

**Evaluación de Prototipo de Concreto a Partir del Aprovechamiento de
Fibra de Vidrio Residual Proveniente de la Industria de Carrocerías**

Nathalia Ramírez Rodríguez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera ambiental

Director:

David Orjuela Yepes

Máster en Ciencias Ambientales

Codirector:

Juan Miguel Sánchez Durán

Magister en Ingeniería Civil

Universidad Santo Tomás

Facultad de ingeniería ambiental

Bogotá, Colombia

2021

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá (14-09-2021)

DEDICATORIA

Quiero dedicar y agradecer en primera instancia a mis padres por darme la oportunidad de cumplir una de mis metas más importantes en la vida y por toda su comprensión y apoyo en el proceso, que a pesar de ser largo me hace sentir orgullosa y espero poderles transmitir lo mismo.

También quiero agradecer a los docentes presentes en este proyecto junto al laboratorista, por sus invaluable conocimientos y paciencia que hicieron posibles hoy este logro.

Finalmente, el apoyo de la empresa ARGOS en la donación de material para el proyecto y el acompañamiento dado por Dario Beltran del área de innovación de esta gran empresa.

Tabla de contenido

Resumen	7
Abstract	8
Introducción.....	10
Objetivos.....	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
Antecedentes.....	14
Marco teórico	16
El concreto y las fibras en el concreto.....	16
Tipos de fibras y su función.....	17
Manejabilidad	18
Curado	18
Diseño de mezcla	19
Variables de estimación	19
Resistencia a la compresión	19
Resistencia a la flexión.	20
Tensión indirecta.....	21
Modulo elástico.....	21
Mercados verdes	21
Certificaciones ambientales	23

PROTOTIPO DE APROVECHAMIENTO DE FIBRA DE VIDRIO RESIDUAL

5

Ecoetiqueta	¡Error! Marcador no definido.
Sello Ambiental Colombiano.....	23
Simbiosis industrial	¡Error! Marcador no definido.
Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	23
Procedimiento	24
Materiales de la mezcla	24
Diseño de mezcla	26
Fundición de especímenes.....	30
Análisis y discusión de resultados	31
Resistencia a compresión.....	31
Resistencia a la flexión (Modulo de rotura)	36
Tensión indirecta	40
Módulo de elasticidad.....	43
Análisis de características del concreto reforzado con fibra de vidrio tipo E reciclada.....	44
Ventajas del uso de fibra de vidrio reciclada en el concreto	45
Desventajas del uso de fibra de vidrio reciclada en el concreto	46
Potencial del concreto reforzado con fibra de vidrio residual en los mercados verdes	47
Impacto social y humanístico.....	51
Conclusiones.....	52
Recomendaciones.....	54
Referencias	55
ANEXOS.....	61

Lista de figuras

Figura 1 Tipo de fracturas en ensayo de compresión	20
Figura 2 Productos Relacionados a los Negocios Verdes Priorizados por el MADS ...	22
Figura 3 Fibra de vidrio en estado residual	25
Figura 4 Corte y estado final de fibra de vidrio reciclada	26
Figura 5 Clasificación del concreto según su consistencia NTC 396	28
Figura 6 Medición de fluidez con cono de Abrams	29
Figura 7 Corrección de diseño de mezcla para concreto de 4000 psi	29
Figura 8 Curado de especímenes	30
Figura 9 Cilindro en máquina de compresión	32
Figura 10 Evolución de resistencia a la compresión.....	32
Figura 11 Fallos en cilindros ensayados a compresión.....	34
Figura 12 Tipo de falla de cilindros	35
Figura 13 Ensayo de resistencia a la flexión	37
Figura 14 Evolución de resistencia a la flexión de viguetas.....	37
Figura 15 Fallas en viguetas ensayadas a flexión	39
Figura 16 Aspecto de los especímenes realizados	40
Figura 17 Laboratorio Concrelab.....	41
Figura 18 Evolución de la tensión indirecta en cilindros	42
Figura 19 Ensayo de elasticidad	43
Figura 20 Modulo de elasticidad en cilindros.....	44
Figura 21 Criterios de negocios en los Mercados Verdes	49
Figura 22 Objetivos de desarrollo sostenible alineados con el proyecto	50

Resumen

El presente proyecto se desarrolla en torno de algunas de las problemáticas más relevantes en la industria automotriz en cuanto a uno de sus materiales base de fabricación, la fibra de vidrio. Dicho material ha venido presentando un consumo más elevado paralelo a la generación de residuos provenientes de su uso, derivando en repercusiones ambientales y de salubridad ocasionadas por el residuo. Por otra parte, otro de los problemas que se pretende solucionar se enfoca en la fisuración del concreto que además de ser una condición indeseable en el material, expone sus límites de resistencia, por esta razón, los ensayos que evalúan las fuerzas a tracción a las que pueden estar sometidos los concretos, han sido implementados como un parámetro de calidad y valor en la industria.

Lo anterior da sentido a la generación de un nuevo material de construcción a base de fibra de vidrio tipo E residual proveniente del proceso productivo de las industrias carroceras, concretamente un concreto de 4000psi reforzado con fibras de vidrio recicladas. De esta manera, se otorga un valor agregado a uno de los residuos de tipo inerte generados, mientras su adición en el concreto provee al material de propiedades más resistentes a la fisuración.

Tras la investigación bibliográfica que enmarca las limitaciones presentadas en proyectos que emplean fibra de vidrio tipo E, así como la serie de problemas derivados por la fisuración del concreto; se establecieron las principales directrices para determinar la calidad del prototipo propuesto con el objeto de obtener una respuesta físico mecánica óptima.

En el proyecto se estimaron las propiedades de control más relevantes y de posible medición para efectuar la comparación de tres tipos de concretos; concreto convencional, concreto reforzado con fibra de vidrio comercial tipo AR y concreto reforzado con fibra de vidrio reciclada tipo E; los cuales, tras realizar el diseño de mezcla, fueron sometidos a los ensayos correspondientes para la determinación de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tensión indirecta y módulo de elasticidad; dichos ensayos se realizaron sometiendo a los prototipos a las diferentes fuerzas a las que se ven sometidos los concretos durante su vida útil y fueron fallados en distintas edades con el fin de estimar su comportamiento a lo largo del tiempo.

En base a los resultados se logró determinar que el prototipo diseñado es un concreto flexo resistente que supera las estimaciones dadas en función de su desempeño respecto a los especímenes correspondientes al concreto convencional y al concreto reforzado con fibras de vidrio comerciales, destacando principalmente en su rendimiento a la tensión indirecta.

Después de las estimaciones consecuentes a la comparación de resultados para los especímenes, se establecieron las principales ventajas y desventajas que presentó el concreto reforzado con fibra residual, así como los retos generales que debe afrontar el nuevo material para incursionar competitivamente en el mercado verde donde podría tener oportunidades futuras.

Palabras clave: Concreto reforzado con fibras, industria carrocera, fibra de vidrio residual tipo E, tensión indirecta, mercado verde.

Abstract

The present project is developed around some of the most relevant problems in the automotive industry regarding one of its base manufacturing materials, fiberglass. This material has been presenting a higher consumption parallel to the generation of waste from its use, resulting in environmental and health

repercussions caused by the waste. On the other hand, another of the problems that the project intends to solve is focused on concrete cracking, which besides being an undesirable condition in the material, exposes its resistance limits, for this reason, the tests that evaluate the tensile forces to which concrete can be subjected have been implemented as a quality and value parameter in the industry.

This gives sense to the generation of a new construction material based on residual E-glass fiber from the production process of the auto body industries, specifically a 4000psi concrete reinforced with recycled glass fibers. In this way, an added value is given to one of the inert wastes generated, while its addition to the concrete provides the material with more crack-resistant properties.

After the bibliographic research that frames the limitations presented in projects that use fiberglass type E, as well as the series of problems derived from concrete cracking, the main guidelines were established to determine the quality of the proposed prototype in order to obtain an optimal physical-mechanical response.

The project estimated the most relevant and measurable control properties for the comparison of three types of concrete; conventional concrete, commercial glass fiber reinforced concrete type AR and recycled glass fiber reinforced concrete type E; which, after performing the mix design, were subjected to the corresponding tests for the determination of compressive strength, flexural strength, indirect tensile strength and modulus of elasticity; these tests were performed by subjecting the prototypes to the different forces to which the concretes are subjected during their useful life and were failed at different ages in order to estimate their behavior over time.

Based on the results, it was determined that the designed prototype is a flexural resistant concrete that exceeds the estimates given in terms of its performance with respect to the specimens corresponding to conventional concrete and commercial glass fiber reinforced concrete, standing out mainly in its performance in indirect tension.

After the estimates consequent to the comparison of results for the specimens, the main advantages and disadvantages presented by the residual fiber reinforced concrete were established, as well as the general challenges that the new material must face in order to competitively enter the green market where it could have future opportunities.

Keywords: Fiber-reinforced concrete, car body industry, residual fiberglass type E, indirect tension, green market.

Introducción

La disposición de residuos industriales es uno de los focos en materia ambiental más relevantes en base a su impacto global en la calidad de vida y bienestar de las especies, razón por la cual la investigación en este campo es una constante optimizable con avances extrapolables al mejoramiento total del ciclo de vida de los productos. Sin embargo, el estudio de la composición de los residuos es una dinámica extensa muchas veces limitada por su clasificación previa de aprovechamiento y peligrosidad, y por la cual se rigen la mayoría de las empresas sin ir mucho más allá hacia la innovación en tecnologías de aprovechamiento.

Algunos sectores específicos de gran relevancia en la producción y aprovechamiento de residuos, así como el eje principal del presente documento, son el sector de la producción automotriz y la construcción. Estas industrias son focos responsables de numerosos impactos ambientales y sociales a nivel nacional. Haciendo que la optimización de sus procesos sea un enfoque de estudio relevante en cuanto a la investigación de sus materiales y los procesos de estos.

Esta tendencia positiva que ha reflejado el sector carrocero en el país, así como el margen de ganancias asociadas al aumento de población y sus necesidades

referentes a movilidad, se ve reflejada en el año 2018 registrado con un incremento de 38.9% en relación al año anterior, a la vez que sus ventas se impulsaron un 19.2%, indicadores natos del tamaño productivo y evidentemente alcista de las industrias carroceras (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2019).

Así mismo, la relevancia de la fibra de vidrio en la industria automotriz va determinada por las características que ofrece como material compuesto de acuerdo al uso en el que se quiera emplear, entre ellas su principal atributo es la resistencia y ductilidad, permitiendo la fabricación de piezas de vehículos con un alto rendimiento, trabajabilidad y durabilidad. Así mismo, sus aplicaciones estructurales en otros campos son amplias al funcionar como un tejido laminado que aporta flexibilidad a la matriz aplicada y alta resistencia a condiciones ambientales diversas (Morales, 2008).

Otra de sus características más relevantes, hace mención de su bajo mantenimiento, pues los productos fabricados con esta requieren muy poco a casi ninguno, ya que es un material que no se oxida, pudre o corroe. Y aunque esto hace que su vida útil sea óptima, los residuos generados no solamente corresponden a la fase final sino a su fase productiva, puesto que durante su fabricación, los residuos producidos son incinerados, reciclados o acumulados en las superficies, sin embargo, cuando se intenta recuperar el vidrio, solamente se logra reciclar un 10% de la cantidad bruta de residuos (Belliard, 2016).

Por otro lado, su procesamiento y exposición directa, está asociada a diversos problemas pulmonares, pues su vía de entrada principal en el organismo se da a través de la inhalación de las partículas suspendidas en el aire y de acuerdo a su tamaño de partícula logra generar enfermedades principalmente asociadas al cáncer de pulmón. Además, debido a su biopersistencia en el ambiente puede ser un problema trasladable a otras especies que se encuentren en un radio considerable (Sadhvani, 2019).

A nivel medioambiental su repercusión mayor se debe a su proceso de disposición, el cual a pesar de ser legislado como un residuo especial de tratamiento en plantas autorizadas específicas, en el caso específico de Colombia, es desechado en rellenos sanitarios de forma indiscriminada y altamente peligrosa para los ecosistemas circundantes, puesto que como se nombró anteriormente, su bio-acumulación en el ambiente, le permite alcanzar vía aérea y acuática espacios en un

rango mayor al dispuesto, donde mientras afecta en la superficie el sistema pulmonar de las especies, a nivel acuático se transforma en un núcleo de toxicidad preocupante (Universidad Industrial de Santander, 2016).

En consecuencia a las problemáticas mencionadas, el aprovechamiento de los residuos de la fibra de vidrio ha sido un tema de estudio popular principalmente en las industrias más grandes que utilizan esta materia prima. Éstas, utilizan métodos enfocados en la recuperación de las propiedades del material para su reinserción en la cadena productiva, a través de máquinas patentadas y procesos químicos complejos en condiciones controladas (Residuos profesional, 2017).

A pesar de su éxito, cabe resaltar que no es un procedimiento ampliamente extendido en la mayoría de las industrias, pues implica inversión y gestión adicional en la línea de producción establecida. Por esto, incursionar en campos alternos que puedan obtener provecho del residuo generado sin procedimientos químicos es un medio viable para hallar solución y rentabilidad a un problema creciente.

Uno de estos campos puede ser considerado el sector de la construcción, en el cual es popular el uso de fibras, entre ellas la fibra de vidrio, que funciona como un agregado en el concreto al aportar propiedades ampliamente aprovechables para usos específicos y que representan ventajas permitiendo que la mezcla sea más liviana y por lo tanto logre reducir el costo total de la obra, por otra parte, evita problemas derivados de la incorporación de la malla de acero del hormigón armado, impidiendo la presencia de corrosión y deterioro estructural mientras cumple con una capacidad de resistencia a la flexión que supera la de un concreto convencional (Meghe, 2014).

Sin embargo, es importante denotar que su uso se limita a la clasificación correspondiente a los distintos tipos de fibra de vidrio, puesto que la fibra de vidrio utilizada en industrias automotrices y navales, así como la de mayor uso industrial, es la fibra de vidrio tipo E. En general el Glass Fiber Reinforced Concrete GFRC, permite la solución de algunos problemas presentados en el concreto convencional, pero por otro lado, la industria tuvo que crear una derivación completamente nueva de fibra de vidrio que supliera las necesidades requeridas sin alterar de manera negativa su comportamiento al añadir materiales alternativos, es por esto que tras muchos ensayos se demostró que las fibras de vidrio típicas, no son aptas para su uso en la construcción a menos de que las mismas contenga un alto porcentaje de

zirconio y por lo cual fue necesaria la creación específicamente de fibras de vidrio álcali resistentes (AR), diseñadas exclusivamente para estos fines (Gupta et al., 2014).

Por esta razón uno de los retos que resulta de la optimización de recursos en las industrias automotrices, así como la mejora de las propiedades físico químicas del concreto, da resultado a la idea de la incorporación de fibra de vidrio reciclada proveniente de la industria automotriz en la matriz de concreto, teniendo en cuenta que la bibliografía previa se basa en estudios de fibra de vidrio tipo E nueva y su comportamiento en el hormigón. Por otra parte, el estudio desarrollado permitirá discutir la optimización de ciclos productivos que usen fibra, en miras de generar un prototipo que de acuerdo a sus propiedades y carácter ecológico pueda catalogarse en el futuro como un eco-producto.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el desempeño técnico de un concreto de 4000 psi que contenga fibra de vidrio residual tipo E proveniente de la industria carrocera, evaluando comparativamente su rendimiento frente a un concreto convencional y concreto con fibra comercial.

Objetivos específicos

- Validar la metodología de elaboración de los concretos con fibras para determinar y adaptar de manera eficiente los requisitos para su diseño.
- Elaborar un diseño de mezcla óptimo que logre adaptarse a los tres tipos de concreto a trabajar; concreto convencional, concreto con fibra de vidrio comercial y concreto con fibra de vidrio reciclada.
- Analizar comparativamente los resultados obtenidos en cada una de las muestras sometidas a prueba, para evaluar su rendimiento respecto a las variables de compresión, flexión y tensión indirecta.

- Determinar las ventajas y desventajas comparativas frente a los prototipos evaluados que presenta el uso de fibra de vidrio reciclada en el concreto de acuerdo con los resultados obtenidos.

Antecedentes

Para abarcar a profundidad la importancia de las fibras y las investigaciones dadas en torno a su uso dentro del sector de la construcción, es necesario tener en cuenta el contexto histórico y algunas de las investigaciones que han dado forma a su evolución en la industria, así como sus casos de éxito y fracaso en diversos estudios.

La fibra de vidrio fue inventada en 1938 por Rusell Gamer Slayter, inicialmente con el propósito de usarse como un material aislante en la construcción de edificios, sin embargo, en Rusia hacia el año 1940, se empleó en un intento para lograr reducir el grosor de las piezas de hormigón, permitiendo su empleabilidad en el uso de cerramiento de fachadas, sustituyendo el refuerzo de acero por hebras de fibra de vidrio, sin embargo, inicialmente la idea incluía el uso de fibras de vidrio tipo E, las cuales demostraron un ataque alcalino severo en el concreto impidiendo su futura adición (Castiblanco & Carrero, 2015).

Actualmente las propiedades finales y determinantes de un tipo particular de concreto reforzado con fibras de vidrio están determinadas por el diseño de mezcla y el método de fabricación, las propiedades típicas adquiridas en el material a través de la pulverización y finalmente el proceso de premezcla. La fibra de vidrio resistente a los álcalis por lo general se añade en un porcentaje de 3 al 5% cuando se emplea en la fabricación de productos prefabricados, independientemente si se emplea el proceso de pulverización o en su lugar a través de los métodos tradicionales. Dentro de estos estándares es ampliamente utilizado para la fabricación de paneles arquitectónicos, “placas de recubrimiento en obra, encofrados de tableros de puentes y muros, muros antirruidos, renovación de alcantarillados, sistemas de transporte de aguas y

canales, capiteles y columnas, ménsulas y cornisas, pórticos y barandillas” (Irias, 2013).

El uso de concreto polimérico ha sido una de las fuentes de investigación más prometedoras en la producción de componentes prefabricados debido a las ventajas que presenta en muchas de sus características como resistencia y durabilidad, además del rápido tiempo de curado que consiste en unos pocos minutos u horas a diferencia de materiales a base de cemento, a los cuales le toma días este proceso. En cuanto a sus propiedades en resistencia a la compresión, estos sistemas prefabricados pueden llegar a soportar un valor de hasta 30.2 MPa frente a los 7 – 9 MPa que soportan las mezclas de concreto tradicional; sumado a esto permiten una rápida evacuación de fluidos, gracias a su característica superficie tipo espejo, resistencia al ataque de químicos, resistencia a heladas, desgaste por abrasión y resistencia al choque (Morales, Duncan, García, Martínez, Barrón & Cepeda, 2013).

En función del alto volumen de residuos de fibra de vidrio desechado en los vertederos localizados en la Unión Europea (al menos 150.000 toneladas anuales), la Universidad de Alicante ha desarrollado un método para reciclar estructuras compuestas por fibra de vidrio utilizada en el sector naval, sector automovilístico y también aeronáutico, con el fin de recuperar las fibras y volver a utilizarlas. La tecnología propuesta se caracteriza por la implementación de un proceso químico donde se busca la separación de la resina en su totalidad de la fibra de vidrio adherida, esto se logra gracias a un control exhaustivo de las condiciones de presión y temperatura, las cuales deben ser suaves y que finalmente permiten que la degradación del material sea mínima durante el proceso y pueda ser posteriormente reutilizado en la fabricación de nuevos objetos (Residuos profesional, 2017).

Por otra parte, el trabajo basado en el uso de materiales compuestos reciclados de fibra de vidrio poliéster como cargas en concreto polimérico se basa en la sustitución del mayor porcentaje de carbonato de calcio que se

encuentra en el concreto polimérico por material reciclado de fibra de vidrio, reduciendo la cantidad de resina utilizada en este tipo de concreto. Mediante el proceso experimental efectuado acorde a las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), para un valor máximo de 2% de material reciclado se logró la reducción a 10% de resina para 90%, el cual corresponde a un porcentaje apropiado para proveer a la mezcla propiedades relativamente buenas (Morales et al., 2013).

Marco teórico

El concreto y las fibras en el concreto

En general las fibras en el concreto son empleadas para otorgar a la matriz una mayor eficiencia en el control de la fisuración por contracción, las cuales en las proporciones correctas logran aumentar la resistencia al agrietamiento y disminuir el tamaño de las grietas en el tiempo respecto a los diseños de mezcla tradicionales. Suelen emplearse fibras de acero, fibras de plástico, fibras de vidrio, de materiales orgánicos como la madera, entre otras; las cuales, de acuerdo a su tamaño, textura, forma y espesor, pueden ser empleadas en usos específicos de la construcción (Silva, 2018).

En el mundo de la construcción el concreto es el material más ampliamente usado con más de dos mil millones de toneladas producidas anualmente aproximadamente. En las mezclas convencionales las mallas de acero son a menudo incorporadas en la matriz con la finalidad de aportar resistencia a la tracción, sin embargo, su uso generalizado conduce a una susceptibilidad a la corrosión y conlleva a su rotura en el largo plazo. A razón de esto la idea de agregar fibras poliméricas al concreto cautivó a químicos e ingenieros de principios del siglo XX; por desgracia, las experimentaciones iniciales con fibra de vidrio fueron infructuosas, pues la fibra de vidrio tipo E que era masivamente utilizada a nivel industrial por sus excelentes propiedades, presentó una creciente degradación al integrarla en la matriz debido a su alto contenido álcali en adición con el concreto (Bagala et al., 2018).

Hacia el año 1940 el potencial del material en el sector de la construcción ya era reconocido, sin embargo, su auge incrementó al adicionar dióxido de circonio para soportar el ataque químico derivado de los álcalis presentes en el cemento Portland. Este proceso derivó en la creación de Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC), el cual lograba aportar características físico mecánicas comparativamente ventajosas frente al concreto convencional además de poseer ligereza, resistencia al fuego e intemperie, apariencia atractiva e impermeabilidad a un costo competitivo (Iskender & Karasu, 2018).

Tipos de fibras y su función

Históricamente las fibras siempre han formado parte de diferentes modelos estructurales, siendo uno de sus primeros usos siglos atrás con fibras naturales y posteriormente artificiales, dentro de las cuales su uso más popular era en la fabricación de tejas o prefabricados de asbesto-cemento, material que le confería a las estructuras la tensión y monolitismo deseados, sin embargo, con el tiempo se hizo evidente los perjuicios del asbesto en la salud y tuvieron que ser sustituidas por fibras de otro tipo como fibras metálicas, sintéticas, de vidrio y naturales (Sika, 2017).

Se debe tener en cuenta que, dependiendo del tamaño de las fibras añadidas al concreto, se pueden obtener diferentes propiedades y ventajas en la mezcla. Por ende, cuando se hace mención a las microfibras, su diseño se enfoca en la minimización de agrietamiento por contracción plástica. Por otro lado, las macrofibras mejoran la resistencia a la tracción y la ductilidad, proporcionando una alternativa a las mallas de refuerzo tradicionales de alambre soldado (Union Quarries, 2020).

Concretamente, la función de las microfibras de vidrio es actuar durante el periodo de absorción y trabajabilidad después de las 24 horas una vez fundida la mezcla, reduciendo la fisuración o eliminando la retracción plástica dada durante dichas horas. De igual manera, contribuye a mediar las mezclas con exceso de agua que afectan el diseño de mezcla y su eficacia. Así su uso

extendido se da principalmente en “pisos, pavimentos, prefabricados y en general, aquellos materiales cementicios con relación superficie expuesta/volumen, alta” (Sika, 2017).

Por otra parte, las macrofibras se especializan en la prevención de la fisuración del concreto en estado endurecido, haciendo que una vez aparezcan dichas fisuras no afecten el funcionamiento de las estructuras. Generalmente, las macrofibras no alteran el comportamiento de la matriz frente a la compresión, en su lugar aumenta de manera loable la tenacidad, encargada de aportar a los materiales la capacidad de soportar cargas antes de colapsar (Sika, 2017).

“En un concreto no fibroreforzado la falla y colapso ocurren con la primera fisura principal; mientras que en un concreto fibroreforzado, la falla y colapso de la estructura tienen lugar mucho después de la aparición de la fisura principal” (Sika, 2017, p. 10).

Manejabilidad

Para el caso de los concretos que emplean fibras, es importante realizar pruebas que puedan determinar el grado de trabajabilidad de la mezcla, las cuales permiten la determinación de las propiedades del concreto en su estado plástico, principalmente asociadas a la consistencia, fluidez, cohesión y grado de compactación. La metodología de ensayo se encuentra descrita en la norma NTC396 y se hace a través de un cono de Abrams (Cure, 2019).

En el caso de los concretos con bajo asentamiento y baja trabajabilidad, es oportuno hacer uso de los plastificantes, los cuales aportan un aumento de las dos variables mientras hacen la mezcla más fluida en lapsos de 30 a 60 minutos sin alterar las propiedades cohesivas de la matriz (Kosmatka & Wilson, 2016).

Curado

La hidratación del concreto juega un papel importante principalmente en los resultados de resistencia iniciales y se considera una parte fundamental

en el proceso de tratamiento de las mezclas de concreto, para optimizar los resultados es necesario intentar acoger los estándares de control que se pueden manejar durante esta etapa (Toxement 2016).

De acuerdo a la norma, para el requerimiento de tenacidad en los concretos reforzados con fibras no es necesario especificarlo de acuerdo a la función a la que esté determinado el mismo, por ende, cuando el propósito de las fibras es favorecer el agrietamiento por retracción plástica, el valor de tenacidad es despreciable y no se considera exigible como parámetro de calidad del producto (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2017).

Diseño de mezcla

El diseño de mezcla determina la combinación que resulta más práctica y económica de acuerdo con los materiales disponibles y requeridos, con el objeto de que la producción de concreto se acople a los requerimientos normativos aplicables al tipo de concreto objetivo (ASOCRETO, 2015).

VARIABLES DE ESTIMACIÓN

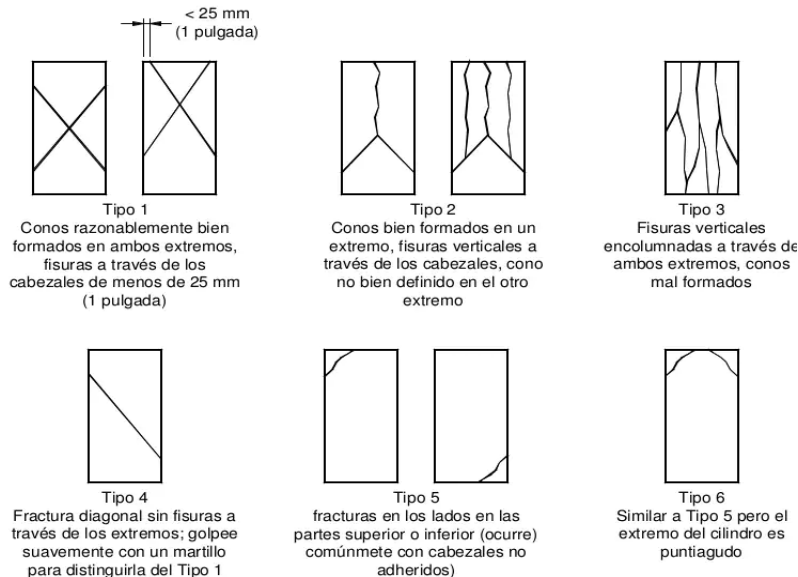
Resistencia a la compresión

Se define como una característica mecánica principal en el concreto, determinada a partir de la capacidad para soportar una carga por unidad de área y expresada en kg/cm² y MPa generalmente. Las pruebas efectuadas en función del cumplimiento con los requerimientos de resistencia específica de acuerdo al tipo de estructura deseada se realizan en cilindros de acuerdo a la norma ASTM C31, alcanzando su resultado más óptimo a los 28 días de fundición y funciona como mecanismo de control de calidad y resistencia del concreto en estructuras. Sin embargo, puede medirse en periodos de tiempo distinto con propósito de soporte informativos, en edades usuales a los 1, 3, 7, 14, 90 y 360 días (CEMEX, 2019).

Un indicador clave durante las pruebas de compresión en el concreto es el tipo de falla que presenta una vez alcanza su carga máxima y que está

especificado en la NTC 673 a través de su esquema de fractura típicos mostrados en la imagen a continuación.

Figura 1 Tipo de fracturas en ensayo de compresión



Nota: ICONTEC. (2010, febrero). *Concretos. Ensayos de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto* (Norma Técnica Colombiana NTC 673).

<https://es.slideshare.net/1120353985/ntc-673-compresion-concretos>

El tipo de fractura permitirá determinar la calidad de los especímenes y algunas características dadas por el diseño de mezcla efectuado (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2010).

Resistencia a la flexión.

Se basa en la medida de la resistencia a la tracción en el concreto mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de sección transversal. Se realiza a través de la falla por momento de viga y se expresa como Modulo de Rotura (MR). Muchos de los componentes estructurales se encuentran sometidos a flexión y se mide generalmente a través del fallo de vigas, donde las fibras inferiores se encuentran bajo la acción de la tensión y las fibras

superiores bajo compresión, por ende, la falla se da por tracción en las fibras inferiores, pues el concreto es más débil en tracción que en compresión (Neville, 2015).

Tensión indirecta

Se considera como un método representativo para imitar la respuesta de un pavimento flexible y determinar la carga máxima que soporta la muestra antes de fallar, especificado en la norma NLT-346. Durante el ensayo el cilindro es sometido a compresión diametral de acuerdo con ensayo Marshall, donde es aplicada de manera uniforme una carga a lo largo de dos líneas opuestas hasta alcanzar el punto de rotura (Garrote, 2016).

Modulo elástico

Es una propiedad mecánica diseñada para reflejar la habilidad en los concretos para deformarse elásticamente, generalmente obtenido por medio de la aplicación de cargas conocidas sobre el espécimen a evaluar a través de la prueba estándar de compresión definida en la norma ASTM C469, sometiendo los cilindros a una carga axial incrementada de manera gradual hasta que falle la muestra.

Los principales factores que inciden en el módulo de elasticidad se atribuyen a la estructura heterogénea del concreto “que exhibe diferentes comportamientos durante el proceso de carga debido a las fases de los agregados, la matriz de pasta y la interfase de agregado de pasta” (Serrano & Pérez, 2014, p. 19).

Mercados verdes

Desde que la intervención del hombre y sus actividades en los ecosistemas se hacen más presentes a través del tiempo, la capacidad de regulación de la naturaleza no da abasto al crecimiento acelerado de los impactos antropogénicos, generando pérdidas importantes en la estabilidad del planeta y limitando los servicios ecosistémicos que suple el medio ambiente. Es por esto que los factores biodiversidad y sostenibilidad ambiental se han

convertido en elementos de importancia trascendental en la competitividad empresarial, donde a través de la demanda internacional de productos que cumplan con criterios que favorecen la sostenibilidad, se crean nuevos y crecientes desafíos para las empresas y su posición en el mercado.

Dentro de la categorización de los mercados verdes se pueden encontrar productos priorizados con oportunidad de compras estatales sostenibles, pues estas representan un factor de gran potencial para dinamizar los mercados responsables. El ente encargado de la destinación de estas compras, que representan un 18% del PIB nacional, es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, quien lo desarrollo en el año 2010 y lo esquematizó de la siguiente manera (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 201d. C.).

Figura 2 Productos Relacionados a los Negocios Verdes Priorizados por el MADS

Productos	Descripción general de priorización
Café	Aunque el café no se ubica como uno de los bienes de mayor consumo en términos de volumen o gasto por parte de Estado, su producción en Colombia si tiene un alto impacto social y ambiental. Razón por la cual representa una prioridad en la agenda del Gobierno, que ha quedado manifiesta al concertarse el "Acuerdo para la Prosperidad Cafetera", como parte de la política cafetera para el quinquenio 2010-2015.
Fuentes de iluminación ahorradoras de energía	El gasto asociado como lo son todo tipo de fuentes de iluminación, fuentes alógenas, proyectores, reflectores y lámparas fluorescentes es por valor de 16.570 millones de pesos colombianos (enero- sep. 2010). La Unidad de Planeación Minero Energética –UPME- resalta el significativo consumo de fuentes de iluminación del sector oficial dentro del total nacional.
Papel Reciclado	De acuerdo con los datos suministrados por el SICE, con corte a septiembre 30 de 2010, el gasto acumulado es por valor de 9.948 millones de pesos colombianos. Este rubro incluye todo tipo de productos con base al papel, desde papel para impresoras, hasta papel fotográfico o indicador de PH.
Materiales de construcción y edificación	Este rubro de generación de ingresos es muy importante para el país y al mismo tiempo asociado a temas de sostenibilidad ambiental estratégicos para la conservación ambiental. Representa un gasto elevado para el Estado, de acuerdo con los datos del SICE, con corte a septiembre de 2010, el Estado destinó 30.548 millones de pesos en materiales de construcción y edificación.
Elementos de aseo y limpieza	Los elementos de aseo y limpieza biodegradables y sin elementos químicos contaminantes están generando una pauta en aras de descontaminar las fuentes hídricas y de asegurar elementos que no sean nocivos a la salud humana.

Nota: Minambiente, & M. (2018). Estrategia Nacional de Economía Circular. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.

Es así como la estrategia de emprendimiento en negocios verdes da prioridad aquellas empresas que incorporen:

Temas relacionados con el uso eficiente de energía, la adaptación al cambio climático, manejo de residuos, tecnologías más limpias,

materiales de construcción sostenibles, uso sostenible de la biodiversidad, así como biotecnología e industria agrícola (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 201d. C.).

Certificaciones ambientales

Las certificaciones ambientales de producto encuentran su enfoque en la promoción de consumo sustentable, valiéndose a su vez del marketing ambiental para transmitir a los consumidores la imagen de una empresa comprometida con la sustentabilidad y la elaboración de productos sustentables. De esta forma las certificaciones encuentran sentido en la responsabilidad adquirida por una empresa en materia ambiental y la captación del público con consciencia de consumo, generando beneficios para ambas partes y cambiando los estándares de producción y consumo (Ramos et al., 2010).

Sello Ambiental Colombiano

Diseñado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible dentro del marco del Plan Nacional Estratégico de Mercados Verdes, mediante el cual se otorga un sello a través del Organismo Nacional de Acreditación ONAC y autorizado por la Autoridad de Licencias Ambientales ANLA, el cual certifica el uso sostenible de recursos naturales empleados en un producto, procesos de producción más limpio, aspectos de reciclabilidad, reutilización o biodegradación y uso de materiales de empaque reciclable. Es indispensable tener en cuenta que las Normas Técnicas para optar por este sello se fundamentan en fuentes para el diseño de las fichas con criterios de sostenibilidad contempladas para las Compras Públicas Sostenibles (Minambiente, 2019).

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El panorama global se sostiene sobre factores determinantes en la estabilidad del planeta, principalmente regidos por el crecimiento económico, la desigualdad social y la degradación del medio ambiente. Esta realidad

requiere de la acción frente a los principales desafíos que están acompañados de un cambio de época que mantiene patrones de producción y consumo insostenibles y que son apreciables principalmente en regiones del planeta como América Latina y el Caribe, pues, aunque no sean las zonas con mayor pobreza del mundo, la desigualdad constituye su mayor obstáculo. Esto da sentido a la creación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, establecidos en la Agenda de Desarrollo Sostenible 2030 y enfocados en favorecer el cerramiento de las principales brechas en las sociedades, mientras regula el cambio climático y favorece el crecimiento económico (United Nations, 2018).

Procedimiento

A través de la consulta bibliográfica extensa necesaria al tratar de un proyecto que abarca sustancialmente conceptos de ingeniería civil y la ayuda profesional suministrada por los profesores de ingeniería civil y ambiental, así como del laboratorista y un profesional de ARGOS, acerca de como realizar el prototipo deseado, fue posible estimar el diseño y manejo de un concreto reforzado con fibras. Inicialmente se estimaron las cantidades requeridas de los componentes de la matriz así como las fuentes de obtención y procesamiento de los mismos.

Materiales de la mezcla

Para la mezcla de concreto tradicional se requiere de grava, arena y cemento, los cuales fueron donados a la universidad por el área de innovación de la empresa de cementos ARGOS, en función de desarrollar el presente proyecto. Por otra parte, la fibra de vidrio reciclada proviene de una empresa de carrocerías, la cual tiene una producción diaria de gran volumen de este tipo de residuo y por el cual debe pagar su debida disposición.

El material de fibra de vidrio aportado tiene una presentación inapropiada para su adición directa en la mezcla y no cumple con los diámetros requeridos en los concretos reforzados con fibra de vidrio tradicionales, por lo

que es necesario realizar un proceso de trituración de esta. Tras la ardua búsqueda de maquinaria eficiente para esta tarea, se determinó que no existen medios cercanos o inmediatos en la ciudad de Bogotá que puedan hacer procesamiento de este material, en función de su característica abrasividad, su adherencia a las superficies y su difícil manejabilidad; limitando el proceso a un trabajo manual.

Figura 3 Fibra de vidrio en estado residual



Nota: Elaboración propia

La fibra en su estado reciclado original contiene un porcentaje alto de resina, lo que vuelve las piezas recicladas muy resistentes, haciendo que para obtener un material fino que se acople a las características propias de una fibra de vidrio empleable en el concreto, solo se puedan cortar los extremos de estas piezas, procedimiento que emplea un tiempo bastante considerable en función del poco volumen obtenido por cada pieza respecto al requerido para realizar los prototipos del proyecto. Dadas estas condiciones, se hizo empleo de tijeras para cortar aluminio, la cuales resultaron útiles para cortar el porcentaje visiblemente aprovechable por este método.

En las imágenes se puede apreciar el proceso realizado con las tijeras y el resultado final de la fibra a utilizar. Cabe resaltar que una estimación promedio respecto a la cantidad obtenida es que solo pudo aprovecharse el 10%

de un costal de fibra en estado residual, ya que resultaba imposible cortar las piezas más grandes con resina.

Figura 4 Corte y estado final de fibra de vidrio reciclada



Nota: Elaboración propia

La fibra convencional obtenida para la comparación de las muestras es de tipo macrofibra pues a nivel comercial esta tiene un uso bastante amplio respecto a la microfibras y permite una comparación más amplia entre las propiedades dadas en el corto, mediano y largo plazo.

La fibra residual obtenida no tiene una clasificación clara, pues no cuenta con los diámetros suficientes para considerarse macrofibra, ni con la apariencia de distribución de las microfibras de vidrio.

Diseño de mezcla

El diseño de mezcla propuesto es una dosificación convencional para concreto de 4000 psi. Por lo que los especímenes testigos tendrán una composición típica de este tipo.

La tabla a continuación muestra el diseño de mezcla inicial, el cual consiste en un diseño típico para 1m^3 de concreto, teniendo en cuenta que al

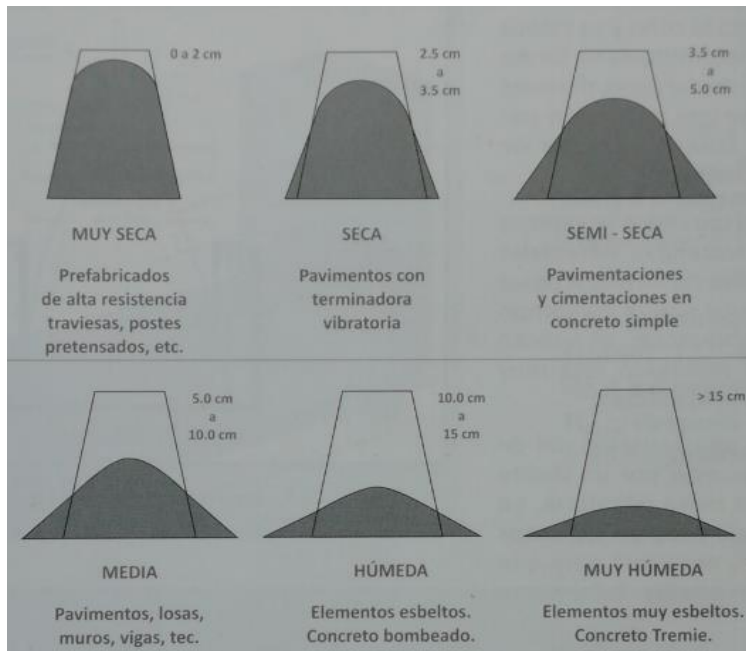
momento de iniciar la réplica del diseño en el trompo es necesario hacer una corrección de humedad de acuerdo a la fluidez dada en la mezcla.

Cemento	270 kg
Agua	170 kg
Arena	943 kg
Grava	928 kg
Aditivo	0,4 % cemento

Tabla 1 Diseño de mezcla inicial para concreto de 4000 psi

Como se mencionó anteriormente, para determinar si el diseño de mezcla es apropiado para los prototipos que contienen fibra de vidrio es necesario estimar la fluidez de este, por lo que se hicieron las fundiciones en cono con los tres prototipos a evaluar y se midió su consistencia respectivamente y acorde con la NTC 396. Dicho procedimiento para la medición de la fluidez en el concreto con el cono de Abrams, se rige bajo la siguiente clasificación:

Figura 5 Clasificación del concreto según su consistencia NTC 396



Nota: Cure, L. (2019). Ensayo de asentamiento del concreto NTC 396. ARGOS 360.
<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/ensayo-de-asentamiento-del-concreto>

Al realizar la medición con el cono se determinó un valor de 2.5 cm, el cual corresponde a una mezcla seca y que acorde al comportamiento del concreto en adición con fibras, resulta insuficiente para cumplir con los criterios de fluidez de la mezcla.

Se realizó una modificación a la proporción de los materiales utilizados en la mezcla al observar que la adición de la fibra absorbía en gran medida el agua de la mezcla y disminuía su trabajabilidad de acuerdo con la relación dada a través de la prueba de cono de Abrams para la calidad de consistencia del concreto, pues una vez medido, el nivel de asentamiento era inferior a 3 y lo clasificaba con un concreto muy seco.

Figura 6 Medición de fluidez con cono de Abrams



Nota: Elaboración propia

La modificación maneja un aumento en las cantidades mientras mantiene la misma relación proporcional del diseño de mezcla escogido, sin embargo, esto permite hacer uso más apropiado del agua y el plastificante en la matriz.

Figura 7 Corrección de diseño de mezcla para concreto de 4000 psi

Cemento	12,96 kg
Agua	8,16 kg
Arena	37,72 kg
Grava	37,12 kg
Aditivo	0,5 % cemento

Nota: Elaboración propia

Para ejecutar el procedimiento de mezcla, se llevó a cabo a través de las recomendaciones dadas en las instrucciones de uso de la fibra de vidrio comercial, la cual sugiere hacer una mezcla previa del plastificante con el agua y posteriormente la adición de los agregados gruesos correspondientes a la arena y la grava. A continuación, debe agregarse en el trompo la fibra de vidrio,

la cual debe permanecer en mezcla durante 5 minutos para finalmente agregar el cemento.

Fundición de especímenes

Una vez obtenida la mezcla bajo los parámetros establecidos anteriormente, se procede a fundirla, la capacidad del trompo permite la fundición de 8 cilindros y 3 viguetas por muestra.

Se realizó la totalidad de 24 cilindros y 6 viguetas, cumpliendo con la normativa aplicable al proyecto, la cantidad de especímenes a realizar para proceder con un análisis comparativo es de tres especímenes para cada edad de ensayo, estipulado bajo la norma ASTM C1018.

El curado en la mezcla se hizo a través del método de inmersión, el cual implica sumergir en totalidad el elemento en agua, teniendo en cuenta que el tiempo de inmersión puede afectar de manera proporcional la resistencia alcanzada en las muestras de concreto.

Figura 8 Curado de especímenes



Nota: Elaboración propia

Las edades de ensayo tomadas para el proyecto fueron de 7, 8, 14, 28, 29 y 34 días de fundidas las muestras.

Las condiciones a cumplir una vez las muestras de concreto con fibras se encuentran en estado endurecido, se evalúan en concordancia a las normas ASTM C1018 que regula las propiedades de tenacidad a la flexión o resistencia, la NTC 3658 que regula la resistencia a la flexión, la NTC 50 que regula la

resistencia a la compresión y la ASTM C1077 que regula las condiciones que deben cumplir los laboratorios donde se efectúen los ensayos.

Una vez cumplidas las edades establecidas para efectuar las pruebas en los especímenes, se procede a realizar los ensayos de compresión en cilindros y flexión en viguetas. También se dispone de la estimación de tensión indirecta a través de los laboratorios de Concrelab y por último se toman los datos correspondientes a módulo de elasticidad.

Análisis y discusión de resultados

En la sección de anexos se podrán apreciar las tablas correspondientes a los resultados obtenidos en cada medición del laboratorio para cada uno de los cilindros fundidos y fallados en las diferentes edades de ensayo estipuladas y que dieron lugar a las gráficas analizadas para cada parámetro.

Todas las tablas y gráficas presentadas se dan en base a la investigación bibliográfica realizada y tomando en cuenta todas las normas aplicables para el ensayo de especímenes de concretos y que resultan determinantes para el análisis comparativo realizado. Si bien el diseño de mezcla parte de la base de elaboración de un concreto de 4000 psi, las modificaciones dadas en el mismo en base a su fluidez y el uso de aditivos en la matriz, puede influir en los resultados obtenidos de manera moderada.

Resistencia a compresión

La carga máxima soportada por los cilindros se determinó a través de una máquina de compresión de alta estabilidad, para posteriormente efectuar la ecuación de resistencia a compresión definida como F_c ,

$$F_c = \frac{\text{Carga máxima kN}}{\text{Área cm}^2}$$

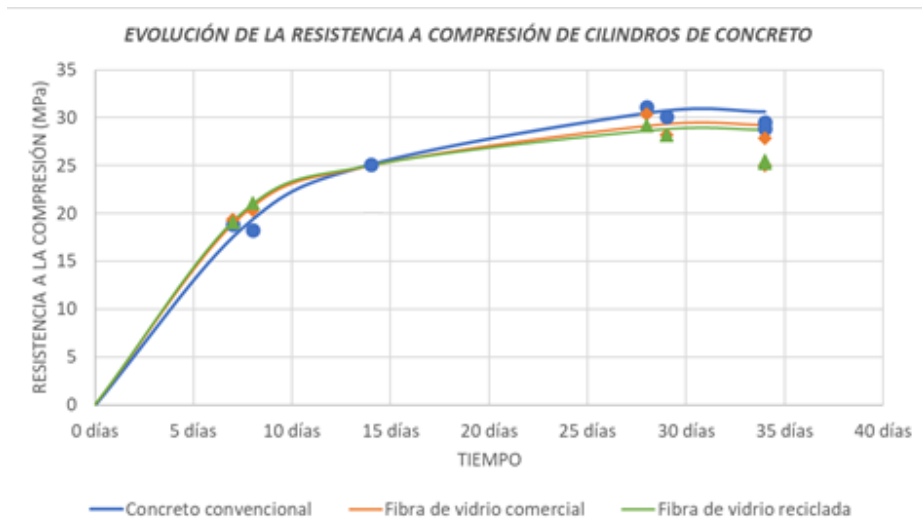
Figura 9 Cilindro en máquina de compresión



Nota: Elaboración propia

Para evaluar de manera práctica la compresión dada en cada una de las muestras se procede a graficar la resistencia alcanzada por los cilindros en las edades correspondientes.

Figura 10 Evolución de resistencia a la compresión



Nota: Elaboración propia

Como bien se puede apreciar la evolución en el tiempo, la resistencia a la compresión aumenta de manera dependiente a las edades en los tres casos, indicando un comportamiento típico de los concretos convencionales. En los primeros días la resistencia es mayor en los concretos con fibras, sin embargo, es la fibra de vidrio reciclada quien presenta un mejor rendimiento a los 7 días con 215 kg/cm², respecto a 186kg/cm² de concreto convencional y 208 kg/cm² de concreto con fibra de vidrio comercial.

En las edades finales es apreciable un descenso en la resistencia de los concretos con fibras frente al concreto convencional, esto puede deberse un error porcentual en gran medida por la cantidad de mezclas realizadas para elaborar los especímenes, ya que el trompo tenía una capacidad limitante de 210 Lt para obtener la cantidad requerida de mezcla para todos los cilindros, impidiendo así una homogeneidad ideal en cada uno de los factores que inciden en el proceso.

La gráfica de resistencia a la compresión evidencia que la adición de fibras no aporta significativamente nada al concreto, sin embargo, el concreto con fibra de vidrio reciclada podría llegar a funcionar mejor dentro del rango de las edades tempranas del concreto, puesto que presenta las propiedades similares a la de una microfibra en cuanto a la compresión y por ende, su función práctica en este aspecto consiste en evitar la fisuración por retracción plástica durante los periodos más cortos de ensayo.

Es importante resaltar que la resistencia a la compresión alcanzó en cada uno de los concretos ensayados los valores propios de calidad para un concreto convencional tal y como lo indica la norma. El concreto reforzado con fibra de vidrio reciclada fue el primero en alcanzar el valor de resistencia de 3000 psi a los 7 días, posteriormente en la edad de los 14 días todos alcanzan esta resistencia. A partir de los 28 días, es observable que todos los cilindros alcanzan resistencias superiores de los 4000 psi, esto se atribuye a las

modificaciones realizadas en el diseño de mezcla en función de su manejabilidad.

Todos los cilindros evaluados cumplen con los criterios para ser determinados como concretos de calidad en función de la compresión, herramienta base para determinar la aceptación o rechazo de los mismos.

Figura 11 Fallos en cilindros ensayados a compresión

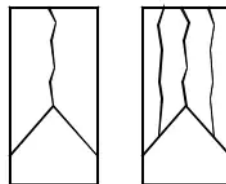
Concreto convencional	Concreto con fibra de vidrio comercial	Concreto con fibra de vidrio reciclada
		



Nota: Elaboración propia

La tabla anterior muestra los fallos a compresión dados durante el ensayo, donde se pudo observar que todos tienen las mismas características, por lo que se puede evidenciar que el tipo de falla se asemeja principalmente a la falla tipo 2, descrita en la NTC 673. Indicando una buena elaboración de los diferentes cilindros fallados.

Figura 12 Tipo de falla de cilindros



Tipo 2

Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, cono no bien definido en el otro extremo

Nota: ICONTEC. (2010, febrero). *NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 673*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

<https://es.slideshare.net/1120353985/ntc-673-compresion-concretos>

En general el aspecto de los cilindros fallados representa una distribución de agregado buena, otorgando una buena adherencia de materiales en las mezclas, sin embargo, es importante resaltar que las fibras de vidrio recicladas son notoriamente menos visibles que las fibras comerciales, por lo que la verificación de su distribución requiere un análisis más detallado.

Resistencia a la flexión (Modulo de rotura)

Para determinar la resistencia a la flexión se hizo empleo de una máquina de ensayo para materiales de alta resistencia a la compresión, diseñada para la determinación de la flexión de la viga con carga en tres puntos, donde es posible hallar el valor de la carga máxima necesaria para efectuar la fórmula de módulo de rotura MR definida por:

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde: MR: módulo de rotura del concreto, en N/mm²

P: carga máxima aplicada en N

L: luz libre entre apoyos en mm

b: ancho de viga en mm

d: altura de viga en mm (Peña & Lopez, 2019)

La imagen muestra la distribución de los apoyos en la viga y la maquina utilizada en el proceso de medición.

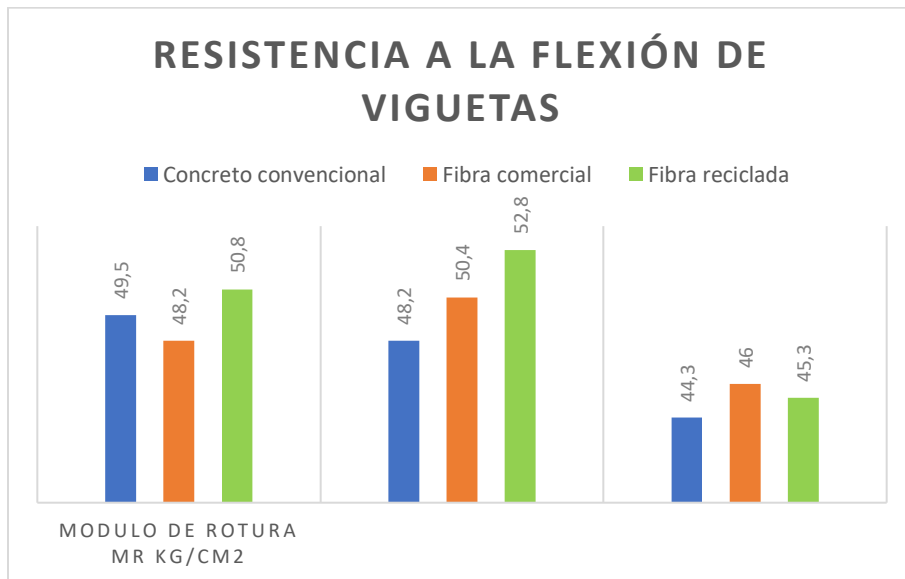
Figura 13 Ensayo de resistencia a la flexión



Nota: Elaboración propia

Una vez efectuadas las fórmulas para determinar la flexión de las viguetas, se realiza la gráfica comparativa de los rendimientos dados para cada espécimen.

Figura 14 Evolución de resistencia a la flexión de viguetas



Nota: Elaboración propia

Se puede observar que el desempeño del concreto reforzado con fibras de vidrio recicladas muestra un rendimiento superior al promedio, demostrando que cumple con el requisito más importante a evaluar en los concretos

diseñados con fibras y que además aporta una resistencia más considerable que la fibra de vidrio comercial. Esto supone un logro para el proyecto al indicar un carácter competitivo frente a la fibra comercial, pues el aporte dado por las fibras recicladas para evitar la fisuración se cumple a cabalidad.

El porcentaje de fibra añadido fue una estimación dentro del rango normal de adición de fibras en el concreto, teniendo en cuenta que a pesar de que su tamaño era menor que el de la fibra comercial, se tomaron los valores normales correspondientes a este tipo de macrofibra. Como resultado se puede determinar que un porcentaje de 0.4% del peso de la mezcla, es un valor indicado para la adición de fibra de vidrio residual en el concreto, al situar de manera óptima las propiedades evaluadas, sin dejar de lado posibles investigaciones futuras con diferentes porcentajes de fibra para determinar con exactitud el mejor diseño de mezcla con este agregado.

Las variaciones dadas en los resultados de la resistencia a la flexión con fibra de vidrio comercial pueden deberse a la distribución de estas en el concreto, puesto que no es posible realizar una mezcla homogénea al añadir la fibra de manera manual. Sin embargo, puede decirse que en su mayoría logró las capacidades propias de estas fibras aportando una mayor resistencia a la flexión frente al concreto convencional en todos los casos y en dos casos, respecto a la fibra comercial.

Vale la pena resaltar que, a nivel visual, durante el fallo de las viguetas era distinguible que el concreto con fibra de vidrio comercial genera una mayor adhesión en la fisuración del concreto, dado que como se puede observar en la imagen a continuación, la falla no rompía en su totalidad la viga. Esto puede atribuirse en gran medida al tamaño de las fibras, pues incluso una vez fundidas siguen siendo apreciables en los especímenes, factor poco apreciable en las fibras recicladas.

Figura 15 Fallas en viguetas ensayadas a flexión



Nota: Elaboración propia

Lo anterior puede interpretarse en que, en términos de tiempo el concreto con fibra de vidrio reciclado permite la aparición de la primera falla en un periodo más largo, por lo que la fisuración de este tipo de concreto tarda más en aparecer, aun así, por otra parte, el concreto con fibra comercial tiene un valor agregado en el tamaño de las fisuras, pues aunque estas aparezcan primero respecto a la fibra reciclada, el tamaño de la fibra comercial vale como ventaja funcionando como una red que entrelaza los espacios entre grietas e impide un deterioro prematuro.

Figura 16 Aspecto de los especímenes realizados



Nota: Elaboración propia

En la imagen se puede apreciar de manera más clara la diferencia entre las fibras evaluadas, además resulta destacable que todos los puntos de rotura de los especímenes suceden de forma igualitaria.

Tensión indirecta

Para determinar la tensión indirecta se tomaron 6 cilindros, 2 de cada tipo de concreto en diferentes edades y fueron ensayados en el laboratorio de Concrelab, pues la universidad no cuenta con el equipo necesario para su medición. El método efectuado por Concrelab para la estimación del parámetro se realizó según el método estandarizado de ensayo brasileño. La prueba fue realizada a seis cilindros, tres correspondientes a la edad de 34 días y 3 correspondientes a la edad de 39 días.

Lastimosamente las pruebas fotográficas de los ensayos dados al interior de Concrelab no fueron proporcionadas, más allá de la recepción de los cilindros en sus instalaciones.

Figura 17 Laboratorio Concrelab



Nota: Elaboración propia

La tensión indirecta se estimó por medio de la “Prueba brasileña”, de acuerdo a la ASTM C 496 y de acuerdo la fórmula:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi * l * d}$$

Donde:

σ = Resistencia a la tensión, kg/cm²

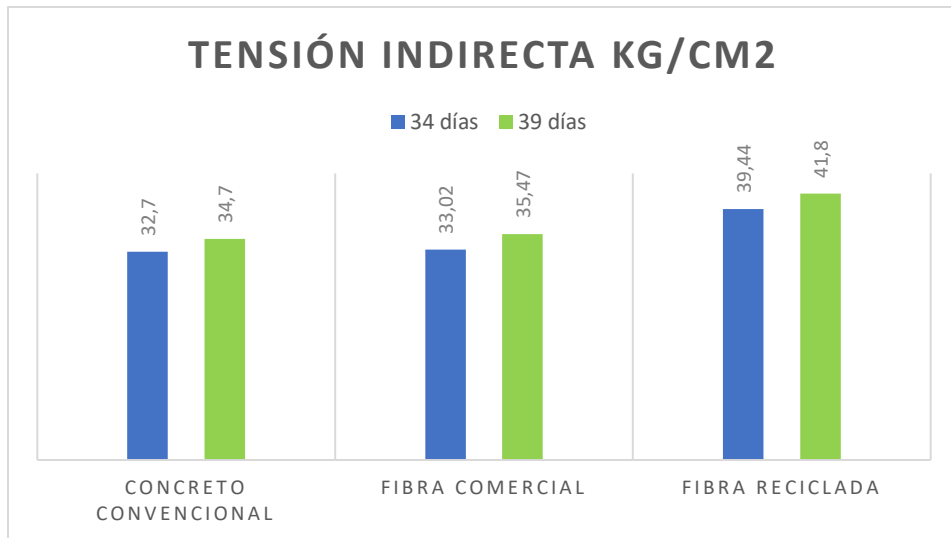
P= Carga máxima aplicada, kg

l= Longitud del cilindro, cm

d= diámetro del cilindro, cm (ASTM International, 2017)

De acuerdo con los resultados entregados por Concrelab, se realiza una gráfica que evidencia el comportamiento de los cilindros a la tensión indirecta en un periodo de 34 y 39 días.

Figura 18 Evolución de la tensión indirecta en cilindros



Nota: Elaboración propia con información Concrelab

La estimación de la tensión indirecta se destaca por ser un método representativo que imita la respuesta de hormigón y pavimentos flexibles, al igual que el ensayo de módulo está diseñado para definir la resistencia a la tracción. Por lo tanto, esta prueba permite valorar al concreto reforzado con fibra de vidrio reciclada como un material de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal, por lo que su empleo en la industria puede ir enfocado en las obras que requieran como resistencia a la tracción uno de sus parámetros más importantes.

Respecto a la bibliografía la tensión indirecta varía de un 8 a un 15% de la resistencia a la compresión del concreto, condición que se cumple en este caso. Un buen rendimiento en la tracción representa además que la adherencia entre los componentes de la mezcla es óptima, que la fisuración por retracción es un parámetro bien controlado y que en ocasiones su resistencia a la temperatura es destacable (S.A., 2015).

De acuerdo a lo anterior la fibra de vidrio reciclada resulta ser un material con buenas características para soportar las fuerzas de corte presentadas en el concreto, y aportan a la matriz cementicia una longevidad más amplia a razón de una fisuración tardía.

Se puede apreciar que el valor de tensión indirecta del concreto convencional respecto al concreto con fibra de vidrio comercial no tiene una variación muy significativa, de una manera mínima el concreto con fibras comerciales logra aportar a la resistencia de la propiedad evaluada.

Módulo de elasticidad

Este es medido de igual forma a través de la máquina de ensayo para materiales de alta resistencia a la compresión y fallado a dos velocidades distintas.

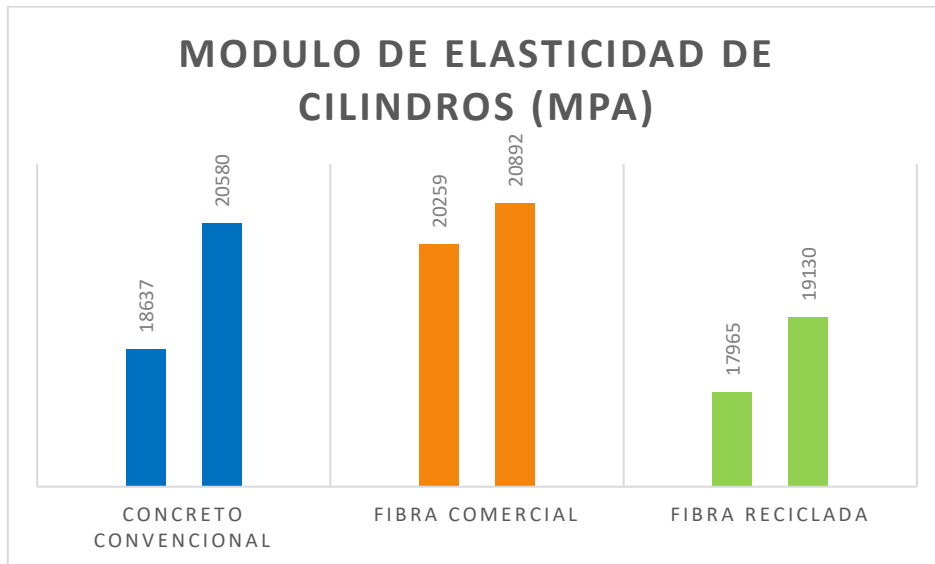
Figura 19 Ensayo de elasticidad



Nota: Elaboración propia

Es importante tener en cuenta que la variación de la calidad de los componentes fundamentales presentados en las fases del proceso de carga, representan un cambio en la respuesta del módulo y en general en el comportamiento del concreto

Figura 20 Modulo de elasticidad en cilindros



Nota: Elaboración propia

La pendiente de la curva de esfuerzo deformación permite interpretar que los concretos con mayor rigidez presentada son los concretos de fibra comercial y concreto convencional, esto indica que no soportan en gran medida la deformación dada al aplicar una carga. Por lo tanto, el concreto con fibra reciclada tiene una capacidad de deformación mayor, lo que lo hace más flexible, pues su deformación es más apreciable antes de fallar y lo convierte en un buen indicador de calidad en el concreto al facilitar la posibilidad de determinación de la falla antes de tiempo.

Análisis de características del concreto reforzado con fibra de vidrio tipo E reciclada

El concreto con fibras recicladas diseñado es un concreto de 4000 psi, con una capacidad de resistencia a la compresión final de 298 kg/cm² a los 28 días, que por sus características evita la fisuración por contracción plástica y además se desempeña de manera óptima a las cargas de tensión, por lo que evita también la fisuración a largo plazo cuando el elemento constructivo esté

sometido a fuerzas representativas de tracción y compresión. Esto le permite ofrecer condiciones de durabilidad apreciables y da lugar a que las fibras del diseño se consideren elementos capaces de absorber los esfuerzos de tracción y controlar los agrietamientos.

Al no contar con una clasificación específica que catalogue la fibra reciclada como macrofibra o microfibra, no se encuentra sujeto a los parámetros particulares de solo una. Respecto al desempeño que presentó el prototipo se puede decir que esta presenta especialidades particulares de ambos tipos de fibra y es de tipo fibrilada.

La dosificación de la fibra para el prototipo es de 0.4% del peso total de la mezcla y otorga las capacidades adecuadas para la obtención de un concreto flexo resistente.

A pesar de que dentro de las limitaciones más grandes dadas para el proyecto se encuentra la posibilidad de un ataque químico en el concreto en función de la presencia de álcalis que aporta la fibra de vidrio tipo E en contacto con el cemento; se puede observar que las propiedades de los especímenes con fibra reciclada no presentan un decrecimiento en sus propiedades más importantes a lo largo del tiempo y logran un desempeño apreciable.

De acuerdo al último objetivo planteado para la presente investigación, a continuación, se enumeran la ventajas y desventajas halladas tras los ensayos realizados, así como un breve análisis del potencial futuro del material generado en función de los mercados verdes.

Ventajas del uso de fibra de vidrio reciclada en el concreto

1. Respecto a la fibra de vidrio comercial uno de los principales atributos es que no se genera un impacto ambiental adicional durante su elaboración. En las fibras convencionales diseñadas para la construcción es necesario el uso de químicos como el Zirconio para manejar el ataque químico, además requiere de toda una línea de producción específica para su fabricación. La fibra de vidrio usada en el

prototipo, al ser reciclada no recibió ningún tipo de tratamiento previo o la adición de otros agentes que alteren su composición inicial como residuo, salvo su disminución de tamaño de forma manual, proceso que podría ser el único generador de una fuente de consumo eléctrico adicional al requerir de una máquina para realizar esta función a un nivel industrial y no experimental como en el proyecto.

2. A nivel económico, no se necesita incurrir en gastos complejos adicionales a los ya previstos dentro de la fabricación de concreto tradicional. La principal materia prima proviene de un residuo industrial que acorde con la normativa debe ser pagado para disponerse de forma adecuada, por lo que solucionaría uno de los problemas más grandes de los concretos con fibras y es el alto coste de implementación de las mismas en el concreto.
3. En función de su gran desempeño en cuanto a tensión indirecta, es aplicable en aquellos proyectos que soliciten la tracción del concreto como un parámetro de importancia considerable en los requisitos de diseño, teniendo en cuenta que es una medida que aporta valor en todas las fases constructivas que utilicen concreto.
4. Aumenta la vida útil de las estructuras principalmente debido a que absorbe los esfuerzos internos, reduce la fisuración en estado fresco y también en estado endurecido.

Desventajas del uso de fibra de vidrio reciclada en el concreto

1. Dentro de las limitaciones más importantes encontradas durante el proyecto se encuentra el procesamiento de las láminas de fibra residual obtenida de la empresa carrocera, pues al contener un alto porcentaje de resina, las piezas pierden manejabilidad a la vez que siguen siendo un material con propiedades abrasivas. Dichos factores hacen que la gestión de recursos para su conversión en una fibra de tamaño estándar no se consiga dentro del territorio nacional, pues la fabricación de fibra

de vidrio no es un mercado emergente en el país y en su mayoría es un producto de importación. Por ende, si se desea procesar el material, es necesario diseñar una máquina con las cualidades ideales y específicas para esta labor.

2. En particular, dentro del proyecto existe una alta probabilidad de error porcentual que varía en cada mezcla. No es posible regular una distribución homogénea de la fibra en la misma, pues fue agregada de manera manual y por sus propiedades físicas era apreciable que tiene una alta adhesión entre sí, por lo que en ocasiones se generaban algunos cúmulos de fibra apreciables, pero no muy significativos, que al final no parecieron afectar circunstancialmente los resultados.
3. La manipulación de la fibra de vidrio reciclada requiere un manejo especial, con dotación específica para proteger de la inserción de este material vía cutánea, además necesita ser almacenado en condiciones específicas para evitar su compactación, ya que las fibras tienen alta adherencia entre ellas y su porcentaje de resina aumenta esta característica en función de su leve viscosidad y su comportamiento en temperaturas relativamente altas.

Potencial del concreto reforzado con fibra de vidrio residual en los mercados verdes

En base a los lineamientos dados en la Estrategia Nacional de Economía Circular, se puede afirmar que el prototipo diseñado permite ampliar el ciclo de vida de la fibra de vidrio, un material con propiedades especiales y altos volúmenes de generación de desechos. La innovación dada por el aprovechamiento del material para la creación de un concreto que demuestra un desempeño sobresaliente respecto a las fibras de vidrio comerciales, mientras soluciona un problema económico y ambiental dado en las industrias carroceras, enmarca una propuesta de valor escalable y con miras a mejoras

enfocadas en la optimización respecto a los retos enfrentados durante la elaboración del prototipo.

La simbiosis empresarial es una realidad en el proyecto, resultante de la creación de una sociedad colectiva basada en los beneficios mutuos de las relaciones sinérgicas, pues además de la industria carrocera que proporcionó parte de la materia prima esencial para el prototipo, existe un nicho de mercado amplio en el sector automotriz que podría brindar la fibra de vidrio requerida y solucionar uno de los problemas en materia de residuos industriales especiales más representativos de esta industria, favoreciendo en su lugar la creación de un material con potencial dentro de los mercados verdes.

Dentro del esquema de priorización de inversión estatal en Mercados Verdes, se encuentran los materiales de construcción y edificación, generando una oportunidad de nicho de mercado clara para el prototipo diseñado, que a su vez se adhiere a los criterios exigidos para la identificación de este tipo de negocios, los cuales son:

Figura 21 Criterios de negocios en los Mercados Verdes

1. Viabilidad económica del negocio
2. Impacto ambiental positivo del bien o servicio
3. Enfoque de ciclo de vida del bien o servicio
4. Vida útil
5. No uso de sustancias o materiales peligrosos
6. Reciclabilidad de los materiales y/o uso de materiales reciclados
7. Uso eficiente y sostenible de recursos para la producción del bien o servicio
8. Responsabilidad social el interior de la empresa
9. Responsabilidad social y ambiental en la cadena de valor de la empresa
10. Responsabilidad social y ambiental al exterior de la empresa
11. Comunicación de atributos sociales o ambientales asociados al bien o servicio
12. Esquemas, programas o reconocimientos ambientales o sociales implementados o recibidos

Nota: Diosa, E., & Latorre, T. (2019, septiembre). *Diplomado en Negocios Verdes*.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda. <https://media.utp.edu.co/centro-gestion-ambiental/archivos/CRITERIOS%20NEGOCIOS%20VERDES.pdf>

Al encontrarse en fase de prototipo el concreto sugerido cumple con al menos la mayoría de los criterios establecidos para los Negocios Verdes y es fácil proyectar el cumplimiento total de los criterios en el mediano plazo en función de los atributos mostrados por el material hasta el momento.

El proyecto es compatible con los objetivos de producción y consumo sostenible, propiciando principios de carácter ambiental, social y económico.

En cuanto al Sello Ambiental Colombiano, este reconocimiento constituye una de las metas a futuro para el prototipo al representar un carácter de competitividad y valor agregado en la industria de la construcción y su otorgamiento puede representar una mejora de precios y la preferencia del producto frente a los competidores, aunque no tenga uno completamente

directo, denota el compromiso y el reconocimiento del sentido ambiental con que inició el proyecto.

Por último, es importante resaltar que la creación de este tipo de propuestas e innovaciones cumplen con algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible más importantes y que también se encuentran estipulados en la Estrategia Nacional de Economía Circular. Dichos objetivos son (Minambiente, 2018).

Figura 22 Objetivos de desarrollo sostenible alineados con el proyecto



Nota: Minambiente, & M. (2018). *Estrategia Nacional de Economía Circular*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.

http://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%20C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf

- Trabajo decente y crecimiento económico al generar una nueva alternativa de material competente y eficiente en la industria de la construcción, una de las industrias de crecimiento más constante a lo largo del tiempo, así como la creación de oportunidades laborales en el mediano plazo en función de su producción.

- Industria, innovación e infraestructura al recrear un posible emprendimiento enfocado a favorecer la dinámica económica de bienes que generan impactos positivos e incorpora buenas prácticas ambientales.
- Ciudades y comunidades sostenibles al impulsar la simbiosis industrial entre dos sectores importantes en la economía del país y la creación de infraestructura con materiales sostenibles.
- Producción y consumo responsables en base a la ampliación del ciclo de vida de materiales que además tienen un impacto significativo en la salud y en el ambiente, ofreciendo un producto de alta demanda en el mercado con características ecológicas que superan un material sintético ya existente.
- Acción por el clima reemplazando la línea productiva de la fibra de vidrio para mezclas de concreto, sin el uso adicional de elementos químicos para su transformación y corrigiendo el ciclo de vida de un material que además de su volumen de contaminación, hasta el momento se consideraba como un residuo sin practicidad.

Impacto social y humanístico

Ya que el inadecuado manejo de residuos y desechos se convierte en uno de los principales focos de contaminación y afección a la salud pública en Colombia, la falta de cumplimiento de protocolos estipulados en la normatividad por parte de las entidades tanto públicas como privadas, una de las metas principales del presente proyecto es asegurar que, a través de la incorporación de medidas de aprovechamiento de los residuos de fibra de vidrio, factor causante de una serie de problemas a nivel ambiental e industrial por sus implicaciones a la salud, se dé lugar a una nueva filosofía institucional en el sector carrocero, donde se vele por optimizar el ciclo de vida de las materias primas utilizadas, reflejando la pertinencia empresarial que

corresponde a cada entidad y su compromiso con el medio ambiente en general, a la vez que se vela por la salud interior de la empresa.

El potencial de un material de este tipo se expande más allá de los beneficios económicos que representaría para dos de las industrias con mayor volumen y demanda a nivel mundial, también abarcaría un aporte de gran connotación a los productos verdes y el eco-etiquetado de productos, ya que resulta evidente el creciente interés en la tendencia de predilección de productos verdes por las grandes industrias, así como el aumento de la demanda por parte de los consumidores de los mismos. Haciendo que este tipo de proyectos fomenten el movimiento sinérgico que permite que las exigencias sobre los productos y su carácter sustentable tengan una connotación importante en la producción y selección de los mismos.

Por último, la materialización de la propuesta permite generar una solución a un nivel industrial más general en cuanto a las empresas que manejen en su producción fibra de vidrio tipo E, la cual, a pesar de ser actualmente infravalorada como desecho, podría pasar a considerarse como un residuo prestigioso al generar una mayor estabilidad y ganancia permitiendo una gestión más óptima de su ciclo de vida, dando apertura a su vez a una nueva línea productiva que podría generar nuevos empleos bajo un criterio sostenible.

Conclusiones

- El desempeño técnico del concreto con fibra de vidrio reciclado aporta las capacidades propias de un típico GFRC, al ser más liviano respecto al concreto convencional, y adicionalmente tiene un mejor desempeño al GFRC en cuanto a su comportamiento frente a las fuerzas de tracción, impidiendo de manera óptima la contracción temprana en estado fresco y la fisuración en estado endurecido.
- En base a todos los estudios e investigaciones predecesoras indicadas en el proyecto, se puede decir que el diseño de mezcla propuesto para el

prototipo generado constituye una alternativa de aprovechamiento ampliamente competitiva en el mercado en función del desempeño de sus propiedades y la resolución de uno de los problemas en las industrias que manejan residuos de fibra de vidrio, pues no tienen que incurrir en gastos adicionales y de alto impacto para la reinserción del material en la cadena de producción, ni tampoco deben pagar la disposición del residuo de acuerdo a las regulaciones normativas.

- A su vez, se resuelve y diversifica una necesidad de mercado de alta demanda donde, como se resalta varias veces en los antecedentes, hasta el momento solo la fibra de vidrio tipo AR resultaba competente, pues la misma es creada solo con el fin de su uso en la construcción. La fibra de vidrio reciclada abarca la simplificación de procesos industriales mediante el aprovechamiento, descartando la necesidad de químicos adicionales y líneas productivas específicas como las generadas por la fibra AR, a la vez que contribuye con la simbiosis industrial y amplía el ciclo de vida de un producto.
- En cuanto al diseño general del prototipo propuesto, las fibras obtenidas tras el proceso de adecuación para su adición en el concreto poseen propiedades de microfibras y macrofibras, pues aportan las ventajas de ambas. Puede ser que debido a que el corte de la fibra reciclada fue manual no fue posible manejar homogeneidad principalmente en su longitud y esto le atribuye características heterogéneas.
- Es importante además resaltar que en el diseño de mezcla para todos los prototipos se hizo una ligera modificación porcentual con el fin de lograr la fluidez apropiada a través de la adición de plastificante. Por ende, los resultados del concreto testigo convencional se vieron ligeramente favorecidos respecto a los estándares estipulados para concretos de 4000 psi.

- La adición de fibras no denota significativamente una mejora en la propiedad de compresión en el concreto, sin embargo, cumple con el valor asignado en la normativa. Por otra parte, el desempeño del prototipo con fibras recicladas demuestra una ventaja comparativa apreciable en la resistencia a la flexión y a la tensión indirecta (fuerzas de tracción), superando los resultados obtenidos por la fibra comercial que es su competencia más directa.
- De acuerdo a las ventajas y desventajas formuladas, el potencial en materia ambiental del prototipo generado puede sustentarse en el Plan Nacional de Negocios Verdes y en la Estrategia Nacional de Economía, documentos donde se estipulan los puntos clave de inversión e importancia a nivel nacional sobre determinados proyectos, como los son aquellos referidos a materiales de construcción y edificación, priorizados con oportunidad de compras estatales, lo cual sugiere el compromiso gubernamental en mobiliario y construcción pública sostenible. De igual manera las certificaciones ambientales por las que puede optar el producto en el futuro constituyen un sustento sólido en los nichos de mercado ecológicos.

Recomendaciones

- Una de las barreras más destacables en la fabricación del prototipo en cuestión es la manipulación de la fibra de vidrio reciclada, pues a diferencia de la fibra comercial el diámetro es menor mientras que su fibrosidad es mayor y se adhiere con facilidad a superficies y al contacto con la piel, además para su procesamiento en masa se requiere de una máquina destinada únicamente a este proceso, pues al ser un residuo con características especiales, idealmente no debe entrar en contacto con otros materiales.
- En el desarrollo del proyecto se veló por hacer la máxima cantidad de especímenes de concreto de acuerdo al material obtenido, esto con el fin

de disminuir el error porcentual presente en los cambios inestimables presentes en cada fundición, sin embargo, aunque no fue posible descartar del todo las variaciones en resultados, las propiedades en cuestión manejan sus relaciones proporcionales logrando alcanzar los resultados esperados de manera coherente.

- En caso de querer realizar a cabalidad prototipos y productos basados en el presente proyecto es importante generar una consolidación de términos en el almacenamiento del residuo en la fuente, el cual puede ser gestionado a través del Plan de Gestión Integral de Residuos de las empresas interesadas en suministrar la fibra de vidrio, ya que continuar con las prácticas de almacenamiento dadas en la empresa actual podría implicar un cambio en la composición del residuo o la cohesión con materiales indeseables.
- Las burbujas de aire evidenciadas en las diferentes muestras de concreto seco, algunas de ellas apreciables en las muestras fotográficas del proyecto, pueden deberse en gran medida al uso del plastificante puesto que este es uno de los efectos que derivan de su adición.

Referencias

- ASOCRETO. (2015). *Tecnología del Concreto, Materiales, Propiedades y Diseños de Mezclas* (Colección de concreto ed., Vol. 1). PROCEM.
- ASTM International. (2017). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17
- Belliard, R. (2016). Life cycle assessment of CFGF - Continuous Filament Glass Fibre Products. *PwC Sustainable Performance and Strategy*.

- Castiblanco, C. D., & Carrero, L. A. (2015). *Estudio teórico y experimental del comportamiento del hormigón con materiales no convencionales: fibra de vidrio y fibras de carbono, sometido a esfuerzos de compresión*. [Trabajo de pregrado, Universidad Católica de Colombia].
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2736/1/ESTUDIO%20TE%20C%20RICO%20Y%20EXPERIMENTAL%20DEL%20COMPORTAMIENTO%20DEL%20HORMIG%20CON%20MATERIALES%20NO%20CONVENCIONALES1.pdf>
- CEMEX. (2019, 5 abril). *¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto?* CEMEX. <https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-Cure>, L. (2019). Ensayo de asentamiento del concreto NTC 396. ARGOS 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/ensayo-de-asentamiento-del-concreto>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (diciembre, 2019). *Boletín Técnico de Encuesta Anual de Comercio (EAC)*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/eac/bol_eac_2018.pdf
- Diosa, E., & Latorre, T. (2019, septiembre). *Diplomado en Negocios Verdes*. Corporación Autónoma Regional de Risaralda. <https://media.utp.edu.co/centro-gestion-ambiental/archivos/CRITERIOS%20NEGOCIOS%20VERDES.pdf>
- Garrote, E. (2016). *Capítulo 2: Ensayo de tracción indirecta*. UPC.
- Gupta, S., Ramola, A., Saini, A., Arora, J., & A. (2014). *Glass Fibre Reinforced Concrete for Construction - A review*. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 1(05). <https://doi.org/10.21090/ijaerd.010538>

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2010, febrero). *Concretos. Ensayos de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto* (Norma Técnica Colombiana NTC 673). <https://es.slideshare.net/1120353985/ntc-673-compresion-concretos>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2017, noviembre). *Norma Técnica Colombiana NTC 5541. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. <https://pdfcoffee.com/ntc-5541-concretos-reforzados-con-fibra-4-pdf-free.html>
- ICONTEC. (2010, febrero). *NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 673*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. <https://es.slideshare.net/1120353985/ntc-673-compresion-concretos>
- Irias Pineda, A. S. (2013). *Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibras o solo fibras*. [Trabajo de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://1library.co/document/q5w14o3q-refuerzo-elementos-estructurales-hormigones-fibras-solo-fibras.html>
- Iskender, M., & Karasu, B. (2018). Glass Fibre Reinforced Concrete (GFRC). ResearchGate, 136–162. <https://doi.org/10.31202/ecjse.371950>
- International Organization for Standardization [ISO]. (2019). *Environmental labels. International Organization for Standardization*. <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100323.pdf>
- Meghe, R. (2014). *Glass Fiber Reinforced Concrete & Its Properties. International Journal of Engineering Sciences & Research, 3*. https://www.academia.edu/6099073/Glass_Fiber_Reinforced_Concrete_and_Its_Properties
- Minambiente, & M. (2018). *Estrategia Nacional de Economía Circular. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Ministerio de*

Comercio, Industria y Turismo.

http://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf

Minambiente. (2019). *Sello Ambiental Colombiano. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.*

https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/redise%C3%B1o_/Plegable_SAC.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.

http://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf

Morales, R., Duncan, E., García, S., Martínez, A., Barrón, F., & Cepeda, D. (2013). *Uso de materiales compuestos reciclados de fibra de vidrio poliéster como cargas de concreto polimérico.* FIME UANL.

https://www.researchgate.net/publication/328041202_Uso_de_materiales_compuestos_reciclados_de_fibra_de_vidrio-poliester_como_cargas_en_concreto_polimerico

Neville, G. (2015). *Concrete Manual (Compressive Strength ed.).* ICC.

Peña, C., & Lopez, L. E. (2019). *Evaluación de la resistencia del concreto a flexión MR 4.2 sin curado y sometido a dos tipos de curado.* [Universidad Libre de Colombia].

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17834/EVALUACI%C3%93N%20DE%20LA%20RESISTENCIA%20DEL%20CONCRETO.pdf?sequence=1>

Ramos, A., Pereira, A., Alencar, M., & Silva, L. (2010). *Environmental Marketing: The green appeal of certified products and consumer*

perception. Agronegocio e Meio Ambiente, 13(4).

https://www.researchgate.net/publication/344446550_ENVIRONMENTAL_MARKETING_THE_GREEN_APPEAL_OF_CERTIFIED_PRODUCTS_AND_CONSUMER_PERCEPTION

Residuos peligrosos y especiales - Secretaría Distrital de Ambiente. (2018).
Secretaría Distrital de Ambiente.

Resistencia a la tracción del concreto. (2015). Scribd.

<https://es.scribd.com/document/272695992/1-5-RESISTENCIA-A-LA-TRACCION-DEL-CONCRETO-docx>

Morales Ortuño, S. A. (2008). *Fibra de vidrio, pruebas y aplicaciones*.

[Trabajo de pregrado, Instituto Politécnico Nacional].

<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/4698/129.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Serrano, M. F., & Pérez, D. D. (2014). *Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto*. Scielo, 4(1).

<https://www.scielo.org.mx/pdf/ccid/v2n1/v2n1a2.pdf>

Sika. (2017). *Concreto Reforzado con Fibras*.

<https://col.sika.com/content/dam/dms/co01/6/Concreto%20reforzado%20con%20fibras.pdf>

Silva, O. J. (2018). *Las fibras en el concreto*. ARGOS 360.

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoria/aditivos-adiciones-y-fibras/las-fibras-en-el-concreto>

Toxement. (2016). *Guía Básica para el Curado del Concreto*. EUCLID GROUP TOXEMENT.

https://www.toxement.com.co/media/3899/curado_concreto-comprimido.pdf

Tecnología pionera para reciclar estructuras de fibra de vidrio. (23 de marzo 2017). Residuos profesional.

<https://www.residuosprofesional.com/tecnologia-pionera-reciclaje-fibra-de-vidrio/>

Union Quarries. (2020, 14 abril). *Fiber- Reinforced Concrete Advantages & disadvantages*. <https://unionquarries.com/fiber-reinforced-concrete-advantages-disadvantages/>

United Nations. (2018). *The 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals: An opportunity for Latin America and the Caribbean*. ECLAC. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40156/S1801140_en.pdf

Universidad Industrial de Santander. (2016). Plan de Gestión Integral de Residuos. UIS. <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/gestionAmbiental/documentos/capacitaciones/Capacitacion%20PGIR%20Tecnicos%20Salud.pdf>

ANEXOS

Resistencia a compresión 7 días

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de concreto	Dimensiones (cm)		Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga máxima (kN)	Área (cm ²)	Resistencia a compresión 7 días		
			Diámetro	Altura					MPa	Psi	kg/cm ²
19-mar	26-mar	Concreto convencional	15,4	30,3	13320	2,36	351,1	186,3	18,8	2734	192
19-mar	26-mar	Fibra de vidrio comercial	15,3	30,3	13310	2,39	355,9	183,9	19,4	2808	198
19-mar	26-mar	Fibra de vidrio reciclada	15,3	30,3	13320	2,39	351,2	183,9	19,1	2771	195

Resistencia a compresión 8 días

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de concreto	Dimensiones (cm)		Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga máxima (kN)	Área (cm ²)	Resistencia a compresión 8 días		
			Diámetro	Altura					MPa	Psi	kg/cm ²
19-mar	27-mar	Concreto convencional	15,5	30,4	13580	2,37	344	188,7	18,2	2645	186
19-mar	27-mar	Fibra de vidrio comercial	15,4	30,4	13315	2,35	379,2	186,3	20,4	2953	208
19-mar	27-mar	Fibra de vidrio reciclada	15,3	30,6	13305	2,36	388,1	183,9	21,1	3062	215

Resistencia a compresión 14 días

PROTOTIPO DE APROVECHAMIENTO DE FIBRA DE VIDRIO RESIDUAL

62

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de concreto	Dimensiones (cm)		Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga máxima (kN)	Área (cm ²)	Resistencia a compresión 14 días		
			Diámetro	Altura					MPa	Psi	kg/cm ²
5-mar	19-mar	Concreto convencional	15,3	30,5	13240	2,36	462,2	183,9	25,1	3647	257
5-mar	19-mar	Fibra de vidrio comercial	15,4	30,5	13255	2,33	386,5	186,3	20,8	3010	212
5-mar	19-mar	Fibra de vidrio reciclada	15,4	30,5	13240	2,33	386,5	186,3	20,8	3010	212

Resistencia a compresión 28 días

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de concreto	Dimensiones (cm)		Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga máxima (kN)	Área (cm ²)	Resistencia a compresión 28 días		
			Diámetro	Altura					MPa	Psi	kg/cm ²
26-feb	26-mar	Concreto convencional	15,4	30,3	13350	2,37	579,6	186,3	31,1	4514	317
26-feb	26-mar	Fibra de vidrio comercial	15,3	30,3	13160	2,36	558,2	183,9	30,4	4404	310
26-feb	26-mar	Fibra de vidrio reciclada	15,3	30,3	13110	2,35	536,6	183,9	29,2	4234	298

Resistencia a compresión 34 días

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de concreto	Dimensiones (cm)		Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga máxima (kN)	Área (cm ²)	Resistencia a compresión 34 días		
			Diámetro	Altura					MPa	Psi	kg/cm ²
3-mar	6-abr	Concreto convencional	15,5	30,1	13410	2,36	545,3	188,7	28,9	4192	295
3-mar	6-abr	Fibra de vidrio comercial	15,4	30,4	13235	2,34	466	186,3	25,0	3629	255
3-mar	6-abr	Fibra de vidrio reciclada	15,3	30,2	13410	2,42	465,1	183,9	25,3	3670	258

Resistencia a compresión 39 días

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de concreto	Dimensiones (cm)		Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga máxima (kN)	Área (cm ²)	Resistencia a compresión 34 días		
			Diámetro	Altura					MPa	Psi	kg/cm ²
19-mar	22-abr	Concreto convencional	15,3	30,3	13355	2,40	543,8	183,9	29,6	4291	302
19-mar	22-abr	Fibra de vidrio comercial	15,4	30,6	13290	2,33	519	186,3	27,9	4042	284
19-mar	22-abr	Fibra de vidrio reciclada	15,5	30,3	13310	2,33	481,8	188,7	25,5	3704	261

Resistencia a la flexión #1

PROTOTIPO DE APROVECHAMIENTO DE FIBRA DE VIDRIO RESIDUAL

63

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de muestra	Dimensiones Vigueta			Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga máxima P (t)	Carga máxima P (KN)	Módulo de rotura (MR) Resistencia a la flexión		
			Ancho	Altura	Largo					MPa	Psi	kg/cm ²
			b (mm)	d (mm)	l (mm)							
26-feb	26-mar	Concreto convencional	153	158	534	29470	2,28	4,11	40,32	4,86	704	49,5
26-feb	26-mar	Fibra de vidrio comercial	152	156	522	28615	2,31	3,87	37,96	4,72	685	48,2
26-feb	26-mar	Fibra de vidrio reciclada	151	154	523	27875	2,29	3,95	38,75	4,98	722	50,8

Resistencia a la flexión #2

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de muestra	Dimensiones Vigueta			Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga máxima P (t)	Carga máxima P (KN)	Módulo de rotura (MR) Resistencia a la flexión		
			Ancho	Altura	Largo					MPa	Psi	kg/cm ²
			b (mm)	d (mm)	l (mm)							
3-mar	31-mar	Concreto convencional	151	152	521	29330	2,45	3,65	35,81	4,72	685	48,2
3-mar	31-mar	Fibra de vidrio comercial	151	151	533	28355	2,33	3,77	36,98	4,94	717	50,4
3-mar	31-mar	Fibra de vidrio reciclada	151	152	533	28720	2,35	4,00	39,24	5,17	751	52,8

Resistencia a la flexión #3

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de muestra	Dimensiones Vigueta			Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga máxima P (t)	Carga máxima P (KN)	Módulo de rotura (MR) Resistencia a la flexión		
			Ancho	Altura	Largo					MPa	Psi	kg/cm ²
			b (mm)	d (mm)	l (mm)							
3-mar	31-mar	Concreto convencional	151	152	521	29330	2,45	3,65	35,81	4,72	685	48,2
3-mar	31-mar	Fibra de vidrio comercial	151	151	533	28355	2,33	3,77	36,98	4,94	717	50,4
3-mar	31-mar	Fibra de vidrio reciclada	151	152	533	28720	2,35	4,00	39,24	5,17	751	52,8

Resistencia a la tensión 39 días

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de muestra	Dimensiones		Área cm ²	Masa g	Densidad g/cm ³	Carga máx kN	Resistencia (39 días)		
			l	f					kPa	Mpa	kg/cm ²
26-feb	6-abr	Concreto convencional	0,304	0,152	181,5	13269	2,405	250,1	3430	3,4	34,7
		Fibra comercial	0,303	0,152	181,5	13055	2,374	250	3465	3,5	35,47
		Fibra reciclada	0,303	0,151	179,1	13184	2,43	291	4060	4,1	41,8

Resistencia a la tensión 34 días

PROTOTIPO DE APROVECHAMIENTO DE FIBRA DE VIDRIO RESIDUAL

64

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de muestra	Dimensiones		Área cm ²	Masa g	Densidad g/cm ³	Carga máx kN	Resistencia (34 días)		
			l	f					kPa	Mpa	kg/cm ²
3-mar	6-abr	Concreto convencional	0,302	0,151	716,31	13220	2,444	230,4	3220	3,2	32,71
		Fibra comercial	0,303	0,152	721,07	13253	2,41	234,1	3220	3,2	33,02
		Fibra reciclada	0,302	0,152	716,31	13009	2,374	277,8	3150	3,2	39,44

Módulo de elasticidad velocidad 1

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de concreto	Dimensiones (cm)		Carga máxima (kN)	Área (cm ²)	Datos para módulo de elasticidad				Módulo elástico Ec (MPa)
			Diámetro	Altura			Carga (t)	Def. (mm)	Esfuerzo (MPa)	Def. unitaria	
26-feb	26-mar	Concreto convencional	15,4	30,3	579,6	186,3	22,99	0,197	12,11	0,0650%	18637
26-feb	26-mar	Fibra de vidrio comercial	15,3	30,3	558,2	183,9	23,00	0,184	12,27	0,0606%	20259
26-feb	26-mar	Fibra de vidrio reciclada	15,3	30,3	536,6	183,9	23,10	0,208	12,33	0,0686%	17965

Módulo de elasticidad velocidad 2

Fecha de toma	Fecha de ensayo	Tipo de concreto	Dimensiones (cm)		Carga máxima (kN)	Área (cm ²)	Datos para módulo de elasticidad				Módulo elástico Ec (MPa)
			Diámetro	Altura			Carga (kN)	Def. (mm)	Esfuerzo (MPa)	Def. unitaria	
26-feb	27-mar	Concreto convencional	15,4	30,5	561,8	186,3	22,98	0,179	12,10	0,0588%	20580
26-feb	27-mar	Fibra de vidrio comercial	15,4	30,5	524,6	186,3	23,03	0,177	12,13	0,0581%	20892
26-feb	27-mar	Fibra de vidrio reciclada	15,2	30,3	512,1	181,5	23,08	0,198	12,47	0,0652%	19130

