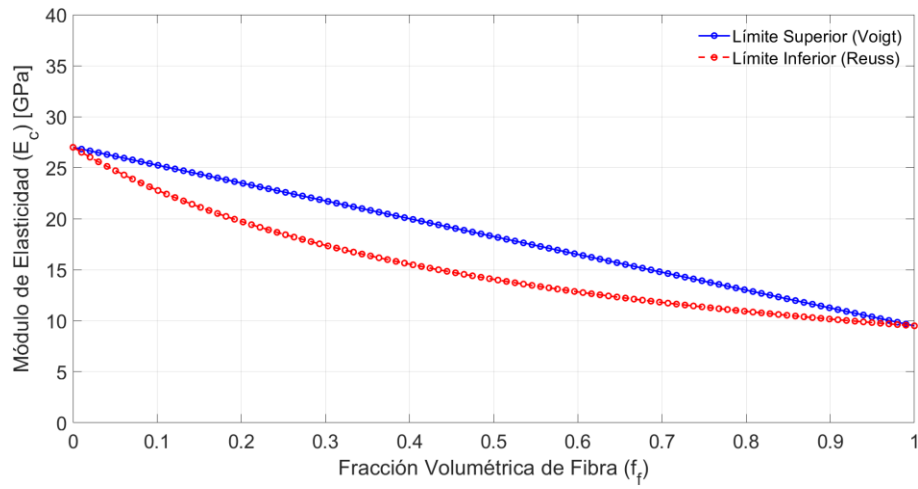
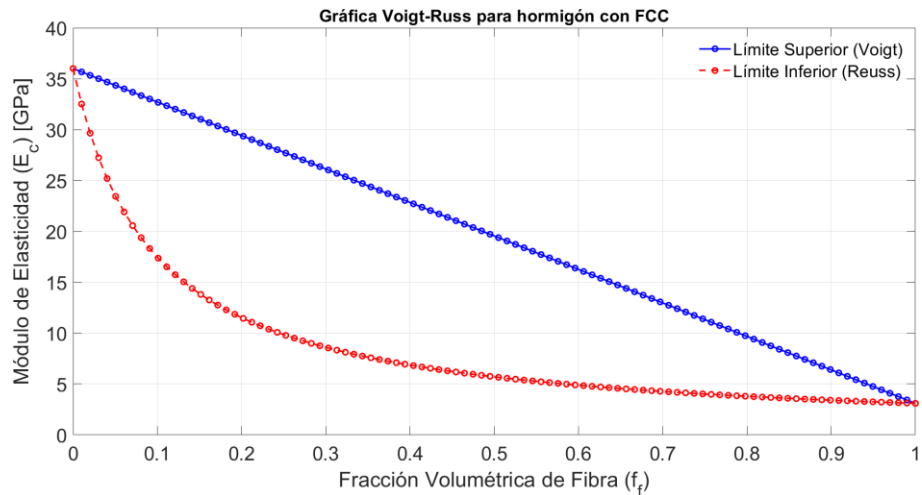


Figura 16: Resultados de ensayo de módulo dinámico a discos de hormigón.





c)

Figura 17: Gráficas de Voigt-Reuss de reducción de módulo de elasticidad al agregar fibras: (a) mezcla con FPP, (b) mezcla con FAA, (c) mezcla con FCC.

3. CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar hormigón con agregados reciclados y diferentes fibras naturales i.e fibra de abacá y fibra de coco.
- El agregado reciclado analizado en este estudio tiene una granulometría cercana a cumplir con los estándares de la norma ASTM C33-18. Presenta una menor densidad, así como una mayor absorción en comparación con el material control.
- Los hormigones que usan agregados reciclados presentan una reducción promedio en la resistencia a la compresión del 26% de la resistencia del hormigón control. Se descartaron los resultados de los cilindros de hormigón con agregado reciclados y FCC.
- Los hormigones que usan agregados reciclados presentan una reducción promedio en resistencia máxima a la flexión de 34% de la resistencia del hormigón control. El pico máximo no se ve afectado por el tipo de fibra de la mezcla.

- El uso de agregados reciclados aumenta la tenacidad del hormigón. Las mezclas realizadas con agregado reciclado aumentan la tenacidad, en promedio, en un 30%, con respecto a las mezclas realizadas con agregado control.
- La tenacidad promedio del hormigón al usar fibras de abacá y coco se reduce en un 54% y 72%, respectivamente, en comparación con las vigas fabricadas con fibras de polipropileno.
- El módulo elástico dinámico se reduce al usar agregados reciclados en un promedio de 18% con respecto a las muestras fabricadas con agregado control.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASTM. (2012). *Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1609_C1609M-12.
- ASTM. (2016). *Standard Specification for Standard Sand*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0778-16>
- ASTM. (2016). *Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-16E01
- ASTM. (2019a). *Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-19
- ASTM. (2019b). *Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM. (2021). *Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21
- Batallas, J., Hidalgo, N., Montenegro, M., Orejuela-Escobar, L. M., Jativa, F., & Lantsoght, E. O. L. (2024). NATURAL FIBERS FOR SUSTAINABLE CONCRETE MIXES. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 11(1). [https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11\(1\).MAT-02](https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11(1).MAT-02)
- Gonzalez-Corominas, A., & Etxeberria, M. (s/f). *Effects of using Recycled Concrete Aggregates on the shrinkage of High Performance Concrete*.
- Grupo Banco Mundial. (2023, abril 3). *Desarrollo urbano: Panorama general*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview>
- Islam, N., Sandanayake, M., Muthukumaran, S., & Navaratna, D. (2024). Review on Sustainable Construction and Demolition Waste Management—Challenges and Research Prospects. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 3289, 16(8), 3289. <https://doi.org/10.3390/SU16083289>
- Lantsoght, E. O. L. (2019). How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? En *Composites Part B: Engineering* (Vol. 175). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107079>
- Leming, M. L., Nau, J. M., & Fukuda, J. (1998). *Nondestructive determination of the dynamic modulus of concrete disks*.
- Małek, M., Jackowski, M., Łasica, W., & Kadela, M. (2020). Characteristics of Recycled Polypropylene Fibers as an Addition to Concrete Fabrication Based on Portland Cement. *Materials* 2020, Vol. 13, Page 1827, 13(8), 1827. <https://doi.org/10.3390/MA13081827>
- Marsh, A. T. M., Velenturf, A. P. M., & Bernal, S. A. (2022). Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>
- Martínez, Y. (2015). *LA LANA DE ROCA COMO FIBRA Y SUS DIFERENTES USOS EN LA INDUSTRIA*.

- Mendoza, I., & Chávez, S. (2017). Residuos de construcción y demolición como agregado de concreto hidráulico nuevo. *Revista de ingeniería civil ECORFAN*, Vol.1, 9–14.
https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Civil/vol1num2/Revista_de_Ingenier%C3%ADa_Civil_V1_N2_4.pdf#page=16
- ONU. (2015). *TEMAS HABITAT III 18-INFRAESTRUCTURA URBANA Y SERVICIOS BÁSICOS, INCLUIDA LA ENERGÍA*.
- Páez Moscoso, J. C. (2007). *OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE POLIPROPILENO REFORZADO CON FIBRAS DE ABACÁ MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN*.
- Radich, A. (2023). *Why the Construction Industry Needs to Be Worried About Greenwashing*.
<https://www.squirepattonboggs.com/en/insights/publications/2023/08/why-the-construction-industry-needs-to-be-worried-about-greenwashing>
- Rosero, O. A. (2018). *Evaluación de la estimación no destructiva del parámetro de densidad de fisuras en el hormigón: análisis de imágenes*. UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ.
- Tenzin, R. Y., Drakpa, L., Deki, T., Subba, S., Norbu, C., Kuenchap, P., & Chimmi. (2023). RECYCLED AGGREGATE CONCRETE (RAC): A viable solution for sustainable construction. *Journal of Applied Engineering, Technology and Management*, 3(1), 63–69.
<https://doi.org/10.54417/JAETM.V3I1.111>

ANEXOS

Resultados de ensayo a compresión

Descp.	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Edad	Peso	Diámetro	Altura	Área transversal	Densidad	Carga máxima	Esfuerzo a compresión	Esfuerzo a compresión Prom	Desv.Est
<i>Abacá+Agg.Rec</i>	(DD/MM/AA)	(DD/MM/AA)	[días]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm^2]	[kg/m3]	[kN]	[MPa]	[MPa]	
1	2/1/2024	30/01/2024	28	3.35	102.00	196	8171.28	2092.01	126.2	15.7		
2	2/1/2024	30/01/2024	28	3.39	102.00	197.00	8171.28	2104.06	136.4	17.0	16.8	0.9
3	2/1/2024	30/01/2024	28	3.28	102.00	191.00	8171.28	2104.16	140.4	17.5		
<i>Abacá+Normal</i>												
1	28/01/2024	2/2/2024	28	3.35	102.00	196	8171.28	2092.01	185.2	23.1		
2	28/01/2024	2/2/2024	28	3.39	102.00	197.00	8171.28	2104.06	175.3	21.5	22.2	0.9
3	28/01/2024	2/2/2024	28	3.28	102.00	191.00	8171.28	2104.16	179.3	21.9		
<i>Coco+Agg. Rec</i>												
1	15/02/2024	14/03/2024	28	3.32	102.00	200	8171.28	2033.95	112.0	13.7		
2	15/02/2024	14/03/2024	28	3.21	103.00	190.00	8332.29	2027.62	88.6	10.6	10.3	3.6
3	15/02/2024	14/03/2024	28	3.18	102.00	198.00	8171.28	1964.26	53.6	6.6		
<i>Coco+Normal</i>												
1	9/2/2024	8/3/2024	28	3.66	102.00	201	8171.28	2225.36	226.8	27.8		
2	9/2/2024	8/3/2024	28	3.64	102.00	201.00	8171.28	2218.97	237.4	29.1	28.1	0.9
3	9/2/2024	8/3/2024	28	3.59	102.00	199.00	8171.28	2210.22	223.8	27.4		
<i>FPP+Agg.Rec</i>												
1	22/1/2024	19/2/2024	28	3.66	102.00	201	8171.28	2225.36	125.4	15.7		
2	22/1/2024	19/2/2024	28	3.64	102.00	201.00	8171.28	2218.97	132.2	16.5	15.5	1.0
3	22/1/2024	19/2/2024	28	3.59	102.00	199.00	8171.28	2210.22	117.9	14.4		
<i>FPP+Normal</i>												
1	29/1/2024	26/2/2024	28	3.52	102.00	194	8171.28	2218.61	188.9	23.1		
2	29/1/2024	26/2/2024	28	3.56	101.00	196.00	8011.85	2267.69	171.6	21.4	21.2	2.0
3	29/1/2024	26/2/2024	28	3.51	101.00	195.00	8011.85	2247.31	152.6	19.0		

Resultados de ensayo a flexión

Descp.	Fecha elaboración	Edad	Peso	Ancho	Altura	Long.	Pico			Carga Residual	Esfuerzo residual	Carga Residual	Esfuerzo residual	Tenacidad
	(DD/MM/AA)	[días]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	Carga	Deflex.	Esfuerzo a flexión	(L/150)		(L/600)		[J]
<i>Abacá+ Agg.Rec</i>							[kN]	[mm]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	
1	1/2/2024	28	25.07	154.00	153.00	506.00	29.7	0.087	3.7	4.8	0.6	14.3	1.8	31.9
2	1/2/2024	28	25.40	154.00	153.00	507.00	30.5	0.095	3.8	4.7	0.6	11.9	1.5	29.7
3	1/2/2024	28	25.24	154.00	152.50	506.00	31.4	0.082	3.9	3.8	0.5	13.5	1.7	29.0
<i>Abacá+ Control</i>														
1	28/01/2024	28	25.07	153.00	154.00	506.00	38.9	0.090	38.9	2.6	0.3	8.4	1.0	21.9
4	28/01/2024	28	25.40	158.00	153.00	507.00	41.5	0.084	5.0	0.0	0.0	7.7	0.9	18.6
<i>Coco+ Agg. Rec</i>														
1	15/02/2024	28	24.54	150.00	154.00	505.00	30.9	0.068	3.9	4.7	0.6	5.4	0.7	20.19
2	15/02/2024	28	26.11	152.00	153.00	505.00	33.2	0.109	4.2	4.5	0.6	5.0	0.6	14.83
3	15/02/2024	28	24.95	150.00	150.00	505.00	27.6	0.071	4.3	4.3	0.6	4.3	0.6	17.13
<i>Coco+Control</i>														
4	9/2/2024	28	29.11	158.00	154.00	510.00	47.4	0.081	6.1	22.9	3.0	40.8	5.3	12.97
<i>FPP+Agg.Rec</i>														
1	22/1/2024	28	23.87	155.00	152.00	505.00	24.6	0.105	3.1	15.5	2.0	14.8	2.0	55.0
2	22/1/2024	28	26.11	155.00	152.00	505.00	25.1	0.131	3.2	15.7	2.0	16.6	2.1	58.6
3	22/1/2024	28	24.95	155.00	151.00	505.00	25.5	0.089	3.3	15.5	2.0	14.3	1.8	53.0
<i>FPP+Control</i>														
2	29/1/2024	28	26.23	154.00	152.00	506.00	40.7	0.075	5.2	0.0	0.0	12.1	1.5	46.7
3	29/1/2024	28	27.10	155.00	153.00	508.00	45.0	0.063	5.6	0.0	0.0	16.7	2.1	61.3
4	29/1/2024	28	26.56	154.00	152.00	506.00	39.7	0.071	4.9	15.2	1.9	13.7	1.7	52.3

Resumen resultados de ensayo a flexión

Descripción	Pico				Tenacidad		Índice resistencia a flexión		
	<i>Carga Prom</i>	Desv.Est	<i>Esfuerzo a flexión prom</i>	Desv.Est	<i>Tenacidad prom</i>	Desv.Est	<i>R T150</i>	Índice prom	<i>Desv.Est</i>
Abacá+Agg.Rec	[kN]		[MPa]		[J]		[%]	[%]	
1							0.035		
2	30.5	0.8	3.8	0.1	0.1	1.5	0.030	0.031	0.003
3							0.029		
Abacá+Control									
1							0.018		
4	40.2	1.9	4.5	0.8	0.8	2.3	0.015	0.016	0.002
Coco+Agg. Rec									
1							0.019		
2	30.6	2.8	4.1	0.2	0.2	2.7	0.018	0.018	0.002
3							0.016		
Coco+Control									
4	46.3	0.00	6.1	0.0	0.0	0.0	0.010	0.010	0
FPP+Agg.Rec									
1							0.064		
2	25.1	0.5	3.2	0.1	0.1	2.8	0.068	0.064	0.004
3							0.059		
FPP+Control									
2							0.038		
3	41.8	2.8	5.2	0.4	0.4	7.4	0.029	0.035	0.005
4							0.037		

Resultados de Abrasión de Piedra #57

Pasa Tamiz	Retiene en Tamiz	Grado A [g]
1 1/2 in	1 in	1260
1 in	3/4 in	1250
3/4 in	1/2 in	1250
1/2 in	3/8 in	1250
Masa total		5010

LUEGO DE 100REV	Valores	LUEGO DE 500REV	Valores
Pasa Tamiz #12 [g]	502	Pasa Tamiz #12 [g]	1523
Retiene en Tamiz #12 [g]	4495	Retiene en Tamiz #12 [g]	3471
Total [g]	4997	Total [g]	4994
% Pérdida 100 rev	10%	% Pérdida 500 rev	31%
Pérdida en Tambor	0.26%	% Pérdida en Tambor	0.32%
Uniformidad		0.33	

Resultados de Abrasión de Piedra #7

Pasa Tamiz	Retiene en Tamiz	Grado B [g]
3/4 in	1/2 in	2500
1/2 in	3/8 in	2500

LUEGO DE 100REV	Valores	LUEGO DE 500REV	Valores
Pasa Tamiz #12 [g]	513	Pasa Tamiz #12 [g]	1669
Retiene en Tamiz #12 [g]	4475	Retiene en Tamiz #12 [g]	3316
Total [g]	4988	Total [g]	4985
% Pérdida 100 rev	11%	% Pérdida 500 rev	64%
Pérdida en Tambor	0.24%	% Pérdida en Tambor	0.30%
Uniformidad		0.31	

Resultados densidad y absorción piedra #57: Agregado Reciclado

Prueba	Masa Seca en horno A (g)	Masa SSD B (g)	Masa sumergida C (g)	G (OD)	G (SA)	G (SSD)	% ABS
Prueba 1	1887.5	2000	1148.5	2.22	2.55	2.35	6.00%
Prueba 2	1910	2020.5	1140.5	2.17	2.48	2.3	5.80%
Prueba 3	1905	2021.5	1156.7	2.2	2.55	2.34	6.10%
Promedio				2.2	2.53	2.33	6.00%
Desv. Estándar				0.02	0.04	0.03	0.20%

Resultados densidad y absorción piedra #7: Agregado Reciclado

Prueba	Masa Seca en horno A (g)	Masa SSD B (g)	Masa sumergida C (g)	G (OD)	G (SA)	G (SSD)	% ABS
Prueba 1	1881	2000	1142	2.19	2.55	2.33	6.30%
Prueba 2	1890	2001.5	1130	2.17	2.49	2.3	5.90%
Prueba 3	1892.5	1999.5	1135.5	2.19	2.5	2.31	5.70%
Promedio				2.18	2.51	2.31	6.00%
Desv. Estándar				0.01	0.03	0.02	0.30%

Resultados densidad y absorción arena: Agregado Reciclado Triturado

Prueba	Masa Seca en horno A (g)	Masa Picnómetro + Agua B (g)	Masa Picnómetro + Agua + Arena C (g)	Masa SSD Arena S (g)	G (OD)	G (SA)	G (SSD)	% ABS
Prueba 1	407.5	648	895	500	1.61	2.54	1.98	22.70%
Prueba 2	414	654	910	500	1.7	2.62	2.05	20.77%
Prueba 3	412	658	915	500	1.7	2.66	2.06	21.36%
Promedio					1.67	2.61	2.03	21.60%
Desv. Estándar					0.05	0.06	0.04	1.00%