

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Desarrollo de Hormigón Translúcido

Ronny Ramiro Almeida Vásquez

Ingeniería Civil

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

Quito, 20 de Diciembre de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

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

DESARROLLO DE HORMIGÓN TRANSLÚCIDO

Ronny Ramiro Almeida Vásquez

Nombre del profesor, Título académico

Francisco Játiva, PhD

Quito, 20 de diciembre de 2023

© 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: Ronny Ramiro Almeida Vásquez

Código: 00208197

Cédula de identidad: 0604702191

Lugar y fecha: Quito, 20 de diciembre de 2023

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UNPUBLISHED DOCUMENT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>.

RESUMEN

En la presente investigación, se busca evaluar la resistencia a la compresión y módulo dinámico de mezclas de pasta de cemento con 3%, 4% y 5% de fibra óptica en reemplazo por volumen de pasta de cemento y compararlas a especímenes control (pasta de cemento únicamente). Se utilizó una mezcla homogénea de pasta de cemento con una relación agua/cemento (a/c) igual a 0.42. Se fabricaron moldes impresos en 3D para cada porcentaje de fibra obteniendo un total de 12 cubos con dimensiones de 5cm por lado y moldes cilíndricos con $\varnothing=7.5$ cm y $L=22$ cm. Una vez obtenidos los cilindros se los cortó en discos con $h=3.15$ cm y $\varnothing=7.5$ cm. Un total de 5 discos fueron usados con cada porcentaje de fibra. Resultados de resistencia a la compresión muestran que la misma disminuye con el uso de fibra óptica de plástico en la mezcla, teniendo una reducción de 1/3 (30%), 1/2 (40%) y 1/4 (25%) en muestras con 3%, 4% y 5% de fibra óptica respectivamente a los 90 días de curado. La muestra control presentó una resistencia a la compresión a los 28 días de curado de 53.8 MPa. El ensayo de modulo dinámico muestra que el módulo de elasticidad de los discos cilindros se reduce por la adición de fibra óptica plástica. Además, cuando se utiliza 4% de fibra óptica en reemplazo por volumen se observa una reducción del módulo de elasticidad dinámico menor a 3% y 5%. El módulo de elasticidad dinámico de la muestra control fue 37 GPa mientras que se obtuvo un módulo de elasticidad dinámico de 12.5 GPa, 14.7 GPa y 12.1 GPa usando 3%, 4% y 5% de fibra respectivamente.

Palabras clave: Pasta de Cemento Translúcida, Fibra Óptica Plastica, Resistencia a la Compresión, Modulo Dinámico.

ABSTRACT

In the present paper, we're looking to evaluate the compressive strength and dynamic modulus of cement paste mixtures with 3%, 4%, and 5% of plastic fiber optic per volume of cement paste and compare them to control specimens which have cement and water only. The mixtures have a water/cement ratio (w/c) of 0.42. 3D printed molds were created for each fiber percentage, resulting in a total of 12 cubes with dimensions of 5 cm of length and cylindrical molds with $\varnothing=7.5$ cm y $L=22$ cm. The cylinders obtained were cut into discs with $h=3.15$ cm y $\varnothing=7.5$ cm. A total of 5 discs for each fiber percentage were tested in order to get the dynamic elasticity modulus. The compressive strength decreases with the addition of plastic optical fiber to the mixture, the samples present a reduction of 1/3 (30%), 1/2 (40%), and 1/4 (25%) using 3%, 4%, and 5% respectively compared to the control specimen whose compressive strength is 53.8 MPa. The dynamic modulus test showed that the elasticity modulus of discs reduces with the addition of plastic optical fiber. Additionally, the reduction of the elasticity modulus is lower when 4% of fiber per volume of mixture compared to 3% and 5%. The dynamic modulus of control specimen was 37 GPa while using 3%, 4%, and 5% of optical fiber per volume of mixture were 12.5 GPa, 14.7 GPa y 12.1 GPa respectively.

Keywords: Translucent Concrete, Optic Fiber, Compressive Strength, Dinamic Modulus.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción.....	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Justificación.....	11
1.3 Objetivos.....	12
2.1 Desarrollo del Tema.....	13
2.1 Materiales.....	13
2.2 Metodología.....	13
2.2.1 Diseño y Construcción del Encofrado.....	14
2.2.2 Ensayos de Resistencia a la Compresión.....	16
2.2.3 Ensayos de Módulo de Elasticidad Dinámico.....	16
2.3 Resultados.....	19
2.3.1 Resultados de resistencia a la compresión.....	19
2.3.1 Resultados de Módulo de Elasticidad.....	21
2.4 Análisis de Resultados.....	22
2.4.1 Análisis de la Resistencia a la Compresión.....	22
2.4.2 Análisis del Módulo de Elasticidad Dinámico y Modelos Estáticos.....	25
Conclusiones.....	29
Referencias bibliográficas.....	30

Índice de Tablas

Tabla 1. Resultados de Densidad	19
Tabla 2. Resultados del Módulo de Elasticidad.....	21
Tabla 3. Especificaciones de Resistencia a la Compresión de Mampostería de Concreto	22

Índice de Figuras

Figura 1. Enconfrado utilizado para producir 12 cubos con $L=50$ mm.	14
Figura 2. Diseño del molde cilindrico realizado en Inventor® para (a) fibra óptica perpendicular al eje longitudinal del cilindro, (b) y (c) para fibra óptica paralela al eje longitudinal del cilindro.	15
Figura 3. (a) Encofrado de cilindro impreso con dimensiones 21.9 cm de junto a (b) un rollo de filamento de PLA con diámetro de 1.75 mm	15
Figura 4. (a) acelerómetro ICP® adherido al disco, (b) amplificador de señal y (c) receptor de señal.....	17
Figura 5. Equipos utilizados para la medición del modulo de elasticidad dinámico. De derecha a izq: Disco con bola de acero para impacto, amplificador de senao (azul) y recetor de señal (verde) y decodificador de señal (Laptop).	17
Figura 6. Resultados Voltaje vs. Tiempo.....	18
Figura 7. Resultados Frecuencia de vibración vs. Amplitud	18
Figura 8. Resultados de Resistencia a la Compresión	20
Figura 9. Imagen del Agrietamiento de una Muestra	23
Figura 10. Falla de la Muestra después del Ensayo, nótese el esparcimiento de fisuras longitudinales al eje del cubo en donde existen concentraciones de esfuerzo de deformación sobre las fibras ópticas plásticas.	24
Figura 11. Falla de Muestras Cúbicas con $L=5$ cm	25
Figura 12. Esfuerzo Vs. Deformación de muestras de Fibra Óptica	26
Figura 13. Ensayo de Tracción a una Fibra Óptica.....	26
Figura 14. Diagrama de los límites de Voigt y Reus	27
Figura 15. Diagrama de los límites de Voigt y Reus	28

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La industria de la construcción busca encontrar distintas maneras de construcción sostenible y durable, combinada con estilos arquitectónicos novedosos y modernos. Con ello se ha buscado tener una buena relación entre el diseño arquitectónico, la resistencia de las estructuras y a sus cargas de diseño. Por ello, en una entrevista surge la idea de Bill Price y Robert Dunay en 2001 (Buchelli, 2015) quienes mencionaron *“El hormigón translúcido podría darnos la capacidad para hacer frente a algunos de los atributos del hormigón - fortaleza, estabilidad y moldeo - pero también dar las cualidades que normalmente asociamos con el vidrio, lo que tendría aplicaciones a pequeña y gran escala”*. Con ello, el hormigón translucido se vuelve una innovación que ha tomado mayor importancia en las últimas décadas, difuminándose alrededor del mundo. En el 2005, Italcementi promueve los paneles “I-light como un producto que permite relacionar el hormigón, y sus propiedades estructurales (*i.light SHANGHAI*, s/f). En el 2010, la misma compañía promueve el proyecto “Italian Pavilion” ubicado en la Expo de Shanghai en donde las paredes exteriores fueron construidas usando paneles de cemento transparente con una mezcla compuesta por resinas plásticas, que cubren un área aproximada del 40% de la fachada total del edificio. (Cement, 2010)

El desarrollo de la translucidez en los materiales continuó, llegando a manos de los arquitectos Aron Losonzi y Andreas Bittis, quienes implementaron fibra óptica como parte de los agregados usado para la creación del hormigón translúcido que, gracias a las propiedades de la fibra óptica, permite el paso de la luz. Hoy en día este material se conoce como LiTraCon abreviatura de “Ligth Trasmitting Concrete”. (Bashbash et al., 2017) Por esto, se puede observar que a través de los años el hormigón translúcido ha evolucionado con la incorporación de nuevos agregados y materiales que le brinden su translucidez. Además, Litracon (2023)

construyó en 2013 el “Garden Pavilion” en Suiza, una estructura fabricada con hormigón translúcido que buscaba crear un refugio que a la vez se mezclara con el entorno mediante el paso de la luz. En 2015, la misma compañía construyó una exhibición en Ljósafossstöð, una de las instalaciones hidráulicas más antiguas de Islandia, que consistía en un bloque de hormigón translúcido que se iluminaba cuando se aplicaba fuerza sobre este.

Las aplicaciones arquitectónicas del hormigón translúcido han sido desarrolladas durante bastante tiempo, sin embargo, también se han realizado estudios para medir las propiedades mecánicas del material además de otros parámetros. Por ejemplo, en la ciudad de Beijing, China, Li et al. (2015) realizaron una mezcla de pasta de cemento cuya resistencia a la compresión y flexión disminuía con el aumento del porcentaje de fibra óptica en reemplazo por volumen de material. En otros estudios más recientes realizados en Egipto, Tahwia et al. (2022) realizaron estudios en mezclas de hormigón de alto rendimiento con diferentes porcentajes de micro sílica, polvo de piedra caliza y fibra óptica. Los resultados mostraron un aumento en la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y transmisión de luz cuando se aumenta el porcentaje de fibra en reemplazo por volumen.

Li et al (2022) realizó pruebas de especímenes con diferentes porcentajes de fibra óptica, polvo luminiscente y polvo reflectante. Los resultados mostraron que el aumento de fibra óptica no representaba un aumento considerable en la resistencia a la compresión mientras que el aumento de polvo reflectante y luminiscente aumentó la resistencia a la compresión llegando a un porcentaje óptimo.

1.2 Justificación

Los avances realizados en las aplicaciones del hormigón translúcido muestran su utilidad en el diseño arquitectónico permitiendo integrar al ambiente con la estructura o para hacer resaltar un elemento específico dentro de un espacio. Por otro lado, conocer el cambio

de las propiedades mecánicas de un bloque de hormigón translúcido comparado a uno tradicional puede aumentar la utilidad de este material en otras áreas como los elementos estructurales como vigas, columnas y muros.

Este trabajo de titulación busca presentar un análisis de las características de resistencia a la compresión y módulo dinámico de especímenes de pasta de cemento con cables de fibra óptica plástica usando diferentes porcentajes en reemplazo por volumen de pasta de cemento i.e. 3%, 4% y 5%. Además, su principal propósito es conocer sus usos en elementos estructurales en base a los resultados obtenidos.

1.3 Objetivos

Objetivo Principal

- Desarrollar una mezcla de pasta de cemento translúcida y obtener datos sobre sus propiedades mecánicas. i.e. resistencia a la compresión y módulo de elasticidad dinámico.

Objetivos Específicos

- Evaluar la resistencia a la compresión de mezclas con diferente porcentaje de fibra i.e. 3%, 4% y 5%, y compararlas a una muestra control.
- Evaluar el módulo de elasticidad dinámico de mezclas con diferente porcentaje de fibra i.e. 3%, 4% y 5%, y compararlas a una muestra control.

2.1 DESARROLLO DEL TEMA

2.1 Materiales

Los materiales utilizados son los siguientes:

1. Cemento por desempeño tipo HE

El cemento usado está caracterizado por tener una alta resistencia temprana y permite un desencofrado rápido.

2. Cable de fibra óptica plástica de 1.5 mm de diámetro.

Los cables de fibra óptica plástica están caracterizados por ser fáciles de utilizar, flexibles y resistentes a la manipulación.

2.2 Metodología

Para lograr el paso de la luz en pasta de cemento usando cables de fibra óptica plástica, se utilizó un molde cuadrado el cual permitió obtener cubos destinados a la compresión y un molde cilíndrico de manera que cada espécimen cumpla con el reemplazo de fibra establecido. Se evitó colocar los cables de fibra óptica muy cercanos a las caras de cada espécimen, para evitar asentamiento plástico y proveer de adecuado espesor de recubrimiento a las fibras.

La evaluación de la resistencia a la compresión, f'_{cr} , y módulo de elasticidad dinámico, E_d , son el principal objetivo de este trabajo. Se realizaron un total de 6 mezclas de pasta de cemento con una relación, $a/c= 0.42$. El procedimiento de mezcla se realizó en base a la norma ASTM C305 (2016) . De cada mezcla se obtuvieron un total de 12 cubos con lado de 5 cm para ser ensayados a la compresión los 7, 21, 30, y 90 días de curado utilizando el porcentaje de fibra especificado (3%, 4% y 5%) más 12 especímenes de pasta de cemento (sin fibra) utilizados como mezclas control. Se elaboraron seis cilindros con dimensiones: $h=22\text{cm}$ y $\emptyset = 7.5 \text{ cm}$.

Tres cilindros tienen fibra óptica plástica orientada en paralelo a su altura y los otros tres tienen fibra óptica plástica orientada de manera perpendicular a su altura.

2.2.1 Diseño y Construcción del Encofrado

Los encofrados de los moldes cúbicos fueron realizados de forma que se pueda fundir 12 especímenes con cada porcentaje de fibra. Se fabricaron un total de tres moldes. El diseño fue realizado utilizando AutoCAD. Para la fabricación se usó una cortadora láser. En la fabricación de moldes cuadrados se utilizó planchas de acrílico con 3 cm de espesor para las paredes exteriores y planchas de plastiflex con un espesor de 2 cm para las paredes interiores que separan cada uno de los cubos como se muestra en la Figura 1.

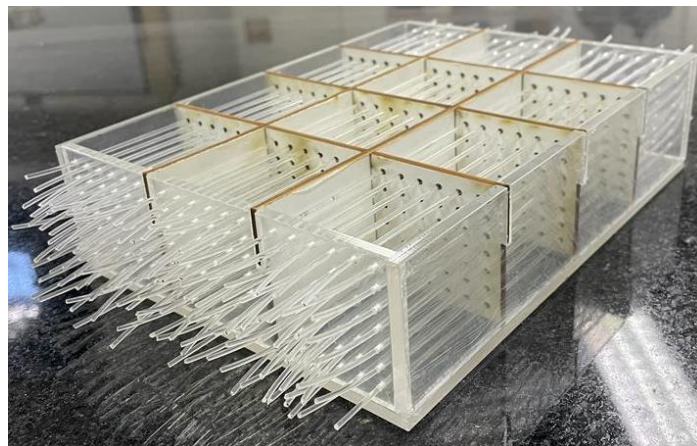


Figura 1. Encofrado utilizado para producir 12 cubos con $L=50$ mm.

Los moldes cilíndricos fueron fabricados utilizando una impresora tipo Ender 3 V2 de la marca Creality®. El diseño de los encofrados fue realizado usando el programa Inventor®. Los moldes se muestran en la Figura 2.

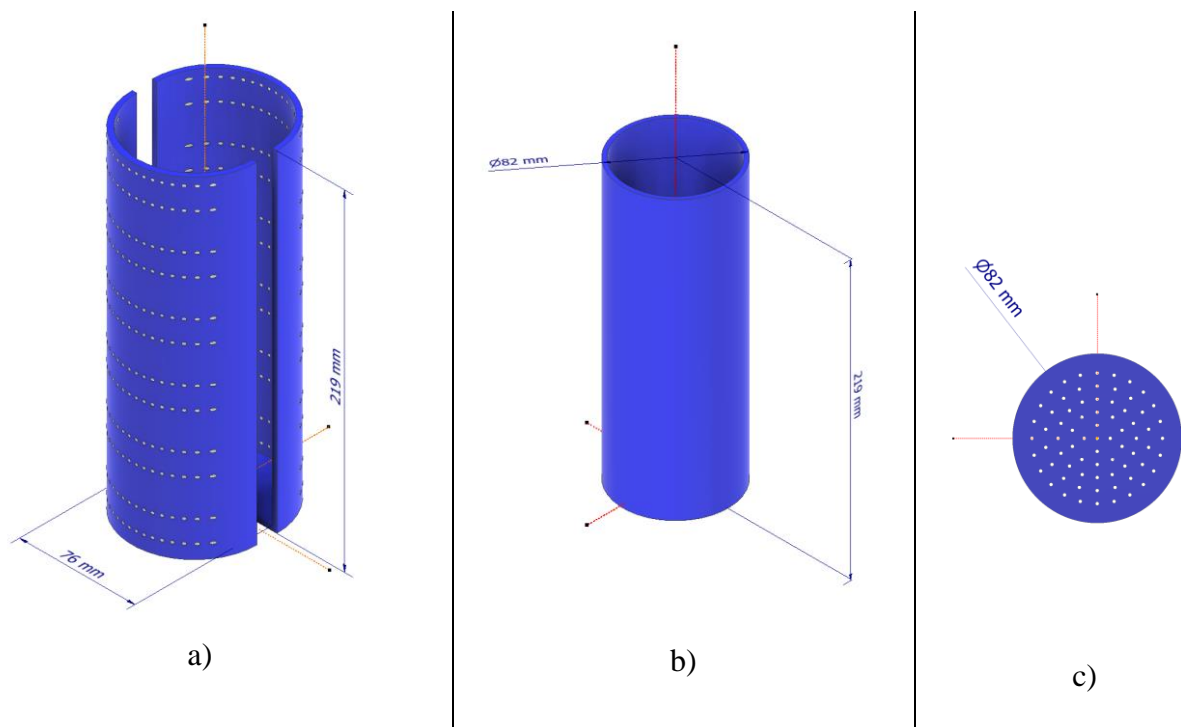


Figura 2. Diseño del molde cilíndrico realizado en Inventor® para (a) fibra óptica perpendicular al eje longitudinal del cilindro, (b) y (c) para fibra óptica paralela al eje longitudinal del cilindro.

El material usado para la impresión fue filamento ácido poliláctico (PLA) debido a que es el material más usado para las impresiones en tres dimensiones además de que provee la resistencia necesaria para que no colapse por el peso de pasta de cemento fresca.



Figura 3. (a) Encofrado de cilindro impreso con dimensiones 21.9 cm de junto a (b) un rollo de filamento de PLA con diámetro de 1.75 mm

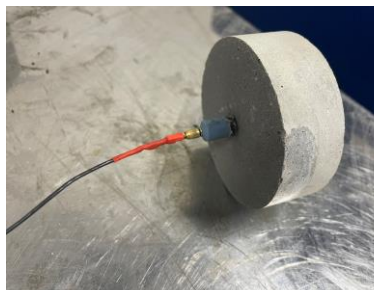
2.2.2 *Ensayos de Resistencia a la Compresión*

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron cumpliendo con la norma ASTM C109/C109M. Se probaron en grupos de 3 cubos la resistencia por cada porcentaje de fibra a los 7, 21, 28 y 90 días de curado. Previo a los ensayos se obtuvo la densidad de las muestras como parámetro necesario para el cálculo de módulo de elasticidad dinámico, E_d .

2.2.3 *Ensayos de Módulo de Elasticidad Dinámico*

Los ensayos de módulo de elasticidad dinámico se realizaron usando 6 discos con dimensiones: $h = 3.15 \text{ cm}$ y $\phi = 7.5 \text{ cm}$ con cada porcentaje de fibra óptica en reemplazo de su volumen.

El módulo de elasticidad dinámico de los cilindros con 3%, 4%, y 5% de fibra óptica plástica en reemplazo de volumen fue realizado utilizando un acelerómetro ICP® con frecuencia de resonancia de 20 kHz, amplificador de señal y receptor de señal (Osciloscopio). La prueba comienza al adherir el acelerómetro en el centro del disco de pasta de cemento translúcida y conectado al amplificador de señal y posteriormente al receptor de señal para su análisis. Una pequeña masa (bola de acero de diámetro 2.25 cm es utilizada como impacto para generar vibración en el disco hasta llegar a su frecuencia de resonancia (máximo desplazamiento).



a)



b)



c)

Figura 4. (a) acelerómetro ICP® adherido al disco, (b) amplificador de señal y (c) receptor de señal



Figura 5. Equipos utilizados para la medición del módulo de elasticidad dinámico. De derecha a izq: Disco con bola de acero para impacto, amplificador de senao (azul) y recetor de señal (verde) y decodificador de señal (Laptop).

Una vez obtenidos los datos de voltaje Vs. Tiempo se utilizo la transformada de Fourier discreta en un programa realizado en Matlab, la cual permite transformar la señal recibida por el acelerómetro (Voltaje Vs. Tiempo) para obtener datos de Amplitud Vs. Frecuencia de resonancia. Como se muestra en la Figura 6 y Figura 7.

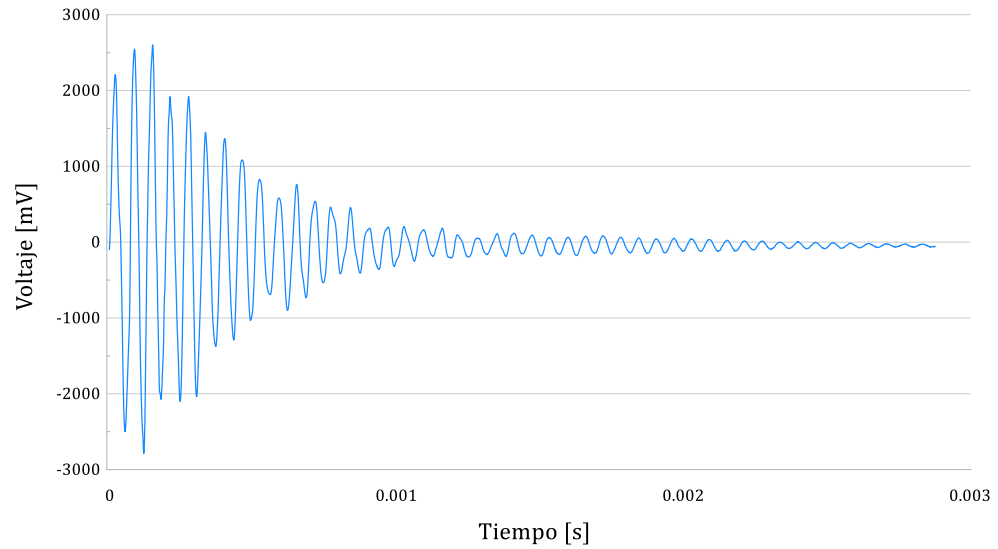


Figura 6. Resultados Voltaje vs. Tiempo

Los datos de Amplitud Vs. Frecuencia nos permite encontrar la frecuencia en la que se produce el máximo desplazamiento del disco considerada como la frecuencia de resonancia del sistema, f .

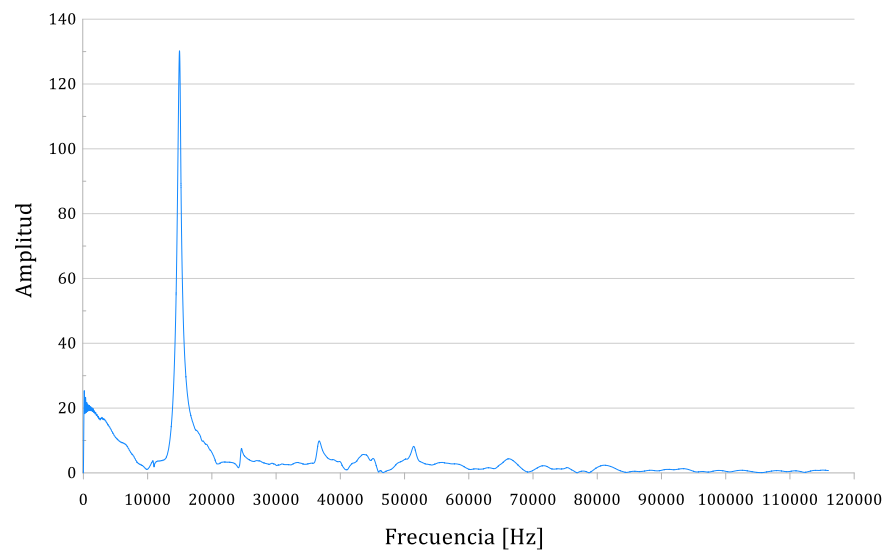


Figura 7. Resultados Frecuencia de vibración vs. Amplitud

El módulo de elasticidad es calculado en base a la ecuación (2) . Los datos utilizados son: Modulo de Poisson (ν) =0.24, densidad promedio medida (ρ), diámetro promedio medido (d), frecuencia de resonancia (f) y un parámetro de corrección (Ω_0) = 2.15 que depende de la relación entre dimensiones del disco h , \emptyset y el Módulo de Poisson. El parámetro Ω_0 se obtiene mediante la resolución de las ecuaciones que describen la vibración flexural axisimétrica de un disco (Michael L. Leming, 1998) se asume que el esfuerzo axial en la dirección vertical del disco es cero y que el esfuerzo radial y tangencial es una función lineal al componente vertical (Hutchinson, 1979). Se puede calcular el valor del módulo de elasticidad dinámico usando la siguiente fórmula. El valor de modulo de Poisson de 0.24 fue considerado al ser el valor de mayor preponderancia en mezclas de pasta de cemento. (Constantinides & Ulm, 2004)

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

2.3 Resultados

2.3.1 Resultados de resistencia a la compresión

La densidad promedio de las muestras cúbicas con cada porcentaje se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de Densidad

Calculo de promedio de densidad	
Porcentaje de fibra	Densidad (kg/m³)
0%	1956
3%	1908
4%	1905
5%	1873

La densidad de las muestras cúbicas con 3%, 4% y 5% de fibra en reemplazo por volumen presentan una reducción en 2.4%, 2.6% y 4.2% respectivamente.

En la Figura 8, se muestran los resultados de resistencia a la compresión de las muestras de pasta de cemento con diferentes porcentajes de fibra i.e 3%, 4% y 5% en reemplazo por volumen y las muestras control (pasta de cemento solamente). En los primeros siete días de curado, la muestra control tuvo una resistencia a la compresión promedio de 39.5 MPa, la resistencia a compresión promedio de los cubos con 3% de fibra es aproximadamente un tercio (33%) menor al promedio de muestras control mientras que el promedio de la resistencia de los cubos con 4% de fibra es aproximadamente 1/5 (22%) menor al promedio de muestras control y los cubos de 5% presentan una resistencia aproximadamente 1/2 (50%) menor al promedio control. A los 21 y 28 días de curado se obtuvo una resistencia a la compresión de 52.6 MPa y 53.8 MPa respectivamente en las muestras control. En los cubos de 3%, 4% y 5% de fibra se obtuvo una reducción en la resistencia promedio de 1/3 (30%) a los 28 días y una reducción en la resistencia a la compresión de 1/3 (30%), 1/2 (40%) y 1/4 (25%) en 3%, 4% y 5% de fibra respectivamente a los 28 días. A los 90 días de curado se obtuvo una resistencia a la compresión de 72.4 MPa, se obtuvo una reducción de la resistencia promedio de 1/2 (45%), 1/2 (47%) y para los cubos de 3% y 4% respectivamente.

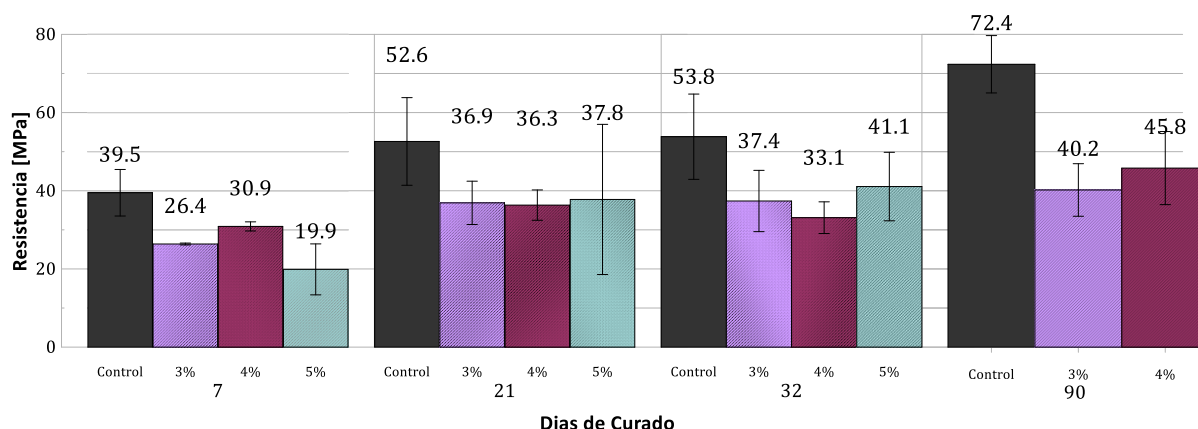


Figura 8. Resultados de Resistencia a la Compresión

En los resultados, se observa que la resistencia a la compresión se reduce considerablemente cuando se usa fibra óptica plástica en la mezcla. Por otro lado, el aumento en el porcentaje de fibra óptica plástica en reemplazo por volumen muestra una desviación estándar considerablemente mas grande siendo esta 3 veces mayor en los cubos de 5% de fibra comparados con los de 3%.

2.3.1 Resultados de Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad dinámico de discos realizados usando pasta de cemento con diferentes porcentajes de fibra en reemplazo de volumen fue calculado usando la ecuación (2) El valor promedio del módulo de elasticidad de las muestras con fibra óptica y las muestras control se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del Módulo de Elasticidad

Módulo de Elasticidad Dinámico		
Porcentaje de Fibra	Prom de E [Gpa]	σ
Control	37.0	0.01
3%	12.5	1.25
4%	14.7	1.50
5%	12.1	0.37

Se puede observar que el módulo de elasticidad dinámico tiene una disminución que varía con el porcentaje de fibra usado siendo el caso de una reducción del 65%, 60% y 67% en los discos con 3%, 4% y 5% de fibra respectivamente. Además, los discos cuentan con una desviación estándar promedio de 7.7%.

Para posteriormente realizar un análisis de los módulos de elasticidad dinámico de las muestra con fibra óptica, se utilizó el análisis de módulo de elasticidad encontrado por Haecker et al. (2005) quien obtuvo los resultados del módulo de elasticidad de muestras de pasta de cemento con diferentes relaciones a/c. Se utilizó como referencia la muestra cuyas propiedades químicas

son mas cercanas a las utilizadas en este estudio y, para una muestra con una relación a/c 0.42, el módulo de elasticidad es 22 GPa.

2.4 Análisis de Resultados

2.4.1 Análisis de la Resistencia a la Compresión

La densidad de las muestras baja a medida que se va aumentando el porcentaje de fibra óptica en reemplazo del volumen. La diferencia entre la densidad de la fibra óptica y la densidad pasta de cemento generó una reducción en el peso de las muestras con fibra óptica y, consecuentemente, una reducción en la densidad de la muestra.

Los resultados de resistencia a la compresión muestran que, a pesar de tener una disminución considerable al agregar fibra óptica, estos elementos bajo la relación a/c utilizada y parámetros de mezcla descrito podrían ser utilizados en elementos no estructurales y estructurales usando como referencia la norma ACI 530 (2013). Donde se especifica la resistencia a la compresión de la mampostería de concreto. Tomando en cuenta que la resistencia obtenida a los 28 días de las muestras cúbicas con fibra óptica es 33.1 MPa, la pasta de cemento translúcida si se podría usar en la elaboración de mampostería.

Tabla 3. Especificaciones de Resistencia a la Compresión de Mampostería de Concreto

Resistencia a la compresión del área neta de la mampostería de concreto, psi (MPa)	Resistencia a la compresión del área neta de las unidades de mampostería de concreto, psi (MPa)			
	Mortero tipo M o S		Mortero tipo N	
1700 (11.72)	—		1900 (13.10)	
1900 (13.10)	1900 (13.10)		2350 (14.82)	
2000 (13.79)	2000 (13.79)		2650 (18.27)	
2250 (15.51)	2600 (17.93)		3400 (23.44)	
2500 (17.24)	3250 (22.41)		4350 (28.96)	
2750 (18.96)	3900 (26.89)		—	
3000 (20.69)	4500 (31.03)		—	

*Para unidades de menos de 4 pulgadas (102 mm) de altura nominal, use 85% de los valores listados.

Fuente: Reproducido con permiso del American Concrete Institute.

El aumento en la desviación estándar de los resultados de resistencia a la compresión significa que, al momento de realizar mezclas de pasta de cemento translúcidas con un mayor porcentaje de fibra, los resultados de resistencia a la compresión no van a ser consistentes.

Cuando existen diferentes materiales en una mezcla de pasta de cemento u hormigón, como menciona Shah et al. (2021) la adición de aire aumenta la trabajabilidad de una mezcla pero reduce la resistencia debido a una concentración de tensiones en la superficie de las burbujas producto del aire. En el caso de los cubos con fibra óptica, se puede considerar que existe la misma concentración de esfuerzos entre la pasta de cemento y la fibra óptica, que, a diferencia del aire que genera un vacío completo, reducirá la resistencia en menor medida ya que la fibra óptica aportará con una parte de resistencia a la compresión.

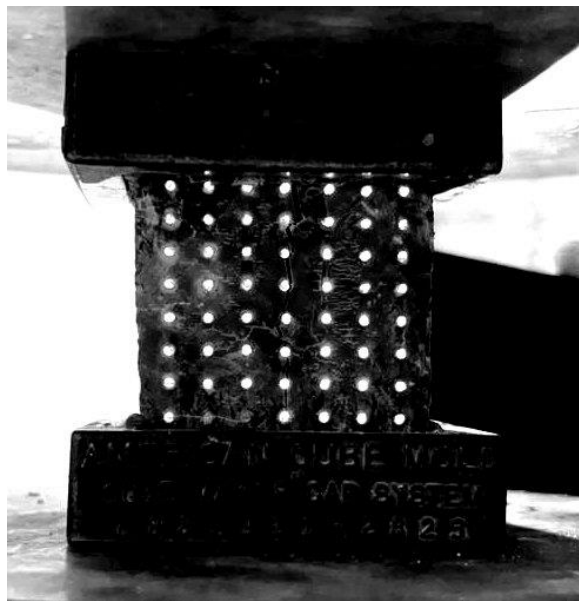


Figura 9. Imagen del Agrietamiento de una Muestra

En los ensayos de resistencia a la compresión se puede identificar la presencia de grietas que se van formando a lo largo de la altura de los cubos de ensayo cuyo recorrido pasa entre los cables de fibra óptica y la pasta de cemento. Esta observación indica que ocurren concentración de esfuerzos locales de deformación los que permiten una conexión más rápida entre grietas

ocasionando una reducción del esfuerzo último. En la Figura 9, se muestra el agrietamiento de un cubo previo a su completa rotura.

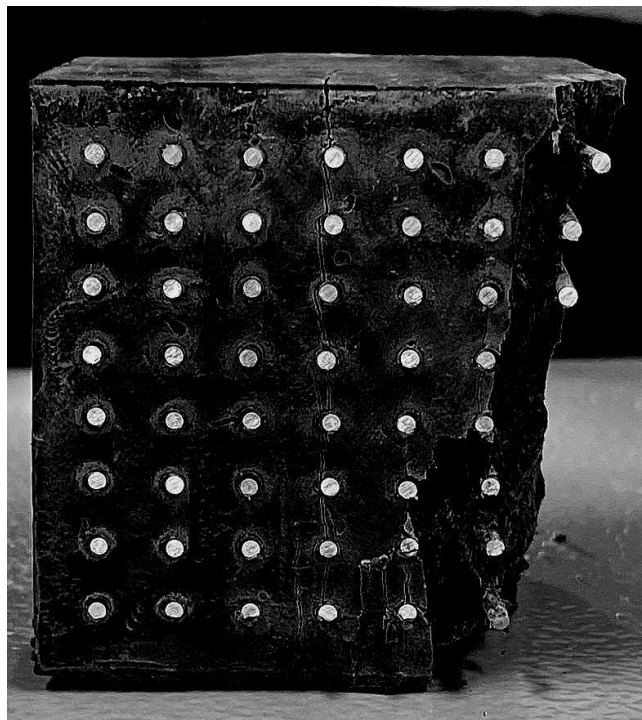


Figura 10. Falla de la Muestra después del Ensayo, nótese el esparcimiento de fisuras longitudinales al eje del cubo en donde existen concentraciones de esfuerzo de deformación sobre las fibras ópticas plásticas.

El agrietamiento en las muestras empezó desde el centro y se aumento de manera vertical hasta llegar a una falla que recorre la altura del cubo. La falla que se muestra en la Figura 11, ocurre debido al arreglo utilizado de la fibra óptica siendo la distancia de espaciamiento entre fibra y fibra de 0.49 cm en sentido vertical y 0.62 cm en sentido horizontal en 3%, 0.4 cm en sentido vertical y 0.49 cm en sentido horizontal en 4% y 0.33 cm en sentido vertical y 0.4 cm en sentido horizontal para 5%. Este tipo de falla ocurre debido a que la distancia de espaciamiento entre fibras en el sentido vertical es menor y sigue este patrón por la concentración de esfuerzos que se mencionó anteriormente.

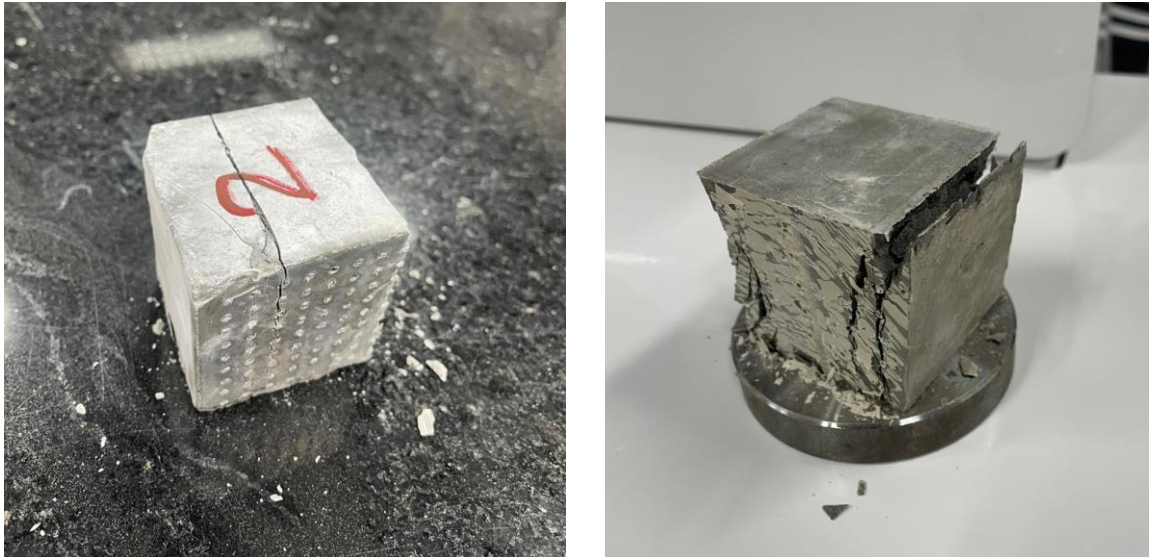


Figura 11. Falla de Muestras Cúbicas con $L=5\text{cm}$

2.4.2 Análisis del Módulo de Elasticidad Dinámico y Modelos Estáticos

La pasta de cemento y la fibra óptica plástica son dos compuestos con características mecánicas diferentes. En donde, el módulo de elasticidad de la pasta diferirá del de la fibra. En este estudio se consideran dos modelos para asociar la variación del módulo de elasticidad (estático) en base a la variación del porcentaje de fibra presente en una matriz. Se analizaron los modelos de Voigt el cual asume deformaciones iguales y el modelo de Reuss el cual asume esfuerzos iguales. No se considero en los modelos la variación ocasionada por el módulo de Poisson ni por variaciones ocasionadas con deformaciones diferentes o esfuerzos diferentes. Para utilizar los modelos de Voigt y Reuss se realizó un ensayo para determinar el módulo de elasticidad (estático) de la pasta de cemento usando cuatro cilindros con dimensiones $h=20\text{ cm}$ y $\varnothing = 10\text{ cm}$ y un ensayo de tracción usando fibras ópticas de plástico para determinar su módulo de elasticidad mediante la pendiente de la zona elástica de la curva Esfuerzo Vs. Deformación. Los valores del módulo de elasticidad de la pasta de cemento y la fibra óptica encontrados fueron 22 GPa y 2.10 GPa respectivamente.

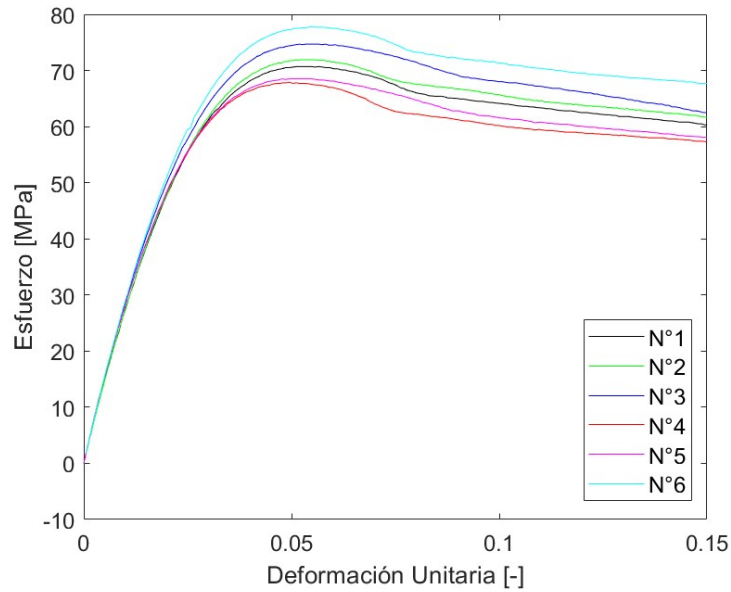


Figura 12. Esfuerzo Vs. Deformación de muestras de Fibra Óptica



Figura 13. Ensayo de Tracción a una Fibra Óptica

Estos modelos nos ayudan a asociar el incremento o disminución del módulo estático total del material y correlacionarlo con los resultados de módulos dinámico obtenidos. La Figura 14 muestra los resultados obtenidos del módulo de elasticidad de cilindros con 3%, 4% y 5% de

fibra óptica de plástico en reemplazo del volumen y límites del módulo de elasticidad usando los modelos de Voigt y Reuss. De esta forma, se puede observar que el rango de valores encontrados se encuentra fuera del rango especificado y, esto podría ocurrir al número de suposiciones realizadas en el presente análisis. Por otro lado, estos resultados permiten comprobar el cambio del módulo de elasticidad de un elemento compuesto de dos materiales usando los modelos mencionados anteriormente.

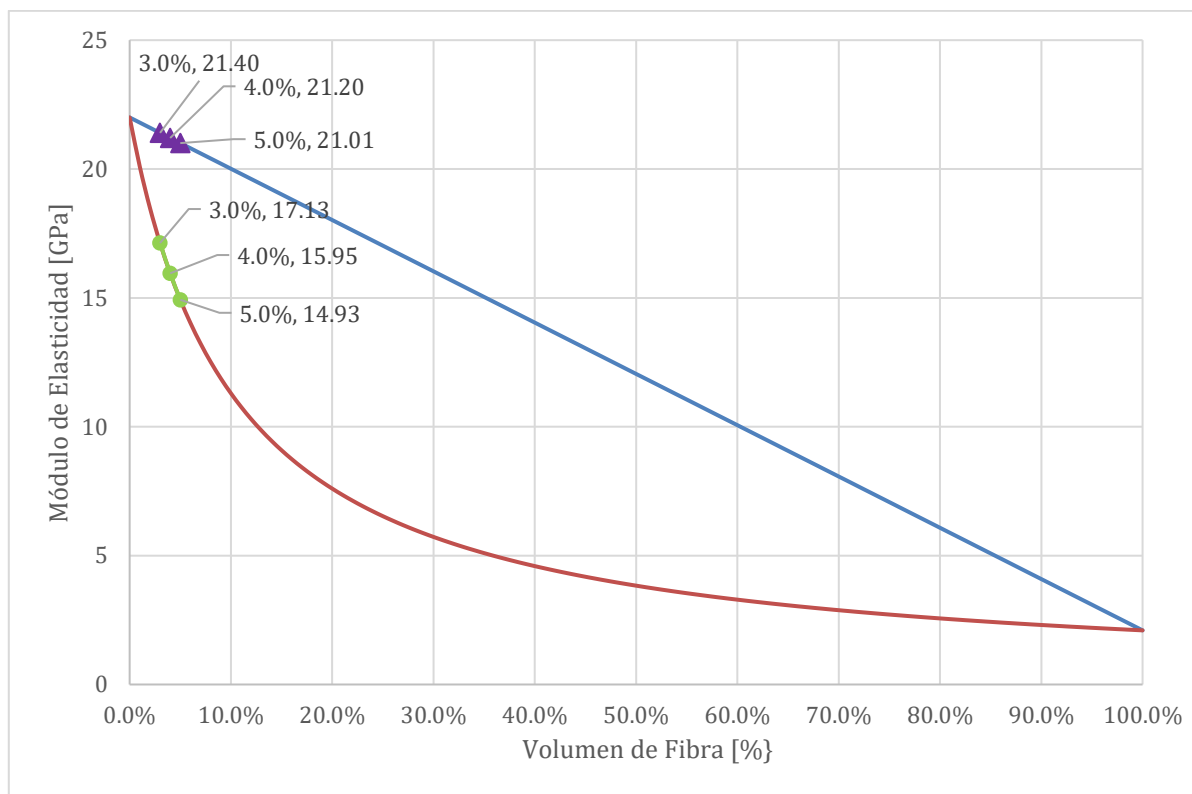


Figura 14. Diagrama de los límites de Voigt y Reus

Además de los modelos de Voigt y Reuss, se tomó en consideración la no linealidad que tiene los materiales fabricados con pasta de cemento como menciona Rashetnia (2016), y se revisó la forma de los picos de frecuencia máxima y el lugar donde se encuentran. Los defectos en las muestras (como el agrietamiento) reducen la frecuencia de vibración máxima, por lo que, si se considera la ecuación (2) va a afectar directamente al módulo de elasticidad dinámico. Esta revisión nos permitió verificar que no existe ningún daño en las muestra analizadas que puedan

afectar negativamente al módulo de elasticidad ya que los picos tiene una forma adecuada y no presentan arqueamientos como se muestra en la Figura 14.

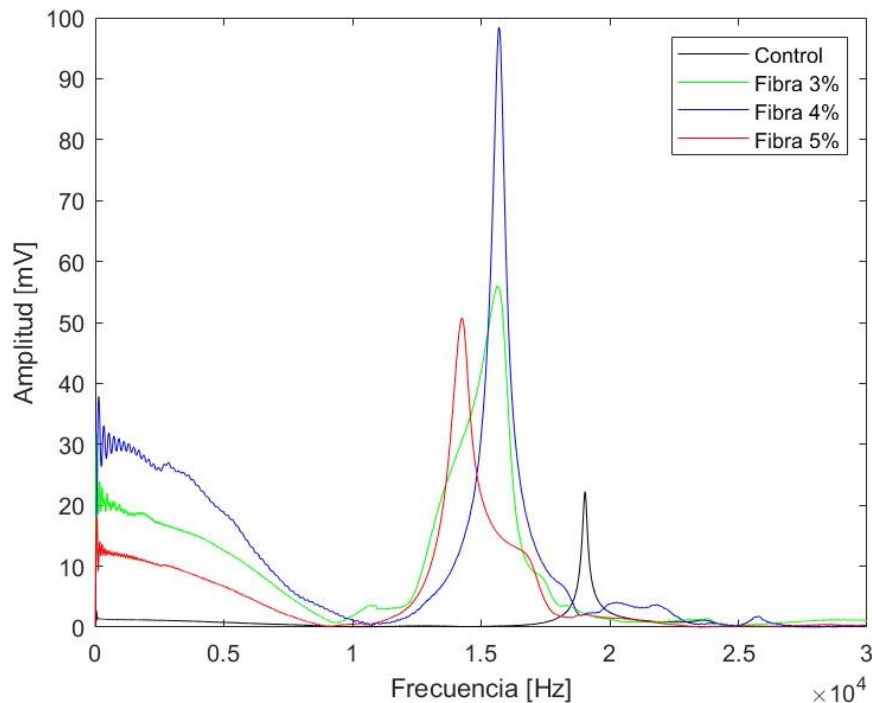


Figura 15. Diagrama de los límites de Voigt y Reus

El módulo de elasticidad muestra una reducción cuando se agrega fibra óptica en reemplazo de volumen pero esta disminución es menor cuando se utiliza un valor de 4%. Esto puede significar que existe un porcentaje de fibra óptimo que puede evitar una reducción tan drástica del módulo de elasticidad. Sin embargo, todos los datos recolectados no son suficientes para afirmar que el valor óptimo de 4% de fibra en reemplazo del volumen pero si nos permite observar que este valor se encuentra dentro del rango entre 3% y 5%. Próximamente, se espera realizar mas ensayos de módulo de elasticidad dinámico para acercarse al valor óptimo de fibra óptica para el módulo de elasticidad dinámico

CONCLUSIONES

- Se logró realizar mezclas de pastas de cemento translúcido usando diferentes porcentajes de fibra óptica i.e 3%, 4% y 5% en reemplazo del volumen.
- Se logró realizar enconfrados cúbicos y cilíndricos para ser usados en mezclas de pastas de cemento con fibra óptica y la fabricación de cubos y cilindros.
- La resistencia a la compresión de muestras de pasta de cemento se reduce con la adición de fibra óptica. Además, el aumento del porcentaje de fibra en reemplazo del volumen depasta de cemento muestra un aumento en la desviación estándar (mayor comportamiento no lineal).
- El módulo de elasticidad de muestras de pastas de cemento curadas durante 28 días se reduce en de 1/3 (30%), 1/2 (40%) y 1/4 (25%) en muestras con 3%, 4% y 5% de fibra óptica respectivamente.
- Se encontró que puede existir un valor óptimo de fibra óptica que maximiza el módulo de elasticidad sin perder significativamente su magnitud.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 530. (2013). *Especificación para Estructuras de Mampostería*. American Concrete Institute.
- ASTM C109/C109M. (2016). *Método Normalizado de Ensayo de Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico*. ASTM Internacional. <https://www.astm.org/>
- ASTM C305-06. (2016). *Práctica estándar para la La mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica*. ASTM Internacional. <https://www.astm.org/>
- ASTM C469. (2016). *Método Estándar de Ensayo para Módulo de elasticidad estático y relación de poisson del concreto en compresión*. ASTM Internacional. <https://www.astm.org/>
- Bashbash, B. F., Roaa M Hajrus, Doaa F Wafi, & Alqedra, M. A. (2017). *Basics of Light Transmitting Concrete*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30481.33121>
- Buchelli, A. L. (2015). *HORMIGON TRANSLUCIDO*.
- Cement, H. (2010). Transparent Cement for the Italian Pavilion at Expo 2010 in Shanghai, in. *Halyps Building Materials SA, Greece*.
- Constantinides, G., & Ulm, F.-J. (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.
- Haecker, C.-J., Garboczi, E. J., Bullard, J. W., Bohn, R. B., Sun, Z., Shah, S. P., & Voigt, T. (2005). Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1948–1960. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.05.001>

- Hutchinson, J. R. (1979). Axisymmetric Flexural Vibrations of a Thick Free Circular Plate. *Journal of Applied Mechanics*, 46(1), 139–144. <https://doi.org/10.1115/1.3424485>
- I.light SHANGHAI*. (s/f). Heidelberg Materials. Recuperado el 5 de diciembre de 2023, de <https://www.cementosrezola.es/es/ilight-shanghai>
- Li, Y., Li, J., Wan, Y., & Xu, Z. (2015). Experimental study of light transmitting cement-based material (LTCM). *Construction and Building Materials*, 96, 319–325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.055>
- Litracon. (2023). *References*. <http://www.litracon.hu/en/references/31>
- Michael L. Leming, J. M. N., and J. Fukuda. (1998). Non-Destructive Determination of the Dynamic Modulus of Concrete Disks. *ACI Materials Journal*, 95(1). <https://doi.org/10.14359/353>
- Rashetnia, R., Ghasemzadeh, F., & Pour-Ghaz, M. (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), 287–298. <https://doi.org/10.3151/jact.14.287>
- Shah, H. A., Yuan, Q., & Zuo, S. (2021). Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete-a review. *Construction and Building Materials*, 274, 121835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121835>
- Tahwia, A. M., Abdelaziz, N., Samy, M., & Amin, M. (2022). Mechanical and light transmittance properties of high-performance translucent concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01260>