

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Evaluación del Módulo de Elasticidad Dinámico y Resistencia a Tensión Directa en Hormigón y Pasta de Cemento Reforzado con Fibras Plásticas y Naturales.

Daniel Eduardo Abril Camino

Ingeniería Civil

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

Ingeniero Civil

Quito, 11 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

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

**Evaluación del Módulo de Elasticidad Dinámico y Resistencia a
Tensión Directa en Hormigón y Pasta de Cemento Reforzado con
Fibras Plásticas y Naturales.**

Daniel Eduardo Abril Camino

Nombre del profesor, Título académico

Francisco Játiva, PhD

Quito, 11 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: Daniel Eduardo Abril Camino

Código: 00323241

Cédula de identidad: 1804082947

Lugar y fecha

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UNPUBLISHED DOCUMENT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 these publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal analizar las propiedades mecánicas de materiales cementicios mediante el uso de fibras plásticas y naturales (polipropileno, abacá y coco), buscando alternativas sostenibles y eficientes en el sector de la construcción.

La investigación se enfoca en dos ensayos clave: el módulo de elasticidad dinámico (evaluado en hormigones con agregados reciclados y naturales) y la resistencia a tensión directa en pastas de cemento. Para ello, se desarrollaron metodologías específicas, como el uso de acoples de mordazas diseñadas para pruebas directas y la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC), que permitió analizar patrones de deformación y fractura de manera precisa.:

El módulo de elasticidad dinámico mostró incrementos significativos tras 240 días de curado, siendo más notorio en mezclas con fibras de polipropileno (7.23%) y con agregados reciclados.

En las pruebas de tensión directa, todas las mezclas con fibras superaron la resistencia base de la pasta de cemento sin fibras (0.5 MPa). Las fibras de abacá demostraron la mayor efectividad (hasta 2.12 MPa con un 4% de adición), seguidas por las de polipropileno y coco.

La investigación concluye que el uso de fibras mejora notablemente las propiedades mecánicas del hormigón y la pasta de cemento, contribuyendo a una mayor tenacidad y resistencia a tracción. Asimismo, se evidencia la viabilidad del uso de agregados reciclados como alternativa sostenible, aunque con desafíos en trabajabilidad. Las implicaciones de este estudio sugieren un potencial significativo para la industria de la construcción, tanto en términos de sostenibilidad ambiental como de optimización estructural, promoviendo futuras investigaciones con mayor precisión en la medición de micro deformaciones.

ABSTRACT

The main objective of this study is to analyze the mechanical properties of cementitious materials using plastic and natural fibers (polypropylene, abaca, and coconut), seeking sustainable and efficient alternatives in the construction sector.

The research focuses on two key tests: the dynamic modulus of elasticity (evaluated in concretes with recycled and natural aggregates) and the direct tensile strength in cement pastes. To achieve this, specific methodologies were developed, such as the use of custom-designed gripping clamps for direct testing and the Digital Image Correlation (DIC) technique, which allowed for precise analysis of deformation and fracture patterns.

The dynamic modulus of elasticity showed significant increases after 240 days of curing, with the most notable improvements observed in mixes with polypropylene fibers (7.23%) and recycled aggregates.

In the direct tensile tests, all fiber-reinforced mixtures exceeded the baseline tensile strength of cement paste without fibers (0.5 MPa). Abaca fibers demonstrated the highest effectiveness (up to 2.12 MPa with a 4% addition), followed by polypropylene and coconut fibers.

The study concludes that the use of fibers significantly improves the mechanical properties of concrete and cement paste, contributing to greater toughness and tensile strength. Furthermore, the results highlight the feasibility of using recycled aggregates as a sustainable alternative, though with some challenges in workability. The implications of this research suggest significant potential for the construction industry, both in terms of environmental sustainability and structural optimization, encouraging further studies with improved precision in measuring micro-deformations.

DEDICATORIA

A quién a pesar de no tener vínculo sanguíneo me adoptó como un hijo, nunca me hizo faltar un plato en la mesa, me protegió y me amó con todo su corazón, dejando a un lado su vida para que yo logre este objetivo.

A quién me enseñó a manejar bicicleta, a quién me ha cuidado en mis enfermedades, y quién ha visto mi esfuerzo a lo largo de la carrera.

A quién le debo los valores que tengo y ha generado la disciplina en mí para ser responsable en mis actividades

A quien siempre me dio ánimos, me hizo creer en mí y crecer como persona en los momentos en los que sentía que no podía más.

A quien me acompañó en mis noches de desvelo, me tranquilizó en mis días intranquilos, a quien le debo mi vida.

A la persona que más me ama en este mundo.

Mi mamá del corazón:

Margot

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Jeaqueline quien prometí ser ingeniero civil para construirle una casa, quien me cuida desde el cielo y me dio esta pasión por la ingeniería civil, la persona que me cuidó desde pequeño y me dio todas mis aptitudes para lograr este objetivo.

A mi papá Jesús por ser un padre responsable y dedicarme su tiempo para transmitirme su pasión y su conocimiento por la ingeniería civil.

A mi hermano Andrés por ser un ejemplo en su esfuerzo y dedicación a la ingeniería estructural y preocuparse siempre por verme bien.

A mi familia por siempre darme ánimos y creer en mis habilidades y capacidades para lograr esta meta.

A mis amigos Juan Martín, Tommy, Mateo, Chris y Damaris que me brindaron un apoyo incondicional y siempre creer en mí.

A mi advisor el Dr. Francisco Játiva, PhD. Por apoyarme y confiar en mi en la realización del presente proyecto integrador, y por tomarme en cuenta para múltiples proyectos desarrollados a lo largo de la carrera.

Agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, han influido en mi camino hacia este logro, especialmente a aquellas que, sin saberlo, me dieron razones para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

Por último, quiero agradecer a Dios y a la vida por darme salud y fuerzas para cada día levantarme y luchar por esto.

Daniel Eduardo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Justificación	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo Principal.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.	16
2. DESARROLLO DEL TEMA	17
2.1 Materiales	17
2.1.1 Cemento hidráulico de uso general (GU).	17
2.1.2 Agregados Reciclados.	17
2.1.3 Fibras naturales.....	17
2.1.4 Ensayo de Módulo de elasticidad dinámico.	17
2.1.5 Resistencia a los esfuerzos de tracción directa.	22
2.1.6 Correlación digital de imagen (DIC)	26
2.2 Resultados	32
2.2.1 Resultados y Análisis del Módulo de Elasticidad Dinámico.....	32
2.2.2 Análisis de resultados: Modulo de Elasticidad Dinámico, E_{dyn}	36
2.2.3 Resultados a prueba de Tensión Directa.....	37
2.2.4 Análisis de prueba de tracción directa.	42
3. CONCLUSIONES	44
3.1 Módulo de elasticidad dinámico	44
3.2 Prueba de tensión directa	44
Referencias Bibliográficas	46
ANEXOS	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Receptor de señal (Osciloscopio). b) Amplificador de señal, c) Disco de hormigón.....	19
Figura 2. Voltaje vs Tiempo	20
Figura 3. Resultados Frecuencia de vibración vs Amplitud	21
Figura 4. a) Dimensiones de las mordazas (mm). b) Comparación entre el diseño realizado en Inventor y el resultado final construido.	23
Figura 5. Espárrago para conexión entre mordaza y máquina de tracción	23
Figura 6. Ensamblaje entre mordazas en máquina de tracción	24
Figura 7. Encofrado de madera diseñado en Inventor e imagen del encofrado final.....	24
Figura 8. a) Dimensiones de probeta de hormigón. b) Fundición de hormigón en encofrado, c) Probeta de hormigón esquematizada en Inventor.	25
Figura 9. Probeta instalada en máquina de tracción	26
Figura 10. Patrón de pintura para probeta.....	27
Figura 11. Característica de pintura en cara de imagen para probeta de pasta de cemento.	27
Figura 12. Probeta con patrón de pintura aplicado.	28
Figura 13. Definir escala 2D entre pixeles en programa Zeiss – Inspect.	29
Figura 14. Tamaño de faceta y distancia entre puntos.....	30
Figura 15. Superficie definida y análisis de calidad de patrón.	30
Figura 16. Evolución de deformaciones en Zeiss Inspect – Correlate.....	31
Figura 17. Tiempo vs Desplazamiento. DIC y Máquina de tracción.....	31

Figura 18. Frecuencia de probetas de hormigón con agregados normales según la adición de fibras y su variación a los 30 y 240 días.	33
Figura 19. Frecuencia promedio de probetas de hormigón con agregados reciclados según la adición de fibras y su variación a los 30 y 240 días.....	34
Figura 20. Módulo de elasticidad dinámico a los 30 y 240 días y densidad promedio según mezcla realizada.....	35
Figura 21. Curva Esfuerzo – Deformación, probeta de pasta de cemento y adición de fibras de polipropileno, abacá y coco.	38
Figura 22. Probeta al finalizar la prueba.....	39
Figura 23. Curva esfuerzo – deformación, probeta de pasta de cemento, sin fibras.	40
Figura 24. Resistencia máxima a la prueba experimental de tensión directa, según la porcentaje y fibra añadida.....	41
Figura 25. Energía de deformación.....	42

SIMBOLOGÍA

- Φ : Diámetro
- E_{dyn} : Módulo de Elasticidad Dinámico
- Φ_{prom} : Diámetro promedio
- f : Frecuencia de Resonancia
- Ω_0 : Parámetro de frecuencia de modo de vibración fundamental
- ν : Módulo de Poisson
- ρ : Densidad
- f_t : Resistencia a tensión directa
- $X(f)$: Serie en función de la frecuencia

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El sector de la construcción es una de las industrias con mayor impacto social, económico y ambiental debido entre otros factores al crecimiento constante de la población. Este crecimiento conlleva un aumento en la contaminación del medio ambiente debido a procesos como la extracción de materiales necesarios para la producción de cemento, y el uso masivo de materiales cementantes, así como agregados y aditivos. (Morales et al. 2020)

La industria cementera genera el 8% de emisión de contaminantes antropogénicos (Comisión Europea., 2019). Si bien el proceso de producción de materiales como el cemento genera emisiones de CO₂, su impacto ambiental se deriva principalmente del uso masivo de estos. De hecho, más de la mitad de los productos fabricados en el mundo contienen materiales cementantes, y aunque solo representan alrededor del 8% de las emisiones globales, la demanda proyectada para el 2050 es de 16 mil millones de toneladas, lo que incrementa su impacto. A nivel energético, la industria cementera representa cerca del 2% del consumo mundial de energía industrial (Scrivener, John, y Gartner 2018). Existen actividades posteriores a la construcción que producen un alto desperdicio, como lo son las actividades de demolición que generan un alto volumen de escombros. En la Unión Europea constituye el 33.5% de todos los desechos y se prevé que en China se desechen 4 mil millones de toneladas hasta el 2026 (Wang et al. 2023).

El hormigón, ampliamente utilizado en la construcción, destaca por ser un material abundante, económico y fácil de manejar. Estas características, junto con sus excepcionales propiedades físicas, químicas, térmicas y mecánicas, lo convierten en un componente indispensable en obras civiles como caminos, pavimentos, puentes, presas y edificios (Gagg 2014). Su resistencia a la compresión, durabilidad frente a condiciones climáticas extremas,

resistencia al fuego y capacidad de proteger refuerzos de acero contra la corrosión refuerzan su relevancia en el sector. No obstante, debido a su elevado impacto ambiental, diversos estudios han explorado alternativas para mitigar estos efectos, como el uso de agregados reciclados, lo que abre nuevas oportunidades para la sostenibilidad en la construcción (Bedoya y Dzul 2015).

De hecho, desde 1985, la Administración Federal de Autopistas (Federal Highway Administration) en Estados Unidos, comenzó a mencionar el uso de hormigón reciclado como agregado en sus especificaciones y guías, reconociendo su valor en la construcción sostenible. Esta recomendación se basó en una tendencia que había comenzado en 1982, cuando la American Society for Testing Materials (ASTM), actual ASTM International, incluyó al hormigón triturado como un tipo de agregado grueso. (ASTM C33, 2013).

Sin embargo, al utilizar agregados reciclados estos pueden afectar la resistencia a la compresión, trabajabilidad, segregación, e incluso producir reacciones químicas adversas como la reacción álcali – sílice (Játiva et al. 2024; Loo, Tam, y Rasiah 1987; Sims y Brown 2003). Por otro lado, estudios mencionan que incorporar fibras en el hormigón reduce su fragilidad, a la vez de mitigar problemas como el asentamiento plástico, contracción y sangrado en su estado fresco así como desarrollar fisuras finas y mejor distribuidas comparado a no utilizar fibras (Lin et al. 2023; Sasaki, Higashiyama, y Mizukoshi 2023).

Estudios recientes evidencian que el reforzamiento del hormigón con fibras de acero no solo mejora la capacidad de deformación, sino que también incrementa la tenacidad, resistencia residual y mejoran la capacidad en los modos de falla por tensión como el corte, lo que se traduce en un mejor desempeño estructural (Lantsoght 2019; Zhang et al. 2023).

El uso de fibras artificiales como el polipropileno, vidrio y acero denotan una mejora en las propiedades mecánicas del hormigón. Sin embargo, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental producido por los desperdicios de hormigón y la contaminación en la

elaboración de sus componentes, el uso de agregados reciclados y su adición de fibras representa una alternativa viable en la optimización de las propiedades mecánicas del hormigón y en un impacto positivo en el medio ambiente.

En este estudio se plantea analizar la pasta de cemento y hormigón reforzado con fibras plásticas y naturales. Evaluando su respuesta al medir su módulo de elasticidad dinámico, así como la resistencia a la tensión directa debido a que proporciona una medida más precisa del comportamiento a tracción del material cementicio comparado con pruebas de tracción indirecta, como las pruebas de tres y cuatro puntos en donde se sobreestima la resistencia a tracción del material entre un 50 a 100% (Mehta y Monteiro 2005). Aunque el ensayo de tracción indirecta es más sencillo de realizar, no siempre representa con exactitud el comportamiento del material bajo condiciones de tracción pura, ya que introduce esfuerzos combinados de compresión y tracción (Mindess, Young, y Darwin 2003). Por esta razón, evaluar el comportamiento en una prueba de tracción directa es fundamental para determinar la efectividad de las fibras en mejorar la resistencia ante esfuerzos de tracción y la capacidad de deformación de pasta de cemento y hormigón.

1.2 Justificación

El presente estudio aborda el análisis de las propiedades mecánicas de materiales cementantes reforzados con fibras naturales y su comportamiento en distintas condiciones. En la primera parte, se estudia la respuesta del material a tracción directa utilizando una pasta de cemento reforzada con fibras naturales y de polipropileno con adición en porcentaje en volumen de 2 y 4%. Este análisis incluye la caracterización de la resistencia a tensión directa y la observación de patrones de fractura mediante correlación digital de imágenes ó DIC en inglés, enfocándose en caracterizar patrones de deformación en la pasta de cemento, y en la zona de trabajo de las fibras a partir de las imágenes obtenidos en las pruebas experimentales.

En la segunda parte, se evalúa el comportamiento del hormigón con agregados normales, reciclados y fibras a lo largo del tiempo. Para ello, se evalúa el material a través del módulo de elasticidad dinámico, utilizando probetas cilíndricas de hormigón con una adición de fibras naturales en un porcentaje de volumen del 1%. Este enfoque permite analizar la influencia combinada de los agregados reciclados y las fibras naturales en la durabilidad del hormigón. Este análisis evalúa la resistencia a tracción directa mediante una probeta y mordazas diseñadas especialmente para su uso en el laboratorio de hormigones de la Universidad San Francisco de Quito.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Principal.

- . Analizar las propiedades mecánicas de la pasta de cemento reforzada con fibras naturales mediante ensayos de tracción directa.
- Evaluar el comportamiento mecánico del hormigón fabricado con agregados reciclados y fibras naturales mediante la medición del módulo de elasticidad dinámico.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Evaluar el comportamiento del módulo de elasticidad dinámico, E_{dyn} , de hormigón elaborado con agregados reciclados y agregados control (de cantera), considerando la adición de un 1% de fibras naturales (i.e. Abacá y Coco) y fibra de polipropileno por volumen de mezcla, para analizar su evolución en el tiempo.
- Evaluar la resistencia a la tensión directa, f_t , de mezclas de pasta de cemento con adición del 2% y 4% en volumen de fibras naturales y plásticas.
- Utilizar un modelo de análisis de resistencia a tensión final basado en los datos

experimentales obtenidos mediante ensayos de tensión directa. Este modelo se enfoca en integrar los resultados del análisis con correlación digital de imágenes (DIC), para una caracterización precisa de los patrones de deformación y propagación de grietas, mejorando la interpretación de los resultados en probetas de pasta de cemento en su adición con fibras.

2. DESARROLLO DEL TEMA

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento hidráulico de uso general (GU).

Cemento hidráulico producido conforme a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380.

Este cemento ofrece resistencias comparables a las del cemento tipo Portland I según la norma ASTM C 150 y cemento hidráulico puzolánico según la norma ASTM C 595.

2.1.2 Agregados Reciclados.

Agregados obtenidos de escombros de demolición caracterizadas acorde a ASTM C136/C33: Piedra #57, Piedra #7, y arena.

2.1.3 Fibras naturales.

Las fibras naturales utilizadas son fibras naturales de abacá y coco. Las fibras de abacá provienen de la provincia de Manabí con una longitud de entre 1.5 y 2m con un diámetro de promedio de 0.2 mm. Las fibras de coco provienen de la provincia de Manabí, con una longitud promedio de entre 10 y 15 cm y un diámetro promedio de 0.18mm.

Metodología

2.1.4 Ensayo de Módulo de elasticidad dinámico.

Para el presente ensayo de módulo dinámico se utilizaron seis discos con un diámetro, $\phi = 10$ cm (4”), y una altura, $h = 2.54$ cm (1”). Los discos variaban en la utilización de agregados reciclados y fibras naturales (abacá y coco), con una adición del 1% en porcentaje en volumen. El ensayo se llevó a cabo utilizando un acelerómetro con una frecuencia de resonancia de 60000 Hz, un amplificador de señal y un osciloscopio, que funcionó como receptor de señales.

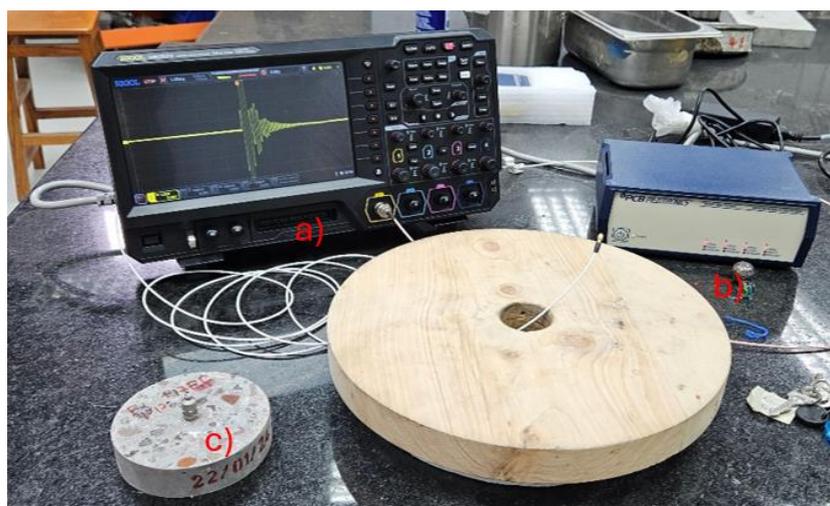
El procedimiento consistió en conectar el acelerómetro en el centro del disco, enlazarlo al amplificador de señal y este al osciloscopio. Una masa de acero de 150 gramos (bola de 2.25 cm de diámetro) impactó contra la probeta, generando vibraciones internas en el disco hasta alcanzar su frecuencia propia de resonancia (desplazamiento máximo).

Las señales obtenidas del osciloscopio, representadas como curvas de Voltaje vs Tiempo, se transformaron en datos de Amplitud vs Frecuencia mediante la Transformada de Fourier discreta. Este análisis se realizó utilizando un código desarrollado en MATLAB (incluido en los anexos), lo que permitió identificar las frecuencias de resonancia correspondientes. Este estudio se fundamenta en el análisis numérico de (Hutchinson 1979) sobre las vibraciones de flexión eje-simétricas en placas circulares gruesas y libres. También toma como referencia el trabajo de (Leming, Nau, y Fukuda 1998), quienes exploraron métodos no destructivos para determinar el módulo dinámico de discos de hormigón. Finalmente, se considera la relación entre estos estudios desarrollada por (Rashetnia, Ghasemzadeh, y Pour-Ghaz 2016), quienes investigaron las consecuencias de la no linealidad del material en la medición de vibraciones de flexión eje-simétrica, aplicadas a la estimación del módulo dinámico elástico de materiales cementicios dañados, este estudio fue elaborado con los discos de hormigón fabricados por Játiva, Tamayo y Silva , se emplearon dos dosificaciones diferentes, una utilizando agregados normales y otra con agregados reciclados La dosificación utilizada se la puede visualizar en la Tabla 1 presentada a continuación.

Tabla 1 Dosificación de Mezcla Utilizada

Material	Mezcla con agregados normales	Mezcla con agregados reciclados
Cemento	40 kg	40 kg
Agua	18 kg	18 kg
GLENIUM 7069	10 gramos	100 gramos
Piedra #7	52.8 kg	52.8 kg (reciclada)
Arena	35.2 kg	35.2 kg (reciclada)

A la dosificación utilizada se le añadió fibras en su porcentaje en volumen del 1% (Játiva et al. 2024).



a) b) c)

Figura 1. a) Receptor de señal (Osciloscopio). b) Amplificador de señal, c) Disco de hormigón.

Se obtuvo la frecuencia de resonancia en las mezclas de hormigón, donde se utilizaron agregados reciclados y agregados naturales i.e. polipropileno, abacá y coco, creando 6 mezclas. Cada mezcla se cortó en 3 discos y se realizaron 3 mediciones por disco, sumando 54

mediciones a los 30 días para evaluar la frecuencia de resonancia promedio. El mismo proceso se repitió a los 240 días para determinar la variación en los módulos de elasticidad con el tiempo. En total, se realizaron 108 mediciones para este estudio.

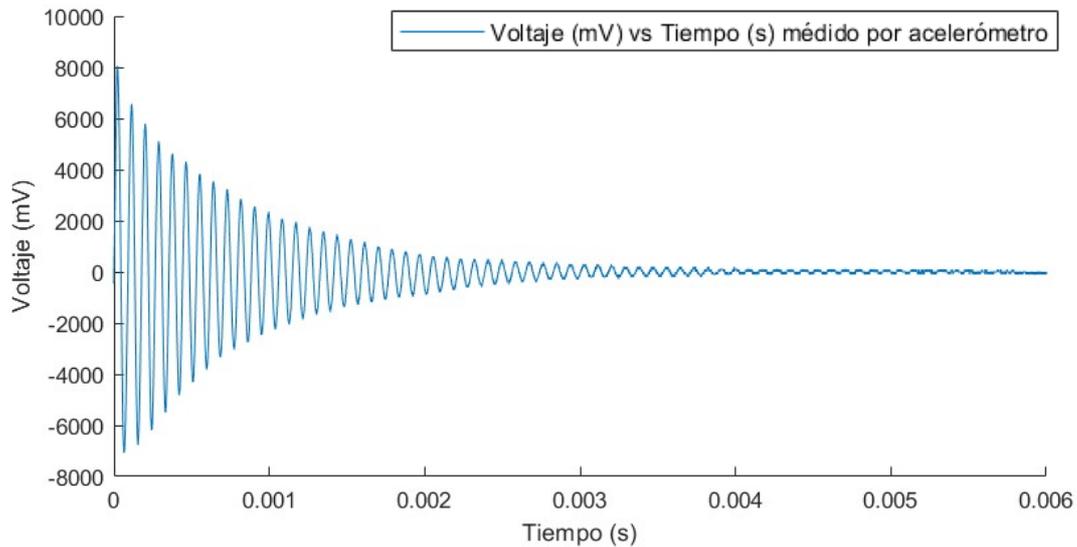


Figura 2. Voltaje vs Tiempo

La transformada de Fourier es una transformación numérica que transforma señales en función del tiempo, al dominio de la frecuencia, obteniendo un espectro de frecuencias para las señales, la transformada de Fourier es definida matemáticamente cómo:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

En su pico máximo denota la frecuencia que genera el desplazamiento máximo del disco, la cual es considerada como su frecuencia de resonancia.

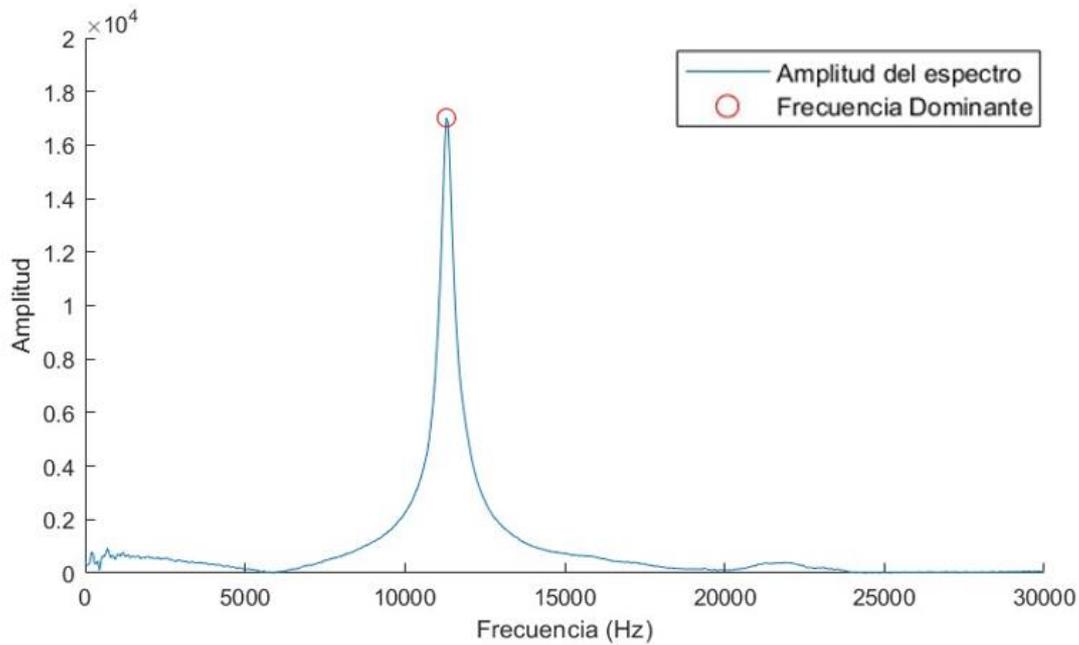


Figura 3. Resultados Frecuencia de vibración vs Amplitud

Una vez obtenida la frecuencia de resonancia se procede a calcular el módulo de elasticidad dinámico, E_{dyn} , en base a la ecuación (2) desarrollada por (Leming et al. 1998).

El estudio de Leming menciona que el módulo de elasticidad dinámico puede ser calculado a partir de su Módulo de Poisson, densidad promedia medida según la probeta, ρ , diámetro de probeta promedio medido, ϕ_{prom} , frecuencia de la probeta en resonancia, f , y el parámetro de corrección según el espesor de las probetas, Ω_0 . En el presente estudio se consideró un Módulo de Poisson, $\nu = 0.24$, y un factor de corrección, $\Omega_0 = 1.63$. Este último factor de corrección es calculado de acuerdo a la resolución de ecuaciones que tienen como fin describir la vibración axi-simétrica de un disco (Leming et al. 1998), se asume que el esfuerzo axial en la dirección vertical es cero y que el esfuerzo tangencial y radial corresponde a una función lineal de su componente vertical (Hutchinson 1979). El valor de Módulo de Poisson ($\nu = 0.24$), fue establecido de acuerdo a estudios realizados por Constantinides en su estudio del efecto de dos tipos de CSH sobre la elasticidad de materiales a base de cemento (Constantinides y Ulm 2004).

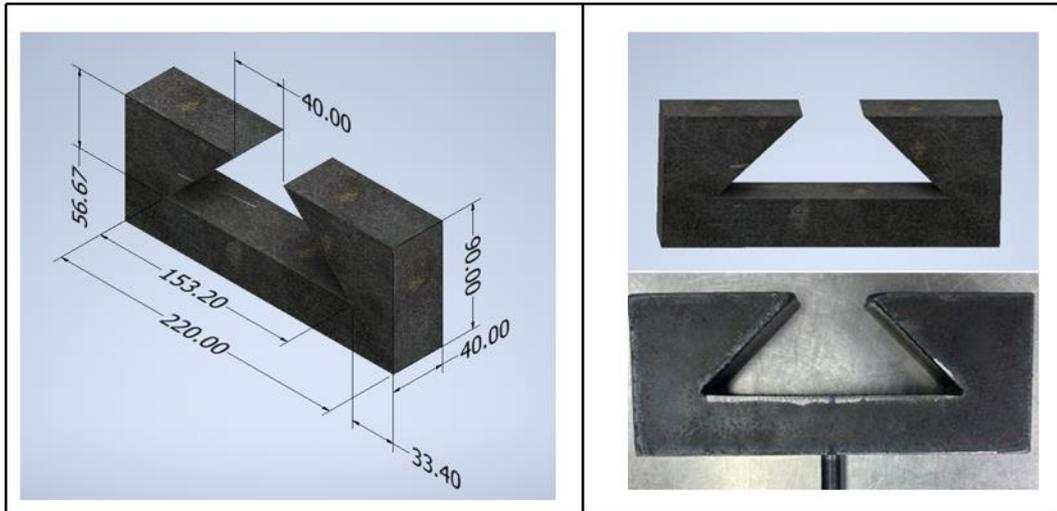
$$E_d = 2(1 + \nu)\rho \left[\frac{\pi f d^2}{\Omega_0} \right]^2 \quad (2)$$

2.1.5 Resistencia a los esfuerzos de tracción directa.

Aunque no existe una norma específica para ensayos de tracción directa en probetas de hormigón, este ensayo es fundamental en este estudio para obtener una caracterización precisa de la resistencia a la tracción del hormigón. Los ensayos de tracción indirecta, como los definidos en las normas ASTM C78 y ASTM C496, no capturan plenamente el comportamiento a tracción directa, especialmente cuando se utiliza hormigón con agregados reciclados y fibras naturales. Por esta razón, se diseña un método experimental específico para realizar la prueba de tracción directa, eliminando las excentricidades y la concentración de esfuerzos, lo que permite un análisis más detallado y preciso de las propiedades mecánicas del material.

a) Mordazas.

Dado que no existe una norma estandarizada para la prueba de tracción directa y con el fin de realizar el ensayo en probetas, se realizó un acople para ser utilizado como mordazas. El acople consta de dos mordazas de acero con una sección transversal de 220 mm x 140 mm y un espesor de 40 mm con un corte triangular en su base de 150 mm en su segmento más largo y una altura de 57 mm con una abertura de 40 mm en su parte final que permiten el agarre de la probeta de hormigón, como se muestra en la Figura 1. El acople presentado se basa en el artículo estudiado por Zhang en 2023 para el estudio del comportamiento a tracción de hormigones reforzados con fibras de polipropileno. (Zhang et al. 2023), se agrega el plano de las mordazas en anexos.



a)

b)

Figura 4. a) Dimensiones de las mordazas (mm). b) Comparación entre el diseño realizado en Inventor y el resultado final construido.

Para el desarrollo del anclaje de las mordazas a la máquina de tracción del laboratorio de materiales se realizó espárragos de acero grado 12 con una longitud de 10 cm y un diámetro de media pulgada, que permiten la conexión entre la base superior e inferior de la máquina y las mordazas.



Figura 5. Espárrago para conexión entre mordaza y máquina de tracción

Con estos elementos se realiza el acople a la máquina de tracción en la base superior e inferior como se puede visualizar en la Figura 6:



Figura 6. Ensamblaje entre mordazas en máquina de tracción

b) Probeta.

Se realizó un encofrado de madera tríplex de 2 cm de espesor para elaborar probetas de hormigón con agarres triangulares. Las mordazas tienen una base de 140 mm, una altura de 50 mm y una abertura de 40 mm, seguida de una sección prismática de 40 mm x 40 mm y 100 mm de largo como se muestra la Figura 7:

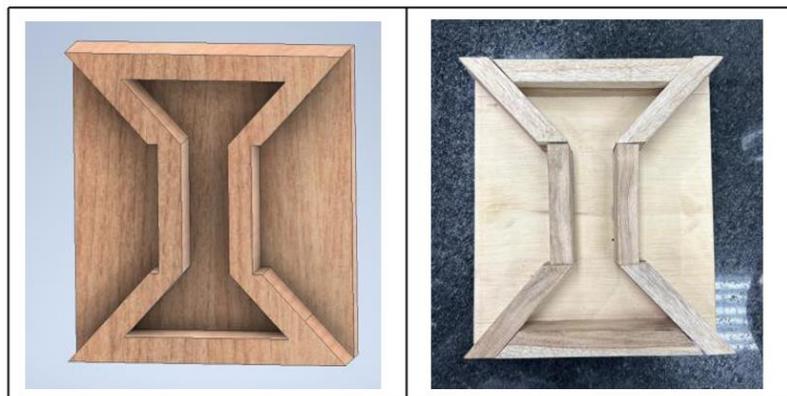


Figura 7. Encofrado de madera diseñado en Inventor e imagen del encofrado final.

Se fundió la pasta de cemento reforzada sin refuerzo y reforzada con fibras plástica y naturales (Figura 8).

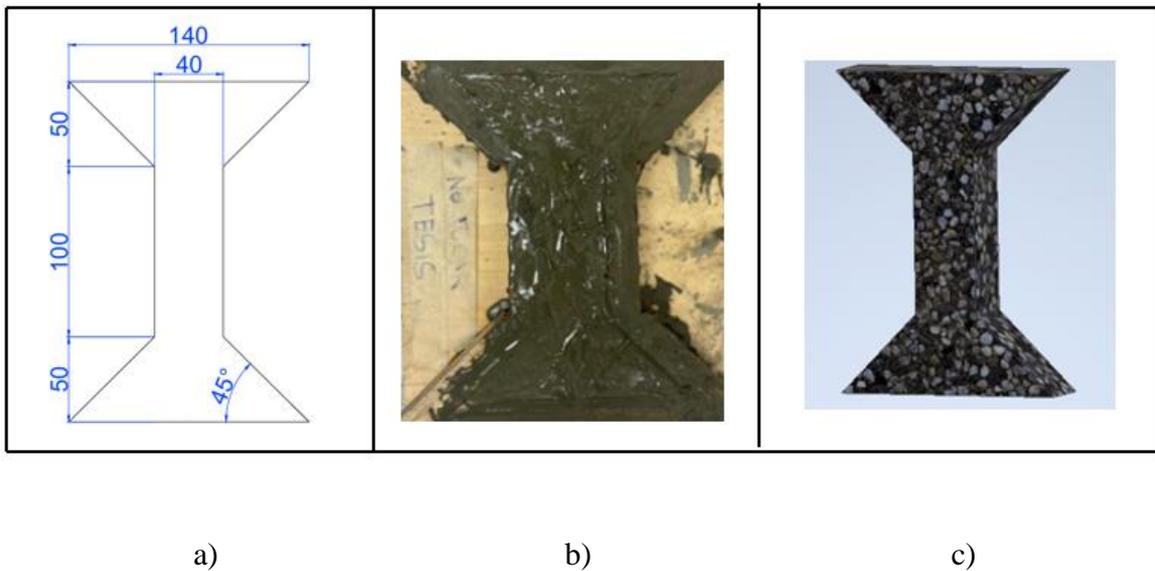


Figura 8. a) Dimensiones de probeta de hormigón. b) Fundición de hormigón en encofrado, c) Probeta de hormigón esquematizada en Inventor.

Por cada probeta a ensayarse el volumen de hormigón necesario es: 520 cm^3 .

Una vez obtenida la probeta, se la curó durante 14 días y se procedió a evaluar su comportamiento en la máquina de tracción directa que contiene las mordazas de acople para esta prueba, Se decidió emplear una velocidad de desplazamiento de $2 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ en la base inferior de la máquina de tracción debido a la baja resistencia intrínseca de la matriz de hormigón frente a esfuerzos de tracción directa. Esta velocidad controlada permite una aplicación progresiva y uniforme de la carga, minimizando la posibilidad de un fallo súbito. El equipo y mordazas donde se realizó la prueba se puede visualizar en la Figura 9. Se observa que la probeta se encuentra entre las mordazas para su rotura, Se realizaron 19 pruebas en total: 3 probetas con 2% de fibras y 3 probetas con 4% de fibras para cada tipo de fibra (coco, polipropileno y abacá), sumando 18 probetas, más una probeta extra de pasta de cemento sin fibras



Figura 9. Probeta instalada en máquina de tracción

2.1.6 Correlación digital de imagen (DIC)

La técnica DIC permite medir el desplazamiento y la deformación al rastrear las posiciones de varios puntos en la superficie a partir de imágenes consecutivas. Esto se logra utilizando un algoritmo de correlación que analiza el patrón de intensidad (nivel de gris) en los subconjuntos mientras ocurre el movimiento.

a) Patrón de pintura aplicado en superficie

El patrón aplicado de pintura debe ser óptimo para la captura de imágenes de DIC, es necesario definir un patrón ya sea a partir de la aplicación de una lámina adhesiva, o la aplicación de pintura. En este caso, fue necesario pintar las probetas de color blanco con ayuda de pintura en aerosol tipo mate y se añadió ligeros puntos de color negro de igual manera con pintura en aerosol color negro mate, en un patrón homogéneo que contenga puntos de un diámetro similar, el patrón de pintura es mostrado en la Figura 10.

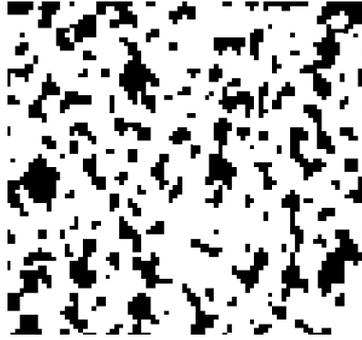


Figura 10. Patrón de pintura para probeta.

El patrón de pintura es aplicado a la probeta de hormigón sometida a tracción directa con el fin de visualizar la fractura y los cambios de deformación de esta.

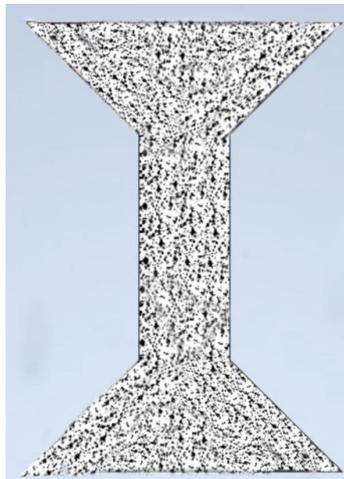


Figura 11. Característica de pintura en cara de imagen para probeta de pasta de cemento.

Para garantizar que los subconjuntos de las regiones de la imagen fueran identificados de manera única durante el análisis DIC, se aplicó un patrón aleatorio de pintura sobre la superficie de la probeta. Este patrón se logró utilizando una capa base de pintura blanca para generar un fondo uniforme, sobre la cual se roció pintura negra en forma de puntos irregulares distribuidos al azar. La distribución de la pintura debe ser heterogénea y aleatoria del tamaño, forma y densidad de los puntos negros, lo cual es fundamental para que el software pueda rastrear los desplazamientos y deformaciones de manera precisa durante el ensayo.

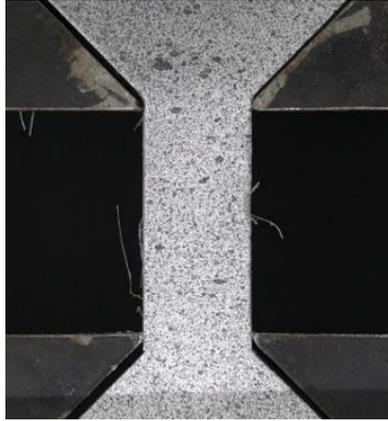


Figura 12. Probeta con patrón de pintura aplicado.

b) Captura de imágenes

Se grabó un video en formato RAW, 4K para cada experimento en una cámara Sony Alpha 6100 con un lente de 55 mm a 150 mm, con la configuración: 1/15 de velocidad de obturación, Apertura F 5.6, y un ISO de 400, y se procesó las imágenes a través del software, dvidvideosoft, el cual captura imágenes a partir de un video con un tiempo definido, en este caso se definió una captura de imágenes cada 0.5 segundos.

c) Zeiss Inspect – Correlate

Esta herramienta de análisis de imágenes procesa computacionalmente imágenes para la correlación digital (DIC) en 2D y 3D. Su interfaz gráfica permite visualizar deformaciones según puntos de análisis definidos por el usuario. Zeiss Inspect permite modificar elementos individuales y actualiza todo el análisis según las modificaciones realizadas. (Zeiss 2010).

Para el análisis se importó las imágenes al software Zeiss Inspect – Correlate como imagen de deformación. Para cada video se estableció una captura definida cada 0.5 segundos. Se procedió a definir una escala entre píxeles, tomando como referencia una distancia conocida de 40 mm, la cual corresponde a 276.3 píxeles. Esto permitió establecer que cada píxel equivale a aproximadamente 0.145 mm/píxel. Además, considerando que cada píxel tiene un área de 0.01 mm², se garantiza una resolución adecuada para el análisis de

desplazamientos y deformaciones en la probeta.

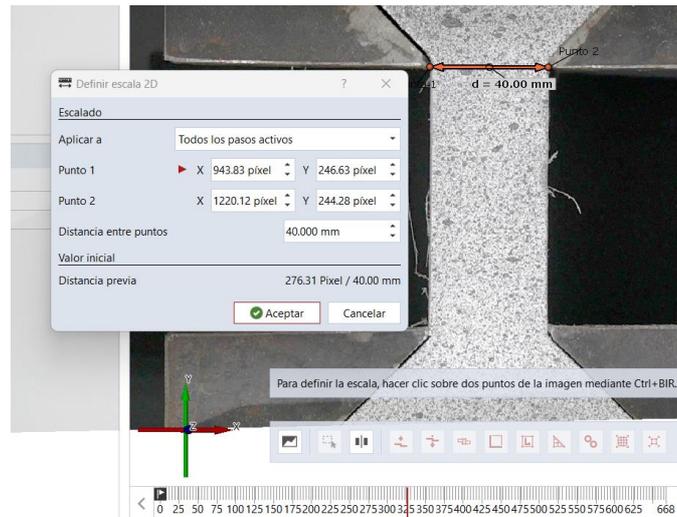


Figura 13. Definir escala 2D entre píxeles en programa Zeiss – Inspect.

Se recomienda que la distancia entre puntos sea entre un tercio y la mitad del tamaño de faceta, que es una pequeña región cuadrada o rectangular de píxeles seleccionada dentro de la imagen digital. Esta faceta actúa como una unidad de análisis que el software utiliza para rastrear el movimiento o deformación del material durante el ensayo de manera que los subconjuntos vecinos tengan un grado adecuado de superposición. Si la superposición es mayor a un tercio del tamaño de faceta, los puntos cercanos comienzan a compartir demasiada información, lo que los hace menos independientes y limita los beneficios de reducir el tamaño de distancia entre puntos, sin embargo, los resultados también dependen de la calidad de la cámara, la nitidez de las imágenes y las capacidades del software utilizado, en la Figura 14 se visualiza la configuración recomendada (Sause 2016).

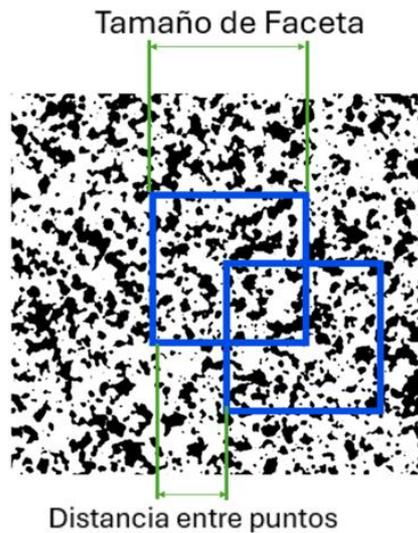


Figura 14. Tamaño de faceta y distancia entre puntos.

Una vez definido el tamaño de faceta y la distancia entre puntos se crea la superficie de análisis, el software Zeiss Inspect – Correlate permite el ajuste manual de la superficie en caso de requerir un análisis en una zona específica, el software define la calidad de patrón utilizado en la probeta.

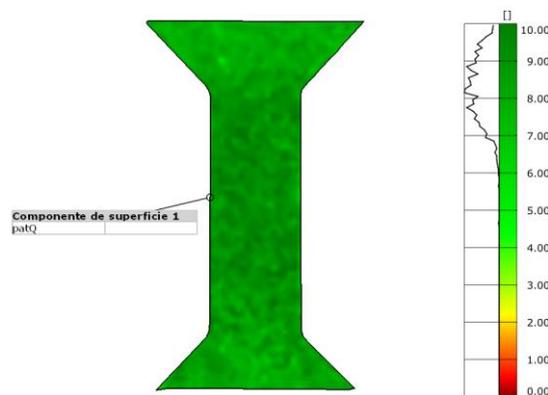


Figura 15. Superficie definida y análisis de calidad de patrón.

La deformación es analizada en la superficie definida donde el software genera un patrón de colores para cada paso definido (el programa define como paso a la imagen de deformación analizada según el tiempo establecido) en los cuales se puede visualizar la zona en donde se genera una mayor deformación y en este caso la rotura de la probeta de pasta de

cemento.

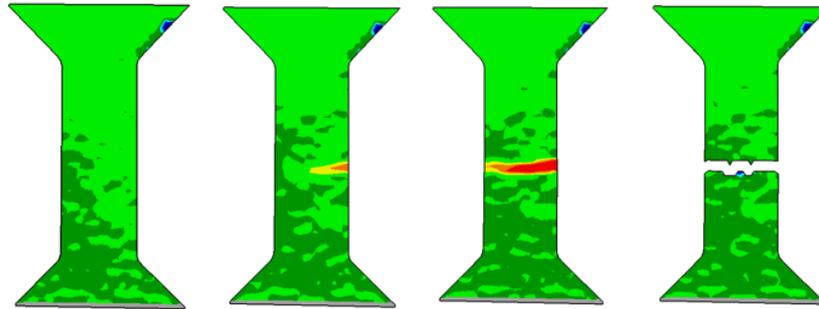


Figura 16. Evolución de deformaciones en Zeiss Inspect – Correlate.

Se definieron puntos de análisis para comparar la gráfica Desplazamiento vs. Tiempo de la máquina de tracción directa del laboratorio con los resultados del software Zeiss Inspect, validando así el desplazamiento medido. Se estableció un desplazamiento de 2 mm/min en la máquina. El desajuste visible en la Figura 17 (línea azul) en las series dadas por DIC se debe a un leve movimiento en la cámara.

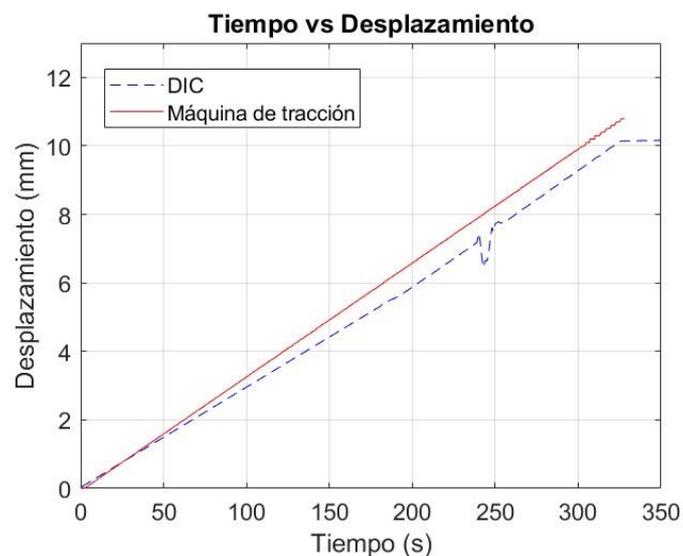


Figura 17. Tiempo vs Desplazamiento. DIC y Máquina de tracción.

El software fue empleado para comparar los valores de deformación y desplazamiento registrados durante los ensayos. Esta comparación evidenció una variación significativa entre

ambos, ya que la máquina de tracción del laboratorio de materiales únicamente mide los desplazamientos ocurridos en la base inferior de la máquina, y no distingue si existieron deslizamiento en la probeta. Por otro lado, el análisis mediante el método de Correlación Digital de Imágenes (DIC) permitió corregir estos valores, proporcionando una medición más precisa de la deformación a lo largo de la probeta.

Aunque el software Zeiss Inspect - Correlate no permite determinar directamente los esfuerzos, se sincronizó el tiempo entre los datos obtenidos por el software y la máquina de tracción. Esto permitió corregir las deformaciones y, posteriormente, realizar la curva esfuerzo vs deformación de las probetas. Se utilizaron los valores de carga proporcionados por la máquina junto con las deformaciones corregidas obtenidas del DIC, si bien, el uso de Software fue beneficioso para la corrección de deformaciones, es importante mencionar que en estudios futuros es necesario colocar un instrumento especializado que permita medir la deformación de la pasta de cemento con precisión como puede ser un extensómetro, galgas extensiométricas, o sensores de fibra óptica.

2.2 Resultados

2.2.1 Resultados y Análisis del Módulo de Elasticidad Dinámico.

La densidad promedio de cada probeta elaborada con la adición de fibras, agregados normales y agregados reciclados es presentada en la Tabla 2, para el presente estudio se utilizó 3 probetas por cada mezcla y se obtuvo su promedio.

Tabla 2. Densidad promedio

<i>Densidad promedio de probetas</i>				
<i>Agregados Normales</i>		<i>Agregados Reciclados</i>		<i>Diferencia (%)</i>
<i>Fibras</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>	<i>Fibras</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>	
F. Polipropileno	2360	F. Polipropileno	2216	+6.1%
F. Abacá	2343	F. Abacá	2359	+0.68%
F. Coco	2419	F. Coco	2304	+4.75%

La reducción de la densidad en la utilización de agregados reciclados varía según la combinación de tipo de fibra, en el caso de las fibras de polipropileno presentan una reducción del 6.1%, en el caso de las fibras de abacá se presenta una densidad similar, y en el caso de las fibras de coco existe una reducción del 4.75%.

La variación entre frecuencia promedio de resonancia según la adición de fibras y su variación con el tiempo se puede visualizar en las figuras 18 y 19, en las que se presenta un mismo eje x de frecuencia en Hertz y se puede visualizar lo que sucede con el tiempo en la frecuencia promedio de resonancia de cada mezcla a los 30 días y a los 240 días.

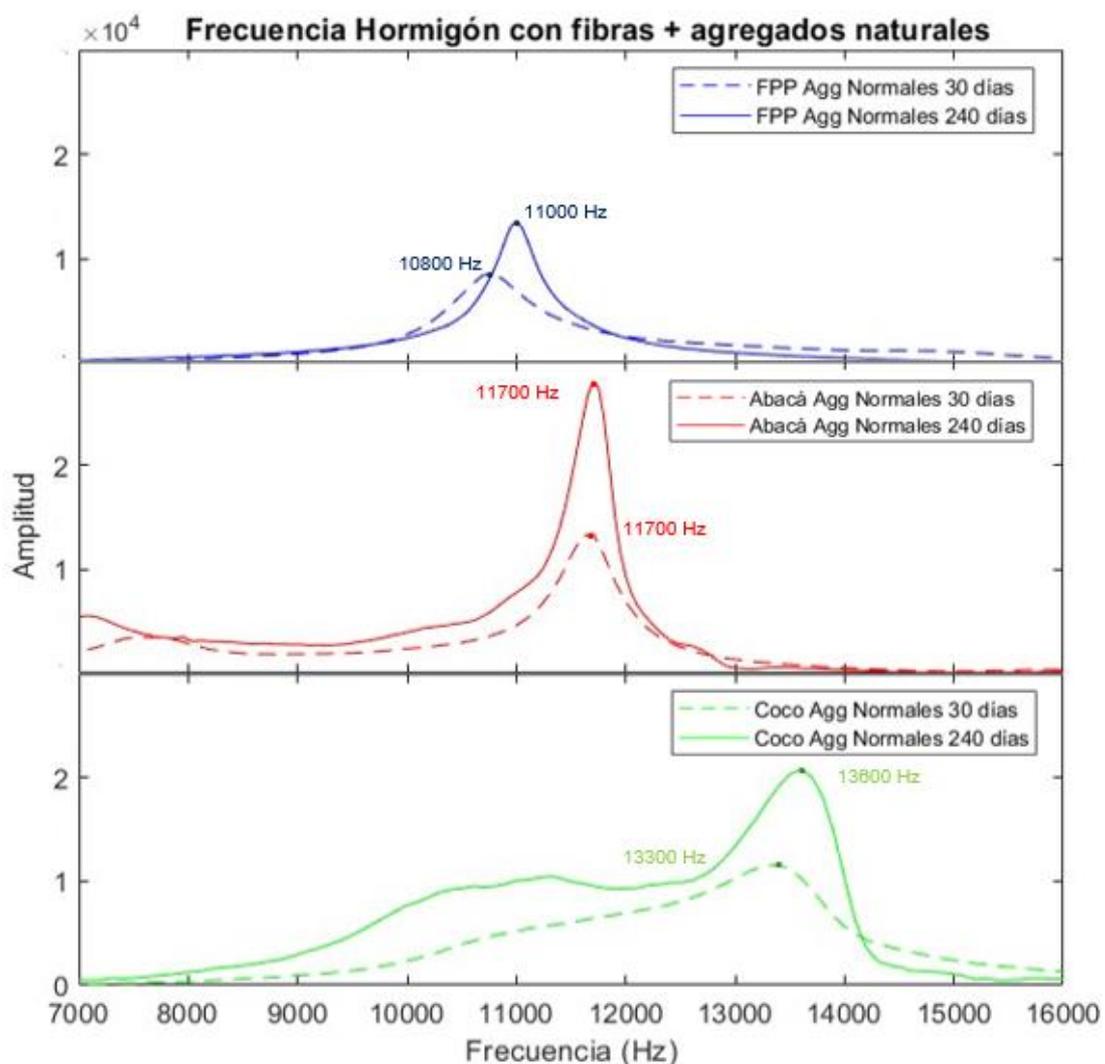


Figura 18. Frecuencia de probetas de hormigón con agregados normales según la adición de fibras y su variación a los 30 y 240 días.

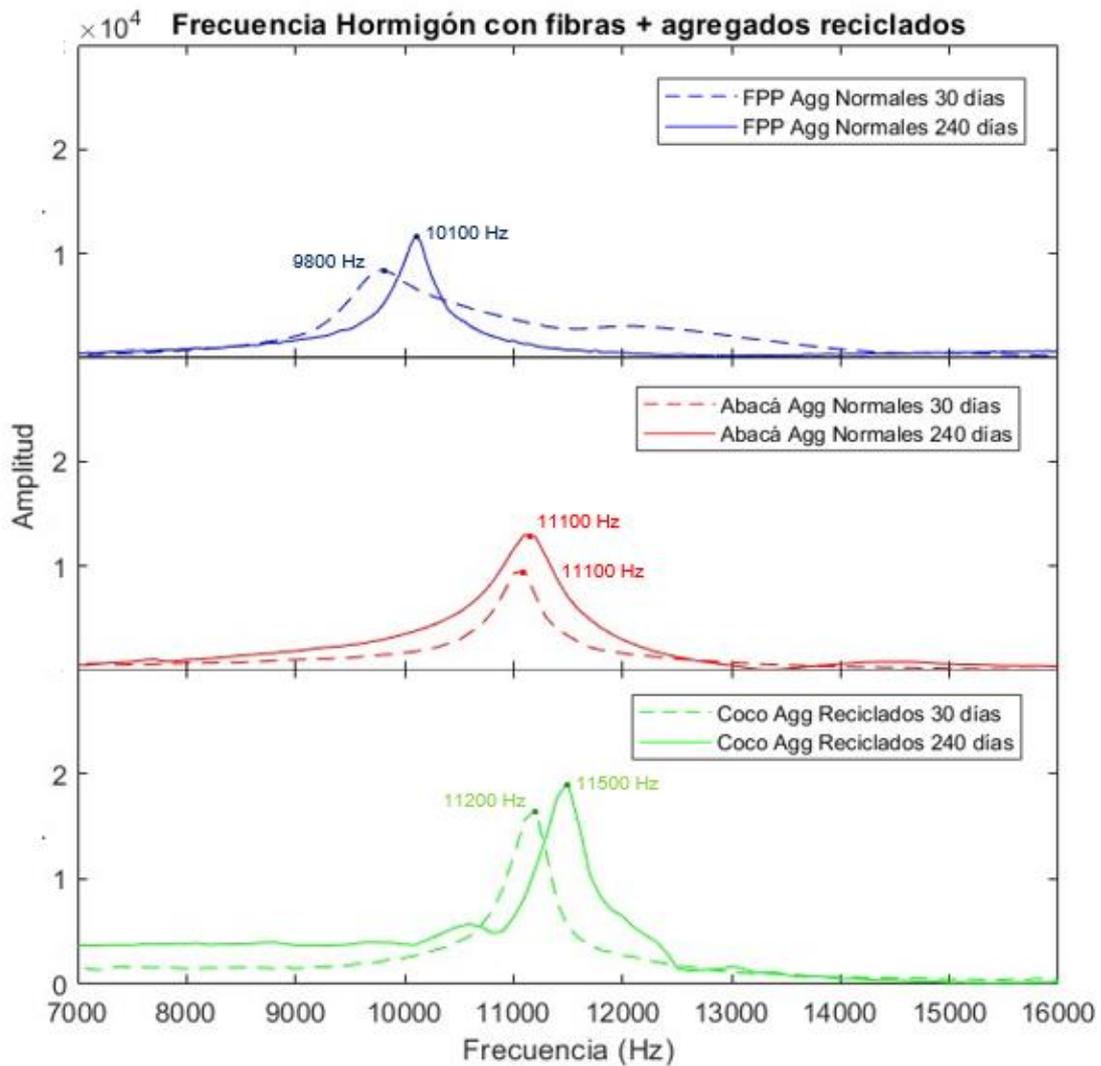


Figura 19. Frecuencia promedio de probetas de hormigón con agregados reciclados según la adición de fibras y su variación a los 30 y 240 días.

Los resultados de módulo de elasticidad dinámico promedio son presentados en la tabla 3, en donde se evidencia un ligero aumento entre las pruebas realizadas a los 30 y 240 días.

Tabla 3. Módulo de elasticidad dinámico promedio según el tiempo de medición.

<i>Agregados Normales</i>			
<i>Mezcla</i>	<i>E_d (GPa) 30 días</i>	<i>E_d (GPa) 240 días</i>	<i>Diferencia (%)</i>
F. Polipropileno	27.12	29.08	+7.23%
F. Abacá	29.02	29.21	+0.65%
F. Coco	36.21	38.6	6.60%
<i>Agregados reciclados</i>			
<i>Mezcla</i>	<i>E_d (GPa) 30 días</i>	<i>E_d (GPa) 240 días</i>	<i>Diferencia (%)</i>
F. Polipropileno	19.03	19.95	+4.83%
F. Abacá	27.89	28.72	+2.98%
F. Coco	28.45	29.43	+3.44%

La Figura 20, es un gráfico de barras en donde se denota la variación del módulo de elasticidad dinámica a los 30 y 240 días se establece las barras de error dadas por la desviación estándar, con un doble eje y en el que se presenta la medición de su densidad promedio.

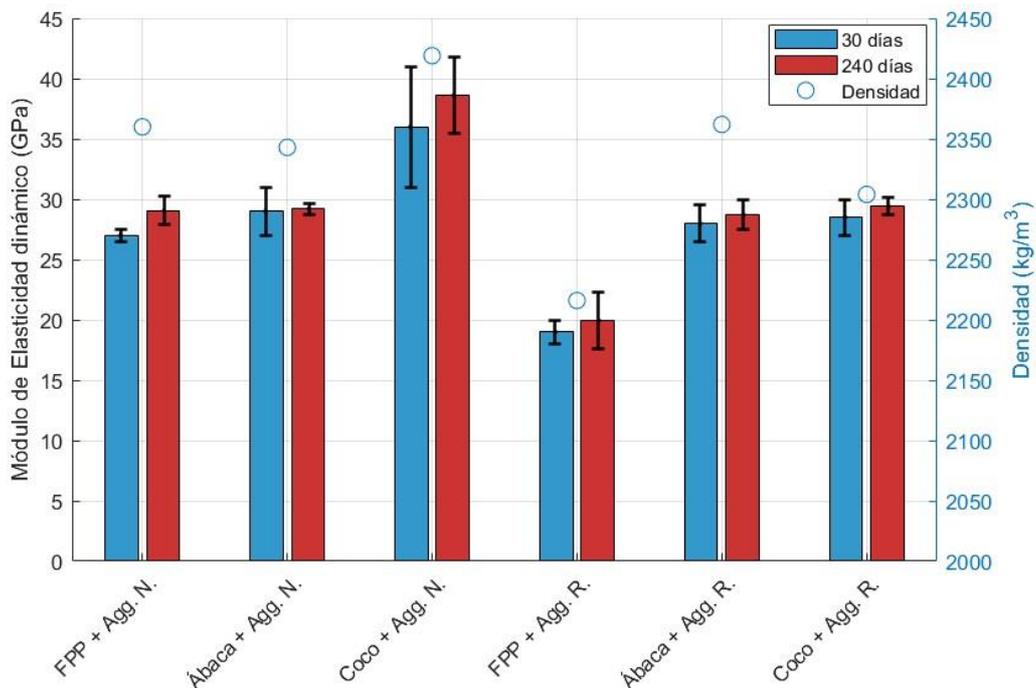


Figura 20. Módulo de elasticidad dinámico a los 30 y 240 días y densidad promedio según mezcla realizada.

2.2.2 Análisis de resultados: Módulo de Elasticidad Dinámico, E_{dyn} .

Las Figuras 18 y 19 muestran la variación de frecuencia de resonancia entre las mezclas. Este parámetro no varía significativamente entre discos de la misma mezcla. A pesar de realizar 9 ensayos por mezcla a los 30 y 240 días, no hubo variaciones significativas de resultados. Se observó un ligero aumento general de la frecuencia de resonancia a los 240 días, lo que incrementó el módulo de elasticidad dinámico. Esto se debe a que las probetas se mantuvieron en piscinas de curado durante este periodo, coincidiendo con el análisis de Kocab sobre el módulo elástico dinámico y estático del hormigón bajo diferentes condiciones de curado. (Kocab et al. 2017). El módulo de elasticidad dinámico promedio aumentó un 7.23% con fibras de polipropileno, 6.6% con fibras de coco y 0.65% con fibras de abacá en mezclas con agregados normales. Para los agregados reciclados, el orden de cambio con el uso de fibras se mantiene, pero los porcentajes de diferencia son menores: 4.83% con fibras de polipropileno, 3.44% con fibras de coco y 2.98% con fibras de abacá.

En este estudio se consideró la no linealidad de los materiales fabricados a base de materiales cementantes, tal como lo menciona Rashetnia (2016), debido a que los defectos en las probetas generan una disminución en la frecuencia de resonancia y por ende impactan en el cálculo del módulo de Elasticidad dinámico. La uniformidad y simetría en la forma de los picos aumentaron en la comparación de curvas a los 30 y 240 días, indicando una mayor estabilidad en la estructura interna del material, sin embargo, en las probetas con fibras de coco se observa una desviación estándar considerablemente alta ver Figura 18. Este comportamiento se atribuye a problemas de trabajabilidad asociados a este tipo de fibra, ya que su estructura genera grumos que dificultan una distribución homogénea dentro de la mezcla. La presencia de estos grumos ocasiona variaciones en la densidad entre discos y en la frecuencia de resonancia entre los

discos evaluados. Esto es evidente en la Figura 18, donde la forma de los picos en la transformada de Fourier muestra una distribución irregular desde los 30 días de curado, lo que indica que la mezcla presentó esta heterogeneidad desde el inicio. Este patrón de distribución no uniforme persiste incluso a los 240 días, evidenciando que las características iniciales de la mezcla influyen en su comportamiento dinámico en el tiempo, según los estudios de Rashetnia, esto se atribuye a una no linealidad mayor en esta mezcla (Rashetnia et al. 2016).

La evaluación permitió corroborar que las muestras no presentan daños que afecten negativamente el módulo de elasticidad, ya que los picos de la transformada de Fourier mantienen una forma adecuada, sin irregularidades ni deformaciones evidentes.

2.2.3 Resultados a prueba de Tensión Directa.

Una vez curados 14 días las probetas con adición de fibras, se procedió a la prueba experimental a tensión directa a cada prueba, se realizaron tres pruebas para cada probeta con un porcentaje específico de adición de fibra, y una extra sin fibra, con el fin de obtener una desviación estándar para los valores máximos de la curva esfuerzo (MPa) y deformación unitaria (ϵ), a continuación se presentan las curvas esfuerzo – deformación para las probetas de pasta de cemento y la adición de fibras de polipropileno, abacá y coco en la Figura 21.

Curvas Esfuerzo – Deformación

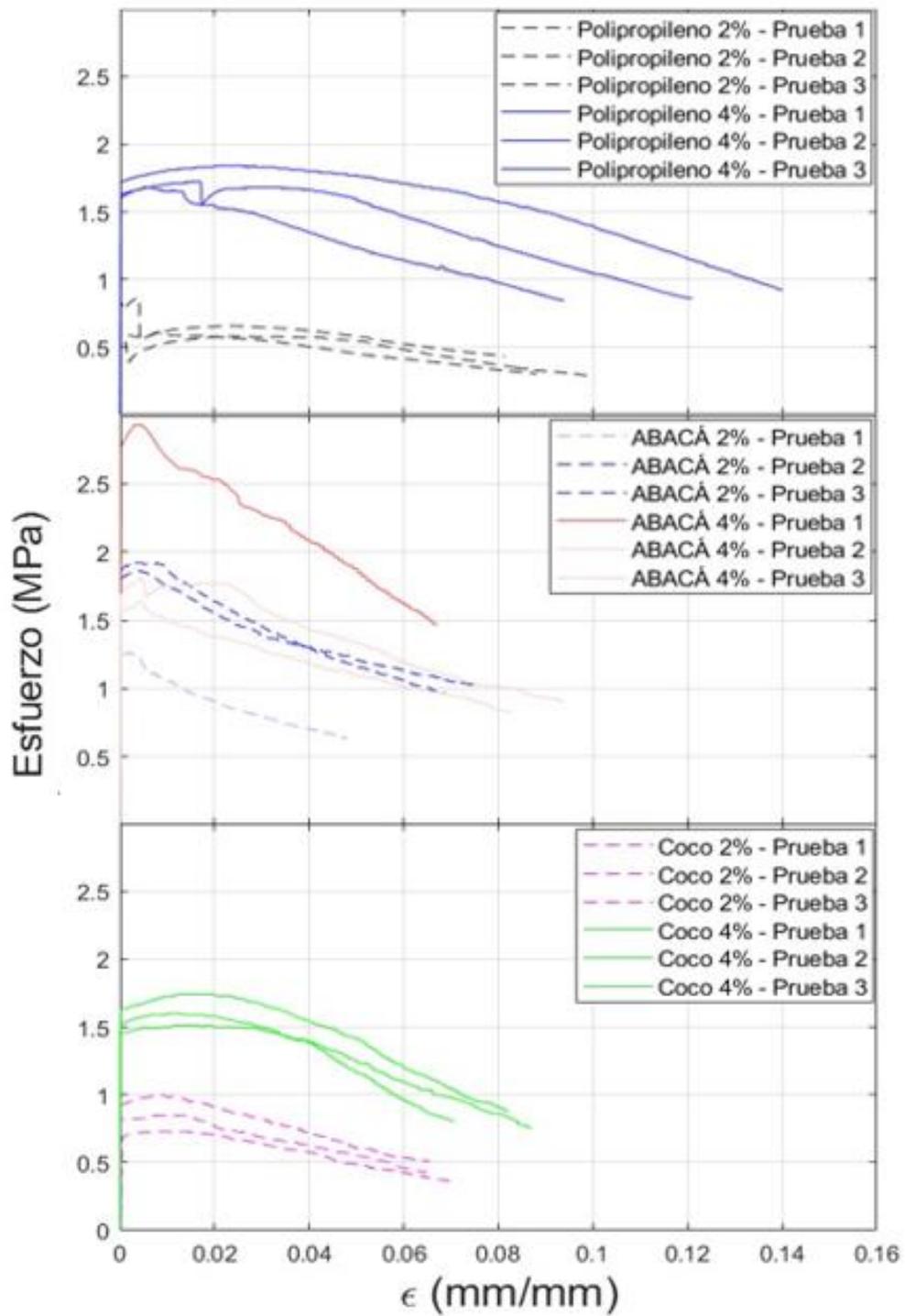


Figura 21. Curva Esfuerzo – Deformación, probeta de pasta de cemento y adición de fibras de polipropileno, abacá y coco.

En la Figura 22. se puede visualizar que sucede en la probeta al finalizar la prueba; debido al uso de fibras, en la zona donde se tiene la rotura se visualiza las fibras conectadas en la pasta de cemento.

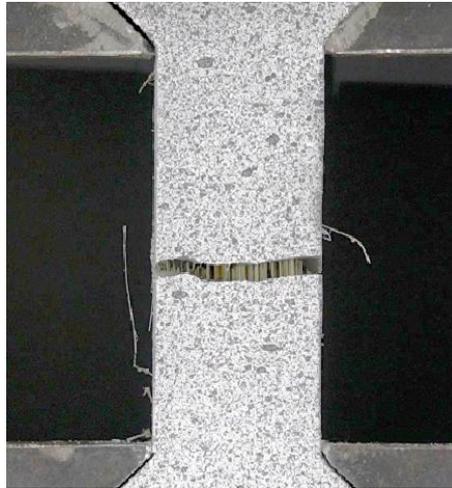


Figura 22. Probeta al finalizar la prueba

Las fibras toman un valor muy alto de deformación en la prueba, entre 5 y 15 mm, lo que genera que visualmente la deformación de la pasta de cemento tienda a cero, ya que su deformación tiene un orden de magnitud mucho menor en comparación con el otro, ya que la diferencia entre ambos valores es de aproximadamente tres órdenes de magnitud, que la parte de las fibras, en la Figura 23, se visualiza el comportamiento de una probeta de pasta de cemento sin fibras y se realizó una regresión lineal, esto fue posible en esta probeta debido a que el número de puntos únicamente se centra en la pasta de cemento.

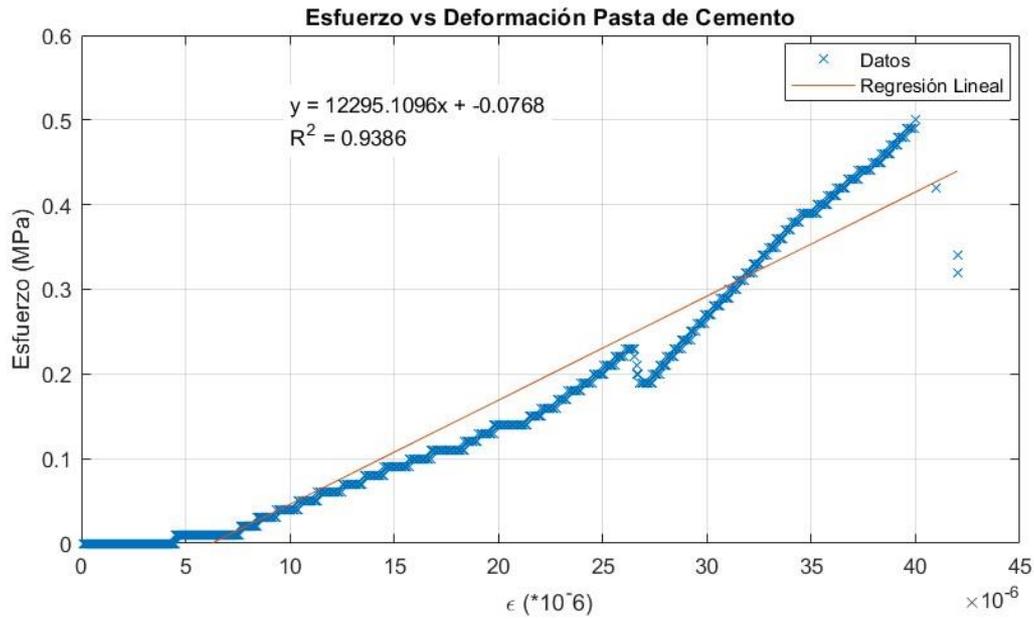


Figura 23. Curva esfuerzo – deformación, probeta de pasta de cemento, sin fibras.

Al realizar la regresión lineal se obtiene una pendiente de la curva de 12295.11 MPa, es decir: 12.3 GPa, esto fue posible en este gráfico debido a que los puntos de análisis únicamente se centran en el comportamiento de la probeta de pasta de cemento. El valor de la pendiente de esta regresión lineal tiene similitud con la literatura en donde se menciona que el módulo de elasticidad de la pasta de cemento tiene un rango definido de entre 10 a 30 GPa (Gao et al. 2021; Jiang et al. 2012).

Con los resultados obtenidos se elaboró un gráfico de barras que representa los valores máximos alcanzados en las pruebas realizadas sobre las probetas. Se llevaron a cabo ensayos con mezclas que incluyeron fibras en porcentajes del 2% y 4% en volumen, utilizando tres tipos de fibras: coco, polipropileno y abacá. Cada combinación fue probada en tres probetas, mientras que, adicionalmente, se evaluó una probeta de referencia compuesta únicamente de pasta de cemento sin fibras, mostrando las diferencias en la resistencia máxima alcanzada como se visualiza en la Figura 24.

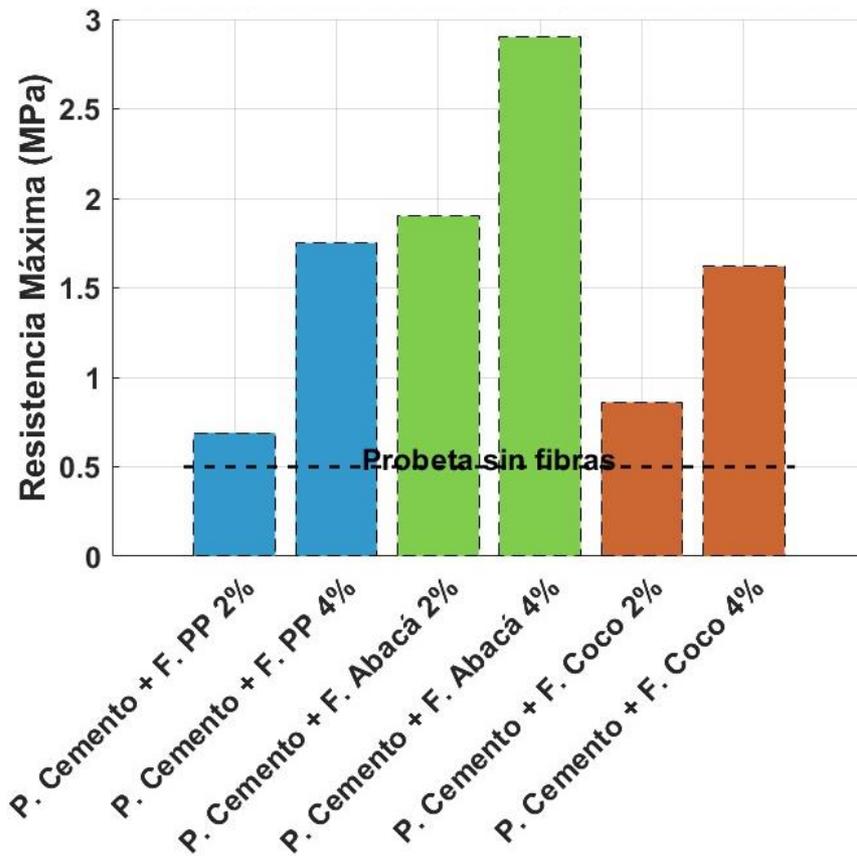


Figura 24. Resistencia máxima a la prueba experimental de tensión directa, según la porcentaje y fibra añadida.

Al trazar el área bajo la curva de los resultados de esfuerzo – deformación se mide la tenacidad, La tenacidad es la capacidad de un material para absorber energía de deformación. La tenacidad se mide en unidades de energía por volumen ($\frac{Joules}{m^3}$), al multiplicar por el volumen de la probeta se obtiene el valor de energía en Joules.

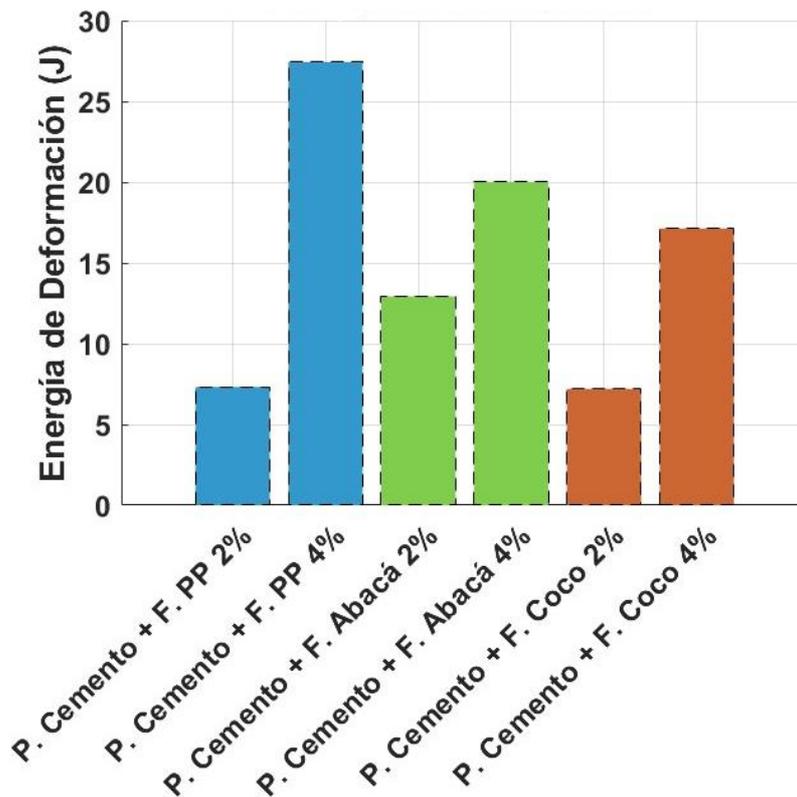


Figura 25. Energía de deformación.

2.2.4 Análisis de prueba de tracción directa.

Todas las mezclas reforzadas superan la resistencia base de la pasta de cemento sin fibras, confirmando la utilidad de las fibras de polipropileno y naturales en mejorar las propiedades a tracción de la matriz, la resistencia base de la pasta de cemento sin fibras fue de 0.5 MPa, este valor sirve como referencia para cuantificar el efecto positivo de las fibras en la resistencia a la prueba de tensión directa.

Las fibras de polipropileno muestran una mejora significativa con un mayor porcentaje entre su adición del 2% en comparación al resultado obtenido con la adición del 4% en volumen, aunque su desempeño inicial es limitado, al incorporar un 2% de fibras de Polipropileno, se observó una resistencia promedio de 0.69 MPa, siendo la más baja entre las mezclas evaluadas. Al aumentar el contenido de fibras de polipropileno al 4%, la resistencia experimentó un incremento significativo, alcanzando los 1.75 MPa. Este resultado indica que

un mayor porcentaje de fibras mejora la resistencia, probablemente debido a una distribución más homogénea de las fibras en la matriz y una mayor interacción mecánica entre ellas.

En el caso de las fibras de abacá, son las más efectivas para mejorar la resistencia a tracción, incluso con porcentajes bajos, alcanzando 1.68 MPa con un 2% y 2.12 MPa con un 4%. Este desempeño destaca la capacidad del Abacá para reforzar la pasta de cemento, sin embargo, también denota la desviación estándar más alta, por esto es necesario realizar más pruebas con el fin de contextualizar mejor el comportamiento a tensión directa de las probetas de pasta de cemento con la adición de fibras de abacá.

Las mezclas con fibra de coco mostraron una resistencia media. Con 2% de fibra, la resistencia fue de 0.86 MPa, y con 4%, aumentó a 1.62 MPa. La desviación estándar más baja indica mayor consistencia en los resultados, a pesar de los problemas de trabajabilidad

Al realizar la regresión lineal se obtiene una pendiente de la curva de 12295.11 MPa, es decir: 12.295GPa, esto fue posible en este gráfico debido a que los puntos de análisis únicamente se centran en el comportamiento de la probeta de pasta de cemento, esto se realizó con el fin de tener una estimación de la elasticidad de la matriz, en la prueba de tensión directa, este resultado no puede ser descrito como el módulo de elasticidad de la probeta ya que se requiere un mayor número de pruebas y la validación de las micro deformaciones medidas por la correlación digital de imagen con el uso de galgas extensiométricas (trabajo en progreso). El valor de la pendiente de esta regresión lineal tiene similitud con la literatura en donde se menciona que el módulo de elasticidad de la pasta de cemento tiene un rango definido de entre 10 a 30 GPa (Gao et al. 2021; Jiang et al. 2012)

3. CONCLUSIONES

3.1 Módulo de elasticidad dinámico

- Las mezclas evaluadas mostraron un aumento general del módulo de elasticidad dinámico entre los 30 y los 240 días de curado. Este incremento, particularmente notable en mezclas con fibras de polipropileno y agregados normales 7.23%.
- En mezclas con agregados reciclados, el módulo de elasticidad dinámico también aumentó, aunque en menor proporción hasta 4.8% con fibras de polipropileno.
- La evaluación mediante transformada de Fourier reveló mayor uniformidad en los picos de frecuencia a los 240 días, lo que sugiere una estructura interna más estable con el tiempo, particularmente en mezclas con agregados normales.
- Las fibras de coco presentaron la desviación estándar más alta en las pruebas dinámicas, lo que evidencia problemas de trabajabilidad y distribución irregular en la mezcla.

3.2 Prueba de tensión directa

- Se desarrollaron con éxito acoples y mordazas especializadas que permitieron someter el hormigón a pruebas de tracción directa, una metodología menos común en estos ensayos.
- La inclusión de fibras en la mezcla de pasta de cemento superó la resistencia base de la pasta de cemento sin fibras (0.5 MPa), validando la eficacia de las fibras para reforzar la pasta de cemento. Las fibras de abacá fueron las más efectivas, alcanzando hasta 2.12 MPa con un 4% de contenido, mientras que las fibras de polipropileno mostraron la mayor mejora porcentual entre el 2% y el 4% de adición.
- Las imágenes obtenidas después de las pruebas de tracción mostraron que las fibras permanecen conectadas en la pasta de cemento, contribuyendo a la redistribución de

esfuerzos en la zona de falla. Este comportamiento es especialmente evidente en las fibras de abacá.

- El uso de la técnica de correlación digital de imagen es útil para medir deformaciones en la probeta. Sin embargo, es necesario validar los resultados de deformación de los materiales cementicios obtenidos por el software con instrumentos que puedan medir micro deformaciones como extensómetros, galgas extensiométricas o LVDTs.

Referencias Bibliográficas

- Bedoya, Carlos, y Luis Dzul. 2015. «El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana». *Revista ingeniería de construcción* 30(2):99-108.
- Constantinides, Georgios, y Franz-Josef Ulm. 2004. «The effect of two types of CSH on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling». *Cement and concrete research* 34(1):67-80.
- Gagg, Colin R. 2014. «Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis». *Engineering Failure Analysis* 40:114-40. doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.
- Gao, Y., W. Li, K. Wu, y Q. Yuan. 2021. «Modeling the Elastic Modulus of Cement Paste with X-Ray Computed Tomography and a Hybrid Analytical-Numerical Algorithm: The Effect of Structural Heterogeneity». *Cement and Concrete Composites* 122:104145. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104145.
- Hutchinson, J. R. 1979. «Axisymmetric flexural vibrations of a thick free circular plate».
- Játiva, Francisco, Juan Martin Tamayo, Tommy Silva, Oscar Granja, Raul Cabrera, Xavier Arce, Luis Guadalupe, Mauricio Guillen, Eddie Koenders, y Eva Lantsoght. 2024. «Experiments on concrete test beams with recycled aggregates and natural fibers». *Procedia Structural Integrity* 64:1468-75. doi: 10.1016/j.prostr.2024.09.394.
- Jiang, Lei, Yamei Zhang, Chuanlin Hu, y Zongjin Li. 2012. «Calculation of elastic modulus of early-age cement paste». *Advances in Cement Research* 24(4):193-201. doi: 10.1680/adcr.11.00002.
- Kocab, Dalibor, Barbara Kucharczykova, Petr Misak, Petr Zitt, y Monika Kralikova. 2017. «Development of the Elastic Modulus of Concrete under Different Curing Conditions». *Procedia Engineering* 195:96-101. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.529.
- Lantsoght, Eva O. L. 2019. «How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups?» *Composites Part B: Engineering* 175:107079. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107079.
- Leming, Michael L., James M. Nau, y Jason Fukuda. 1998. «Non-destructive determination of the dynamic modulus of concrete disks». *Materials Journal* 95(1):50-57.
- Lin, Chen, Terje Kanstad, Stefan Jacobsen, y Guomin Ji. 2023. «Bonding property between fiber and cementitious matrix: A critical review». *Construction and Building Materials* 378:131169. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131169.
- Loo, Y., Chat-Tim Tam, y Sriravindrarah Rasiah. 1987. «Recycled concrete as fine and coarse aggregate in concrete». *Magazine of Concrete Research - MAG CONCR RES* 39:214-20. doi: 10.1680/mac.1987.39.141.214.
- Mehta, P., y Paulo J. M. Monteiro. 2005. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw Hill Professional.

- Mindess, Sidney, F. Young, y David Darwin. 2003. «Concrete 2nd editio». *Technical Documents* 585.
- Morales, Luis, Farid Alvansazyazdi, Paúl Landázuri, y Walter Vásconez. 2020. «Prevención de la contaminación por la fabricación de hormigones con nanopartículas». *Rev. Ibérica Sist. E Tecnol. Informação E* 30:309-24.
- Rashetnia, Reza, Farnam Ghasemzadeh, y Mohammad Pour-Ghaz. 2016. «The Consequences of Material Nonlinearity on the Axisymmetric Flexural Vibration Measurements for Estimating the Dynamic Elastic Modulus of Damaged Cement Based Materials». *Journal of Advanced Concrete Technology* 14(6):287-98. doi: 10.3151/jact.14.287.
- Sasaki, Tsuneji, Hiroshi Higashiyama, y Mutsumi Mizukoshi. 2023. «Flexural Behavior and Benefits of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete for Concrete Pavement». *ACI Materials Journal* 120. doi: 10.14359/51737294.
- Sause, Markus G. R. 2016. «Digital Image Correlation». Pp. 57-129 en *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites*. Vol. 242, *Springer Series in Materials Science*. Cham: Springer International Publishing.
- Scrivener, Karen L., Vanderley M. John, y Ellis M. Gartner. 2018. «Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry». *Cement and Concrete Research* 114:2-26. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
- Sims, Ian, y Bev Brown. 2003. «Concrete Aggregates». Pp. 907-1015 en *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*.
- Wang, Qiaozhi, Tiancheng Jiang, Lu Liu, Shoucheng Zhang, Anne Kildunne, y Zuohua Miao. 2023. «Building a Whole Process Policy Framework Promoting Construction and Demolition Waste Utilization in China». *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy* 41(4):914-23. doi: 10.1177/0734242X221126393.
- Zeiss. 2010. «Zeiss Inspect - Correlate».
- Zhang, Xutao, Ruijie Yin, Yunjuan Chen, y Chao Lou. 2023. «Experimental Study on the Axial Tensile Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete». *Scientific Reports* 13(1):16383. doi: 10.1038/s41598-023-43723-5.

ANEXOS

1. Código en Matlab para el proceso de obtener la curva de la transformada de Fourier a partir de los datos obtenidos en el osciloscopio.

```
% Leer datos del archivo de texto
filename = 'Archivo de texto ejemplo.txt'; % Reemplaza con el nombre del archivo
real
data = readmatrix(filename); % Usa readmatrix para archivos con encabezados

% Extraer valores de X y Y de las columnas
X = data(:, 1); % Primera columna
Y = data(:, 2); % Segunda columna

% Realizar la Transformada de Fourier
N = length(X); % Número de puntos de datos
Fs = 1 / (X(2) - X(1)); % Frecuencia de muestreo

% Usar la función fft para calcular la transformada de Fourier
Y_fft = fft(Y);

% Calcular el eje de frecuencia
frequencies = linspace(0, Fs/2, floor(N/2) + 1);

% Encontrar el índice donde la amplitud es máxima
[~, maxIndex] = max(abs(Y_fft(1:floor(N/2) + 1)));

% Obtener la frecuencia dominante
dominantFrequency = frequencies(maxIndex);

% Graficar los datos originales
figure;
plot(X, Y);
title('Datos medidos por el acelerómetro - P. Coco. Agg. R');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Voltaje (V)');

% Graficar la Transformada de Fourier
```

```

figure;
plot(frequencies, abs(Y_fft(1:floor(N/2) + 1)));
hold on;
plot(dominantFrequency, abs(Y_fft(maxIndex)), 'ro', 'MarkerSize', 8);
title('Transformada de Fourier - P. Coco. Agg. R. ');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Amplitud');
xlim([0 50000])
ylim([0 14000]) % Establece el límite máximo del eje Y en 14000
legend('Amplitude Spectrum', 'Dominant Frequency');

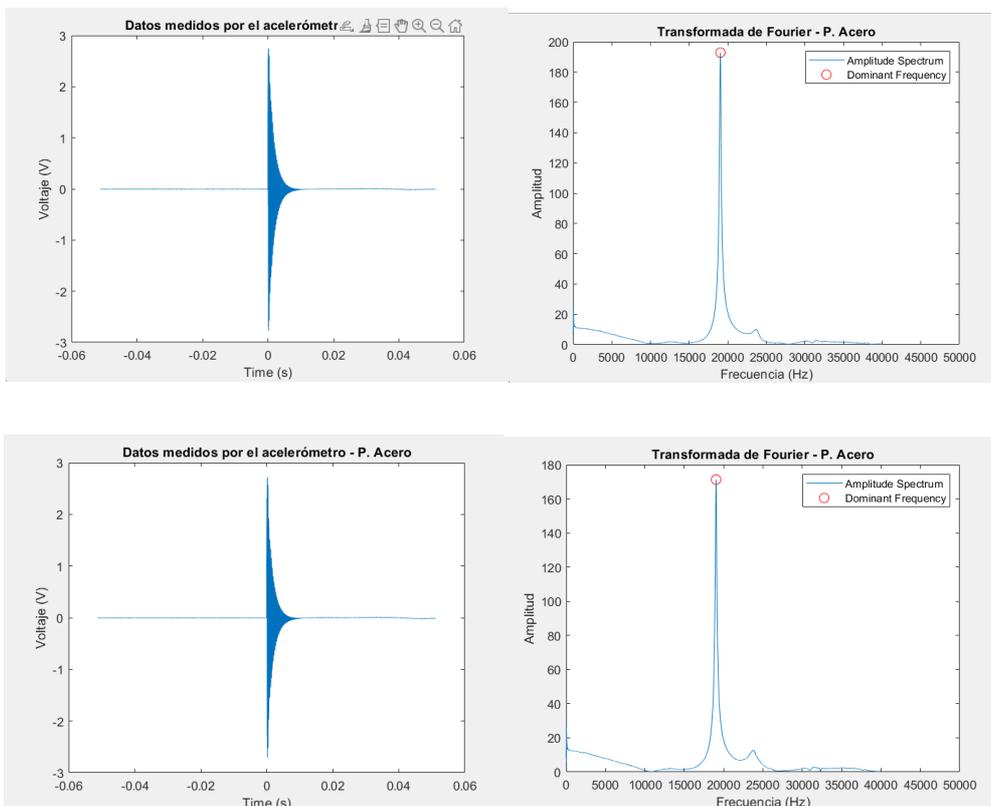
% Configuración del eje X para evitar notación científica
ax = gca;
ax.XAxis.Exponent = 0; % Desactiva la notación científica en el eje X

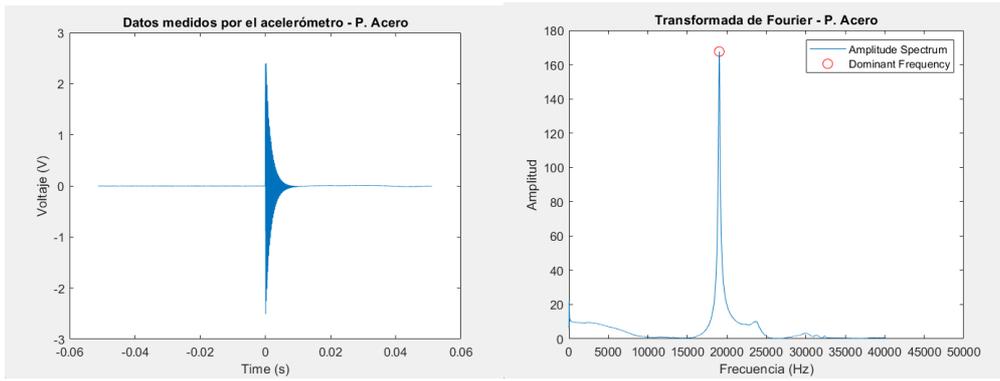
```

2. Frecuencia obtenida la transformada de Fourier y datos originales medidos por el

Osciloscopio para las probetas analizadas:

2.1 Probeta de Acero.



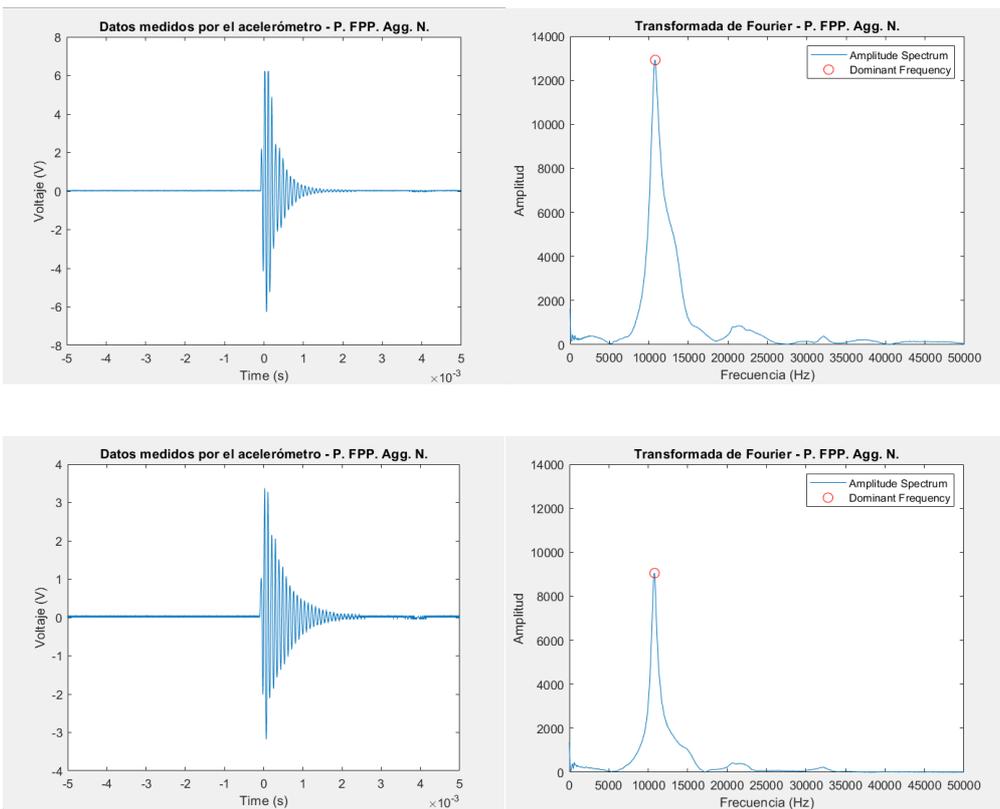


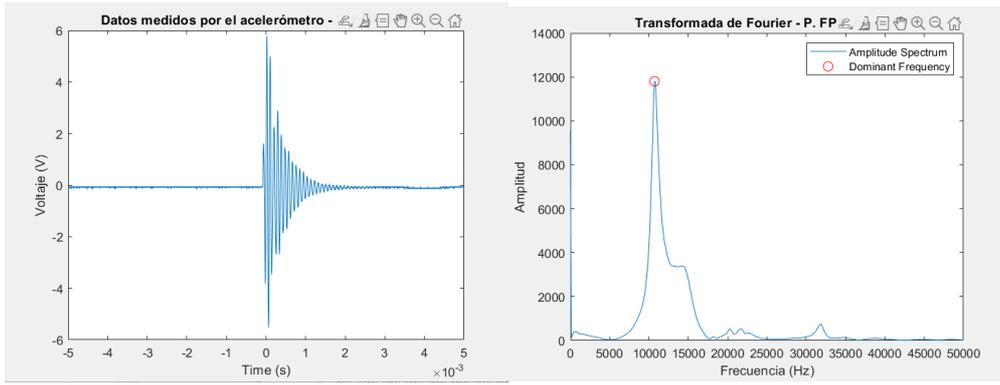
a)

b)

Figura 28. Resultados probeta de acero a) Datos dados por el receptor de señal Tiempo(s) vs Voltaje (V). b) Transformada de Fourier Frecuencia (Hz) vs Amplitud.

2.2 Probeta de hormigón con agregados normales y fibras de polipropileno.



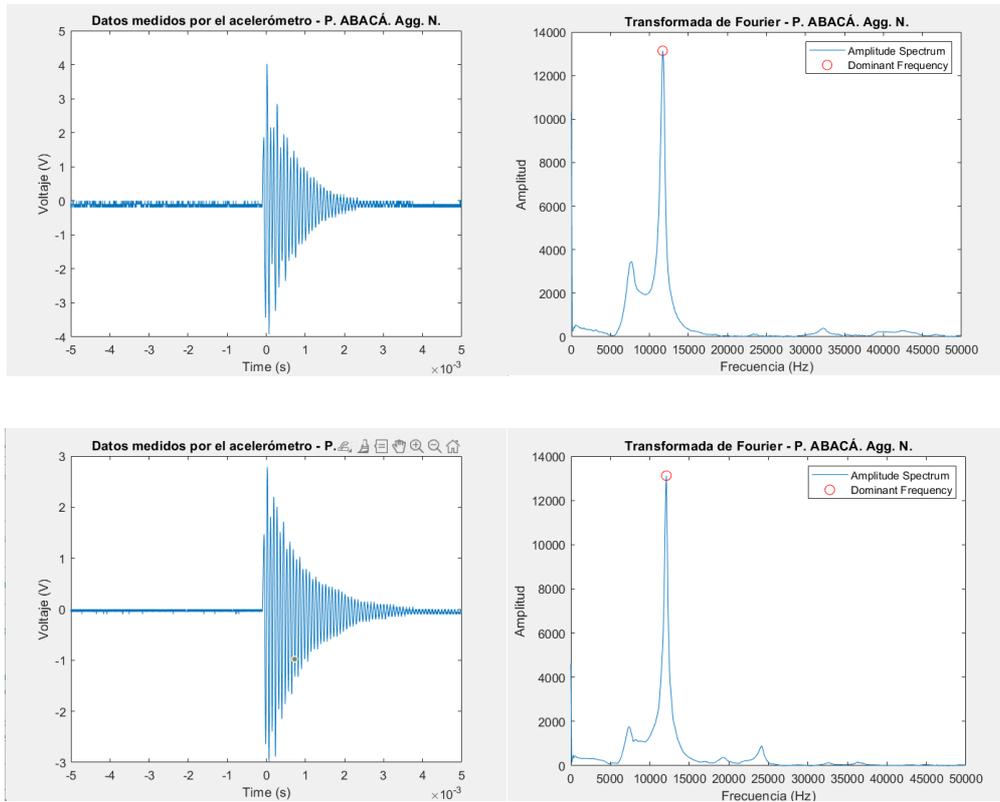


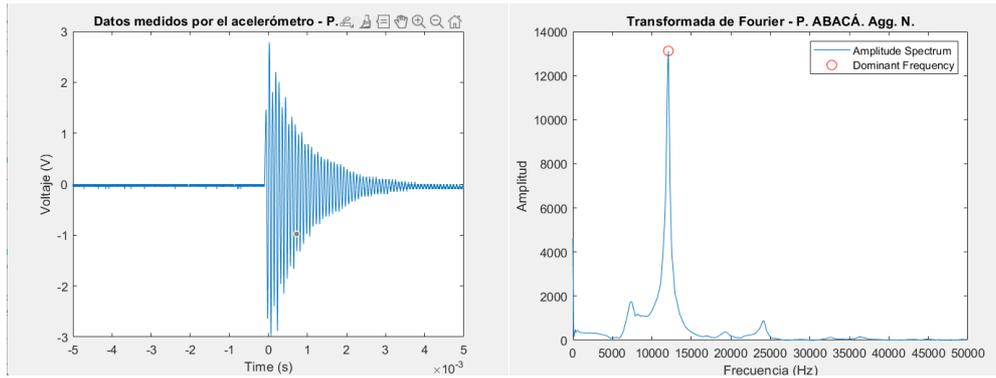
a)

b)

Figura 29. Resultados para probeta de hormigón con agregados normales y fibras de polipropileno. a) Datos dados por el receptor de señal Tiempo(s) vs Voltaje (V). b) Transformada de Fourier Frecuencia (Hz) vs Amplitud.

2.3 Probetas de hormigón de agregados naturales y fibras de abacá



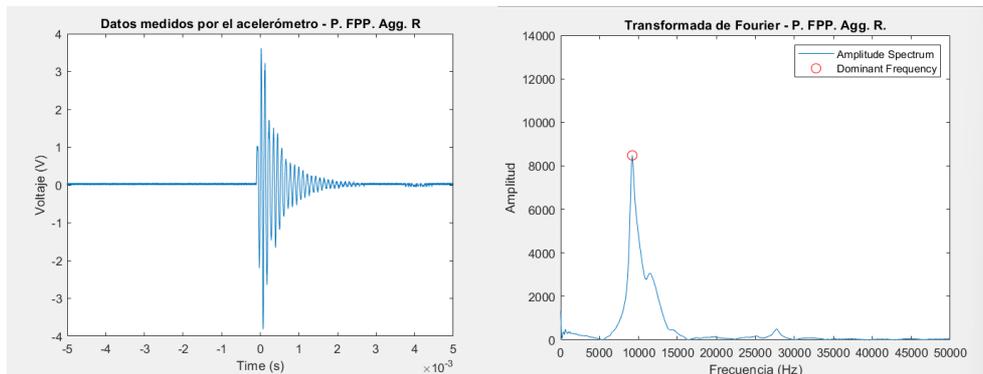
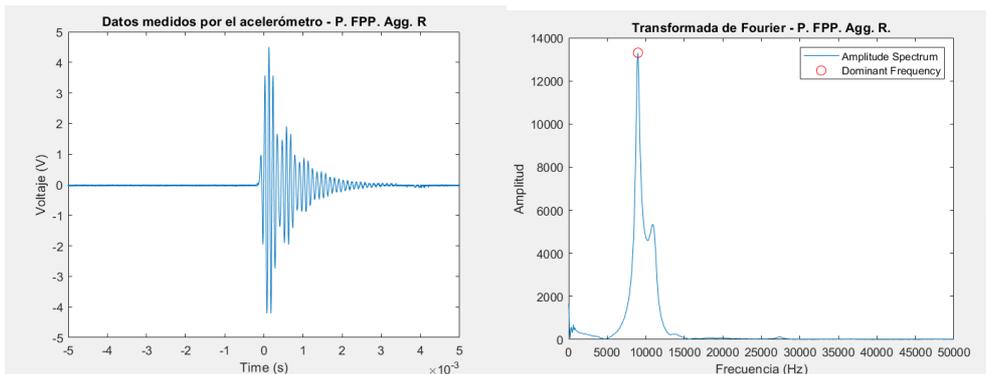


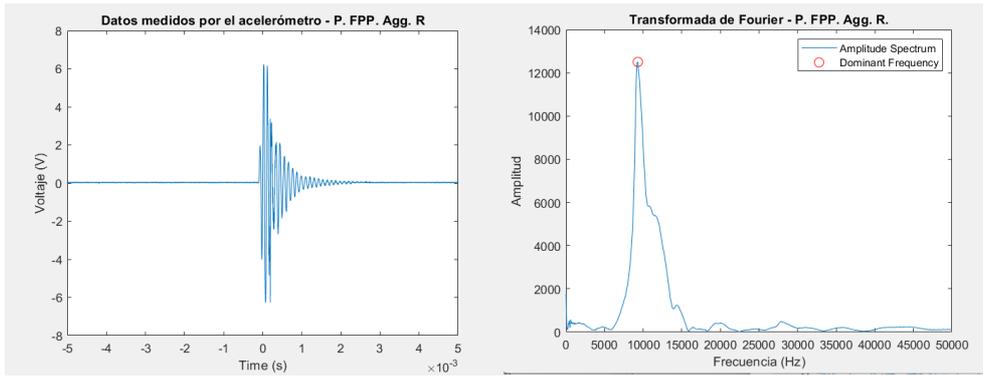
a)

b)

Figura 30. Resultados para probeta de hormigón con agregados normales y fibras de abacá. a) Datos dados por el receptor de señal Tiempo(s) vs Voltaje (V). b) Transformada de Fourier Frecuencia (Hz) vs Amplitud.

2.4 Probeta de hormigón con agregados reciclados y fibras de polipropileno.



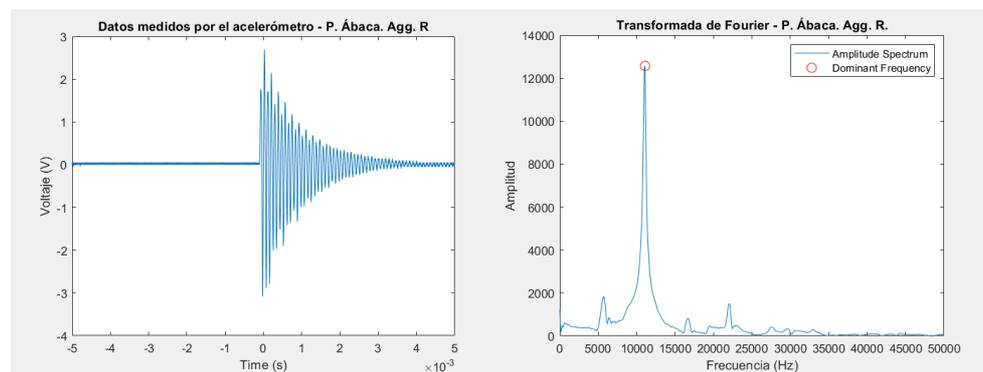
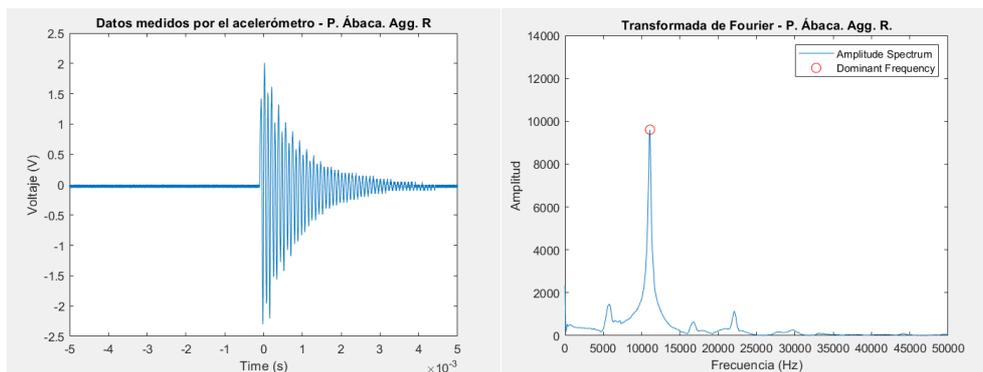


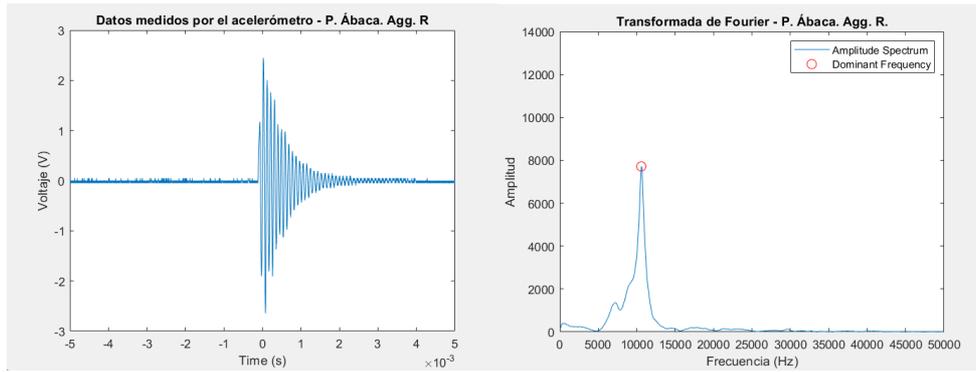
a)

b)

Figura 31. Resultados para probeta de hormigón con agregados reciclados y fibras de polipropileno. a) Datos dados por el receptor de señal Tiempo(s) vs Voltaje (V). b) Transformada de Fourier Frecuencia (Hz) vs Amplitud.

2.5 Probeta de hormigón con agregados reciclados y fibras de abacá.



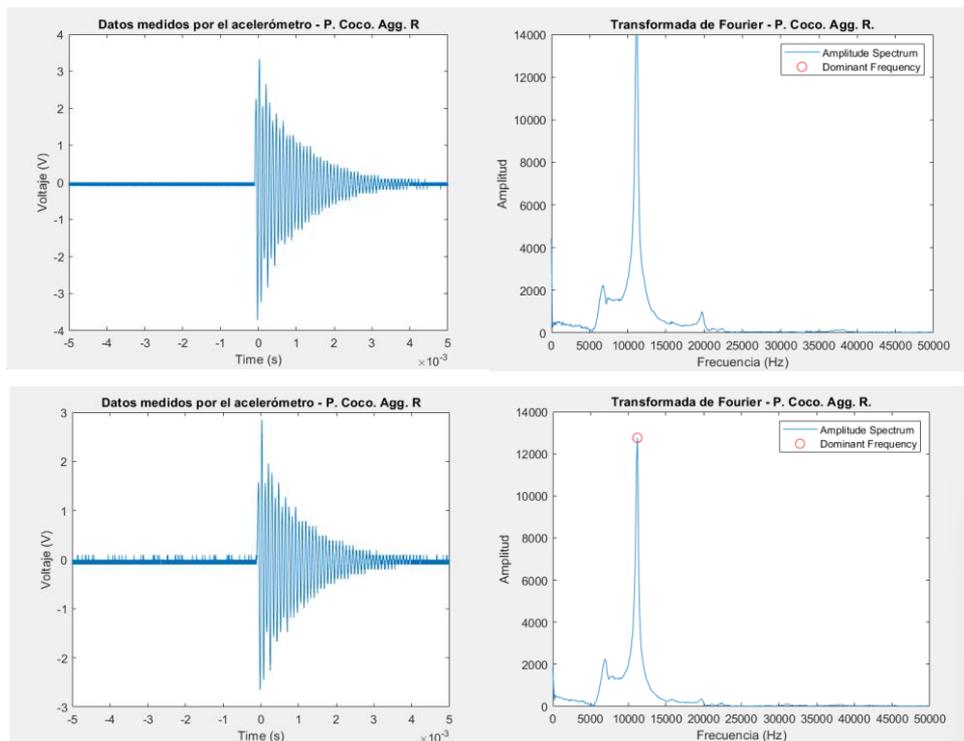


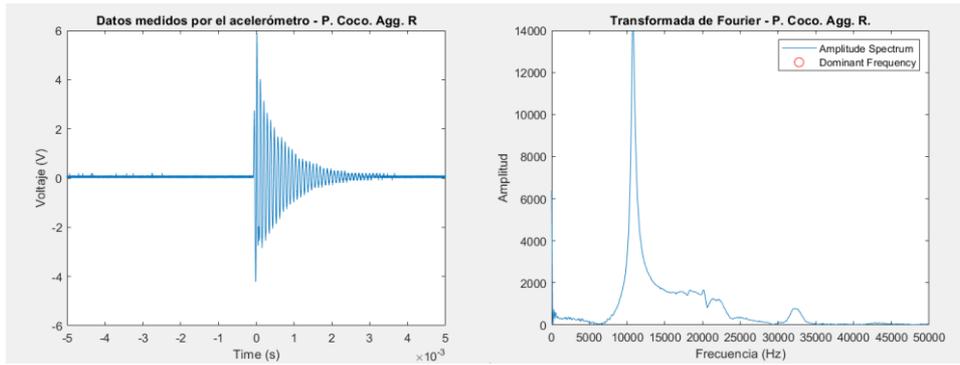
a)

b)

Figura 32. Resultados para probeta de hormigón con agregados reciclados y fibras de abacá. a) Datos dados por el receptor de señal Tiempo(s) vs Voltaje (V). b) Transformada de Fourier Frecuencia (Hz) vs Amplitud.

2.6 Probeta de hormigón con agregados reciclados y fibras de coco.





a)

b)

Figura 33. Resultados para probeta de hormigón con agregados reciclados y fibras de coco. a) Datos dados por el receptor de señal Tiempo(s) vs Voltaje (V). b) Transformada de Fourier Frecuencia (Hz) vs Amplitud.